

Анализ двухканального измерительного тракта развертывающих поляриметров

А.С. Мартынов¹, Г.И. Уткин¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Проведенный анализ показал, что использование двухканального измерительного тракта в развертывающих поляриметрах позволяет проводить суммарно-разностную обработку, с помощью которой возможно значительное снижение влияния амплитудных помех источника излучения на точность измерений.

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 биологических исследованиях для анализа свойств органических и биологических оптически активных веществ. Для проведения высокоточных измерений были разработаны лазерные быстродействующие поляриметры, предназначенные для проведения исследований 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 сервополяриметра.

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 меняется по гармоническому закону с частотой в 2 раза больше частоты вращения поляризатора и разностью фаз π [2]. Информация об УВПП исследуемой средой содержится в фазе сигналов измерительного тракта:

$$\begin{aligned} S_1(t) &= 0, 5I_0\tau_{п.м}\tau_{ср}(1 + \mu_d \cos(2\theta - 2\alpha)); \\ S_2(t) &= 0, 5I_0\tau_{п.м}\tau_{ср}(1 - \mu_d \cos(2\theta - 2\alpha)), \end{aligned} \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность источника излучения; $\tau_{п.м}$ — коэффициент пропускания поляризационного модулятора; $\tau_{ср}$, μ_d — коэффициенты пропускания и деполяризации излучения средой; $\theta = 2\pi\omega t$; ω — частота вращения поляризатора; 2α — УВПП средой.

Таким образом, измерение УВПШ сводится к определению сдвига фазы сигналов при отсутствии и наличии исследуемой среды. Для этого используется привязка по времени, обеспечиваемая встроенным независимым опорным трактом.

Существуют различные схемы получения поляризационно модулированного излучения, например, путем пропускания неполяризованного излучения через вращающийся поляризатор (в этом случае $\tau_{п.м} = 0,5$) или вращением линейно-поляризованного источника излучения вокруг своей оси ($\tau_{п.м} = 1$).

Сигналы измерительного тракта подвержены влиянию следующих помех:

- амплитудных помех и наводок источника излучения (ИИ);
- поляризационных помех ИИ (отклонение состояния его поляризации от требуемого);
- шумов фотоприемников и электронного тракта (ЭТ).

Амплитудные помехи и наводки ИИ приводят к модуляции сигналов измерительного тракта (рис. 1, 2):

$$I(t) = I_0 (1 + \eta(t) + \xi(t));$$

$$S_1(t) = 0,5 I_0 \tau_{п.м} \tau_{ср} (1 + \eta(t) + \xi(t)) (1 + \mu_d \cos(2\theta - 2\alpha)); \quad (2)$$

$$S_2(t) = 0,5 I_0 \tau_{п.м} \tau_{ср} (1 + \eta(t) + \xi(t)) (1 - \mu_d \cos(2\theta - 2\alpha)),$$

где $\eta(t)$, $\xi(t)$ — помеха и наводка по отношению к постоянной составляющей интенсивности источника излучения (относительная величина шумов и наводок источника).

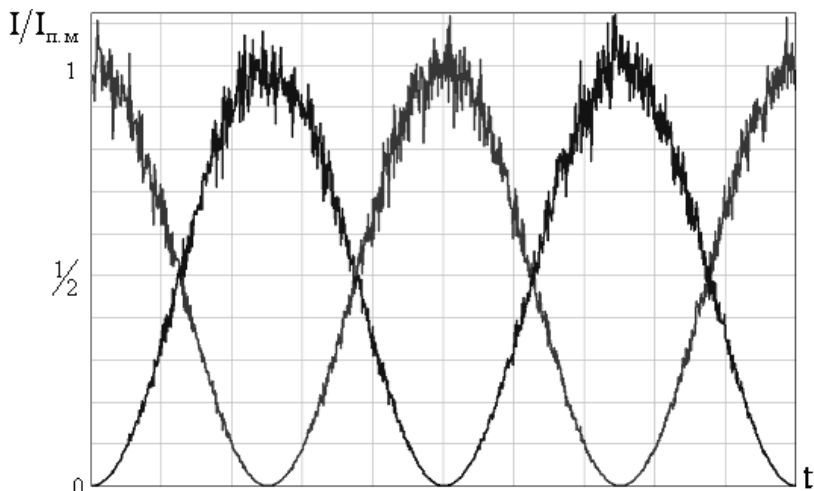


Рис. 1. Модуляция сигналов измерительного тракта амплитудными шумами источника излучения:

$I_{п.м} = \tau_{п.м} I_0$ — интенсивность поляризационно модулированного излучения

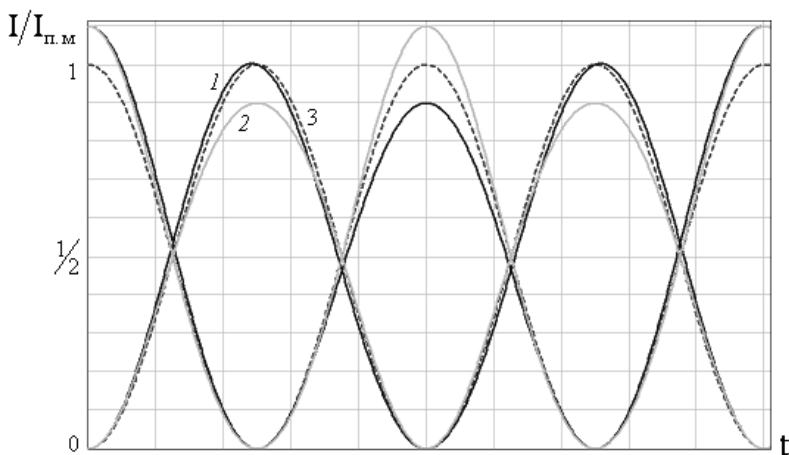


Рис. 2. Модуляция сигналов измерительного тракта гармонической наводкой III:

1 — частота наводки равна частоте сигнала; 2 — частота наводки в 2 раза ниже частоты сигнала; 3 — наводка отсутствует

Характер и влияние поляризационных помех на сигналы измерительного тракта зависят от схемотехнической реализации, используемой для получения поляризационно модулированного излучения. Частичная линейная поляризации излучения, проходящего через вращающийся поляризатор, приводит к модуляции сигналов (рис. 3):

$$S_{1,2}(t) = 0,5 \tau_{п.м} \tau_{ср} I_0 (1 \pm \cos(2\theta - 2\alpha) \pm 0,5 \cos(4\theta - 2\alpha) \delta Q \pm \pm \sin(4\theta - 2\alpha) \delta U + \cos(2\theta) \delta Q + \sin(2\theta) \delta U \pm \pm 0,5 \cos(2\alpha) \delta Q \pm 0,5 \sin(2\alpha) \delta U, \quad (3)$$

где δQ , δU — составляющие линейной поляризации излучения источника.

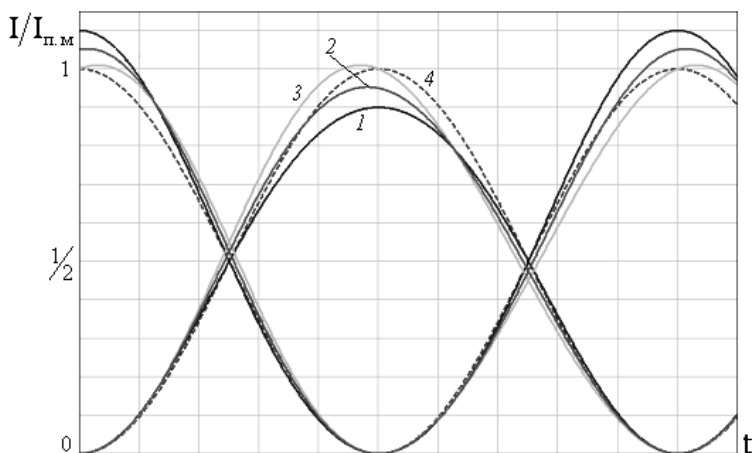


Рис. 3. Модуляция сигналов измерительного тракта при наличии (1, 2, 3) и отсутствии (4) линейной поляризации излучения источника в схеме с вращающимся поляризатором

Для вращающегося источника линейно-поляризованного излучения снижение степени поляризации приводит к уменьшению амплитуды основной гармоники измерительных сигналов:

$$S_{1,2}(t) = 0,5\tau_{п.м}\tau_{ср} (1 \pm (1 - \delta Q) \cos(2\theta - 2\alpha)), \quad (4)$$

где δQ — снижение степени поляризации.

Шумы фотоприемников и ЭТ представляют собой аддитивную случайную помеху, величина и характер которой зависит от используемых компонент и характеристик излучения, таких как постоянная составляющая, амплитуда и частота модуляции (рис. 4):

$$S_{1,2}(t) = I_0 (0,5\tau_{п.м}\tau_{ср} (1 \pm \mu_d \cos(2\theta - 2\alpha)) + \eta_{п.и,2}(t)), \quad (5)$$

где $\eta_{п.и,2}$ — относительная величина шумов приемников излучения и электронного тракта, приведенная к интенсивности ИИ.

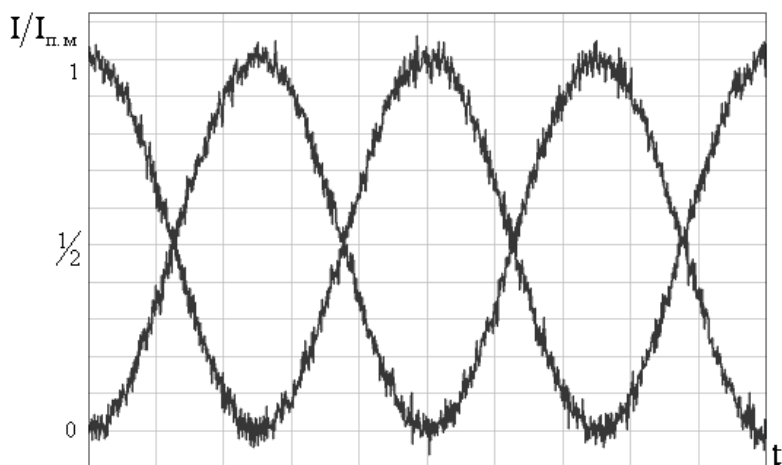


Рис. 4. Сигналы измерительного тракта при наличии помех фотоприемников и электронного тракта

Высокая степень деполяризации и ослабления излучения средой приводят к тому, что шумы приемников излучения и ЭТ ограничивают точность измерений. Для проведения исследований таких сред были разработаны и проанализированы методы помехоустойчивой обработки сигналов [4]. Использование ортогонального метода и метода на основе преобразования Фурье позволяет получать высокую точность измерения фазы сигналов при уровне шумов, сопоставимых с уровнем сигнала. При этом ортогональный метод обладает меньшей ресурсоемкостью, легко поддается распараллеливанию и потому более предпочтителен для высокоскоростной обработки сигналов. Вместе с тем эти методы являются чувствительными к модуляции измерительных сигналов.

Применение двухканального измерительного тракта позволяет снизить влияние амплитудных и поляризационных помех путем суммарно-разностной обработки сигналов:

$$S_{\Sigma}(t) = S_1(t) + S_2(t) = I_0 \tau_{п.м} \tau_{ср};$$

$$S_{\Delta}(t) = S_1(t) - S_2(t) = I_0 \tau_{п.м} \tau_{ср} \mu_d \cos(2\theta - 2\alpha); \quad (6)$$

$$S_{\Sigma\Delta}(t) = \frac{S_{\Delta}(t)}{S_{\Sigma}(t)} = \mu_d \cos(2\theta - 2\alpha).$$

Суммарно-разностный сигнал сохраняет частотные и фазовые соотношения исходных сигналов. Поскольку мультипликативные амплитудные помехи и наводки источника излучения одинаковы для обоих каналов измерительного тракта, то их влияние при такой обработке взаимно компенсируется (рис. 5, 6).

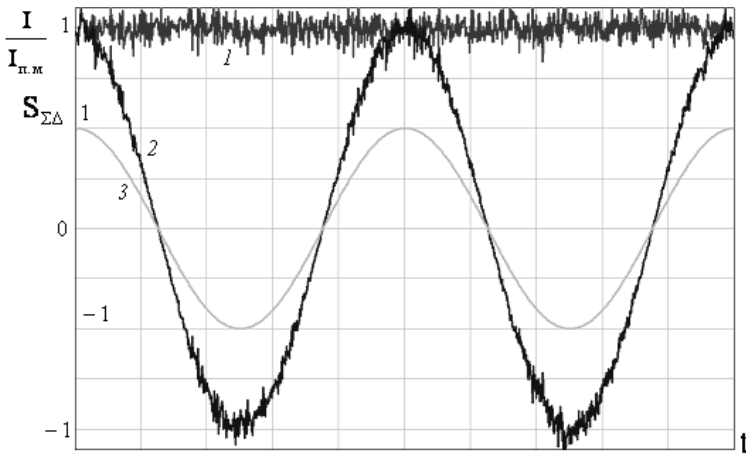


Рис. 5. Суммарный (1), разностный (2) и суммарно-разностный (3) сигналы при наличии в излучении источника случайных помех

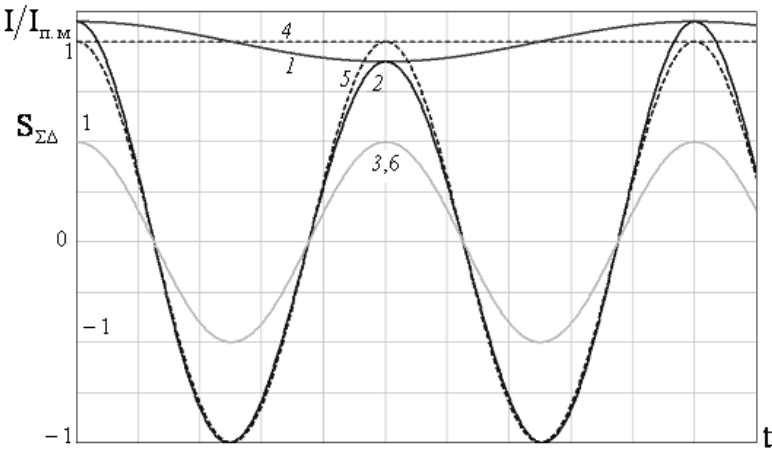


Рис. 6. Суммарный (1), разностный (2) и суммарно-разностный (3) сигналы при наличии в излучении источника гармонической наводки

Ослабление излучения средой также не влияет на форму суммарно-разностного сигнала, а деполяризация приводит к уменьшению его амплитуды (рис. 7).

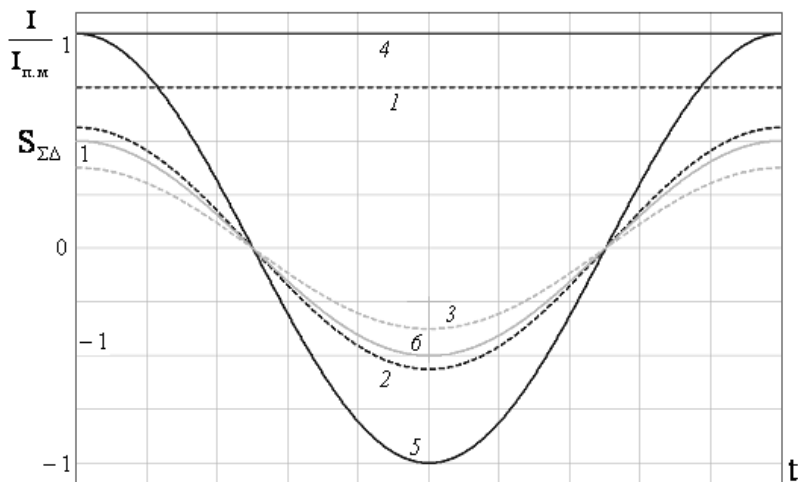


Рис. 7. Суммарный, разностный и суммарно-разностный сигналы при деполяризации излучения средой (1—3) и ее отсутствии (4—6)

Вместе с тем шумы фотоприемников и ЭТ в общем случае являются независимыми для каждого из каналов, поэтому они не могут быть скомпенсированы (рис. 8):

$$S_{\Sigma}(t) = I_0 (\tau_{\text{п.м}} \tau_{\text{ср}} + \eta_1(t) + \eta_2(t));$$

$$S_{\Delta}(t) = I_0 (\tau_{\text{п.м}} \tau_{\text{ср}} \mu_{\text{д}} \cos(2\theta - 2\alpha) + \eta_1(t) + \eta_2(t)); \quad (7)$$

$$S_{\Sigma\Delta}(t) = \frac{\tau_{\text{п.м}} \tau_{\text{ср}} \mu_{\text{д}} \cos(2\theta - 2\alpha) + \eta_1(t) + \eta_2(t)}{\tau_{\text{п.м}} \tau_{\text{ср}} + \eta_1(t) + \eta_2(t)}.$$

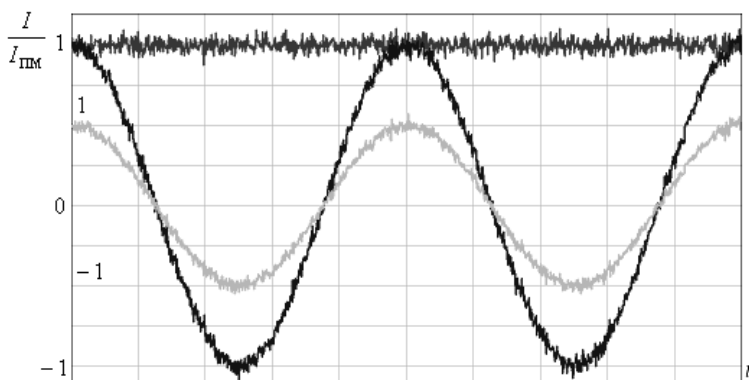


Рис. 8. Суммарный (1), разностный (2) и суммарно-разностный (3) сигналы при наличии шумов фотоприемников и электронного тракта

Характер получаемой в суммарно-разностном сигнале помехи остается случайным, что позволяет использовать для его обработки разработанные помехоустойчивые алгоритмы обработки.

Проведенный анализ показал, что использование двухканального измерительного тракта в развертывающих поляриметрах позволяет проводить суммарно-разностную обработку, с помощью которой возможно значительное снижение влияния амплитудных помех ИИ на точность измерений. Помеха, получаемая в сигнале после суммарно-разностной обработки от шумов фотоприемников и ЭТ, носит случайный характер и может быть подавлена путем использования помехоустойчивых алгоритмов обработки сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Utkin G.I. Compact turbopolarimeter in Lightmetry: Metrology, Spectroscopy, and Testing Techniques Using Light, Maksymilian Pluta, Editor, Proceedings of SPIE. 2001. Vol. 4517. P. 153—157.
2. Polarimeter Utkina, Patent RU1696896, Official catalogue 44-th World Exhibition of invention, Research and industrial innovation “BRUSSELS EUREKA 95”. Brussels, 1995. P. 319, 320.
3. Уткин Г.И. Патент РФ № RU2269101 Турбополяриметр, МКИ G01J 4/04; Заявл. 2004118823/28 от 23.06.2004; Опубл. 27.01.2006. Бюл. № 3 // Открытия, изобретения. 2006. 7 с.
4. Мартынов А.С., Уткин Г.И. Анализ точности методов обработки сигналов сканирующих поляриметров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. вып. Современные проблемы оптотехники. 2011. С. 168—176.

Статья поступила в редакцию 16.10.2012