

## **Быстродействующие поляриметры для биохимических применений**

© А.С. Мартынов, Г.И. Уткин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Описаны схемы построения быстродействующих поляриметров для исследования кинетики биохимических реакций, приведены методы повышения их точности и помехоустойчивости, снижающие влияние амплитудных флуктуаций источника излучения и рассеяния среды.*

**Ключевые слова:** *оптическая активность, поляриметрия, оптико-электронный поляриметр, развертывающее измерение, турбополяриметр.*

В живых организмах происходит множество сложных химических реакций. Их изучение крайне важно для медицины, фармацевтики, пищевой промышленности, сельского хозяйства и других отраслей науки и производства, связанных с жизнедеятельностью человека и окружающей среды. Одним из важнейших отличительных свойств органических веществ является их оптическая активность. Эти вещества могут существовать в виде пар оптических антиподов — изомеров, физические и химические свойства которых в обычных условиях одинаковы за исключением знака вращения плоскости поляризации. При этом важнейшие биологические вещества — аминокислоты, белки, нуклеиновые кислоты, углеводы — присутствуют (производятся или усваиваются) во всех живых организмах в виде одного оптического антипода [1]. Причем воздействие оптических антиподов на организм может значительно различаться. Методы, основанные на определении вращения плоскости поляризации, являются одними из наиболее важных и активно применяемых методов исследования органических веществ и реакций с их участием. С помощью методов поляризационного анализа определяют наличие и измеряют концентрации различных оптически активных органических веществ в растворах (сахаров, белков, аминокислот, антибиотиков и др.). Методы оптической поляриметрии сочетают в себе высокую точность, чувствительность, быстродействие, возможность неразрушающего контроля и автоматизации. В последнее время все больший интерес представляют не только результаты исследуемых биохимических реакций, но и кинетика их протекания, для чего требуется определять изменение концентрации оптически активных ве-

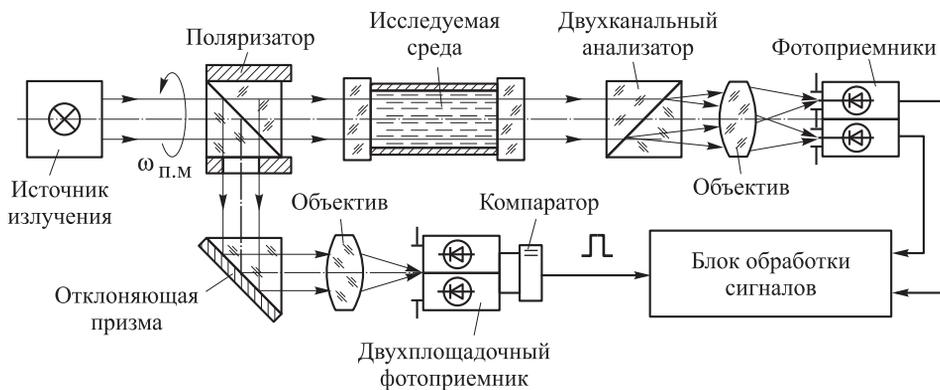
ществ с течением времени. В связи с этим актуальной задачей является повышение быстродействия приборов поляризационного анализа (поляриметров) и снижение времени подготовки образцов.

Часто первичные пробы и образцы для исследования с использованием поляриметров содержат примеси, приводящие к значительному рассеянию и поглощению излучения, поэтому требуется их предварительная подготовка — осветление. Эта процедура включает в себя многоуровневую фильтрацию и осаждение примесей с использованием химических реагентов. Основным видом используемых реагентов являются соли тяжелых металлов, такие как уксуснокислый свинец (ацетат свинца). Использование таких веществ возможно только в специально предназначенных помещениях, находящихся на значительном удалении от научно-производственных помещений. Все это существенно снижает оперативность проводимого анализа, а также значительно затрудняет или делает невозможными исследования кинетики реакций. Вместе с примесями в процессе осветления может быть отфильтрована и осаждена часть оптически активного вещества, что приводит к погрешности определения его исходной концентрации.

Большинство современных промышленно выпускаемых в настоящее время поляриметров реализует следящий принцип измерения угла вращения плоскости поляризации (УВП). В них при анализе неосветленных растворов поглощение излучения исследуемой средой компенсируется увеличением интенсивности излучения источника, что ведет к росту уровня мультипликативных шумов и помех, а также может вызывать повышение температуры исследуемой среды. Использование инфракрасной части спектра ограничивается дисперсией оптического вращения исследуемой среды и элементов оптико-электронного тракта, а также отсутствием стандартов поляриметрических измерений для этих длин волн. Кроме того, в следящих поляриметрах погрешность измерений и быстродействие ограничиваются малым значением отношения сигнал/шум в момент компенсации, погрешностями и быстродействием исполнительного следящего механизма и датчика углового положения. Применение прецизионных поляризационных модуляторов, многоскоростных безлюфтовых редукторов и датчиков угла делает такие приборы сложными в разработке и эксплуатации, снижает надежность, увеличивает энергопотребление и значительно повышает стоимость. Но даже применение таких технических решений не позволяет снизить время измерений и исключить срывы процедуры слежения в условиях значительного рассеяния и поглощения излучения исследуемой средой, вследствие чего невозможно повысить точность измерений УВП путем применения алгоритмов статистической обработки большого числа результатов.

Применение развертывающего принципа измерения УВП [2–4], в основе которого лежит концепция развертывающих измерительных систем [5], позволяет значительно повысить быстродействие поляриметров и упростить их конструкцию, что делает этот принцип наиболее перспективным при создании поляриметров для анализа сред с высокими оптическими рассеянием и поглощением. Вместе с тем вопросы влияния параметров основных элементов оптико-электронного тракта, рассеяния и поглощения излучения исследуемой средой на погрешность измерений УВП развертывающими поляриметрами до настоящего времени были исследованы недостаточно.

Для анализа помех, вносимых в измерительные сигналы основными элементами оптико-электронного тракта развертывающих поляриметров, и оценки погрешности измерений в рамках единой концепции разработаны математические модели процесса измерения УВП, позволяющие учитывать рассеяние и поглощение излучения исследуемой средой для двух схем развертывающих поляриметров с двухканальным измерительным трактом. В первой схеме (рис. 1) неполяризованное излучение источника проходит через равномерно вращающийся поляризатор, становясь линейно поляризованным и модулированным по азимуту плоскости поляризации. При прохождении через исследуемую среду плоскость поляризации излучения приобретает дополнительный поворот. Двухканальный поляризационный анализатор-светоделитель выделяет ортогонально поляризованные составляющие излучения, интенсивность которых регистрируется фотоприемниками. Излучение, которое отводится от вращающегося поляризатора, проходит вдоль площадок двухплощадочного фотоприемника. В момент равенства освещенности обеих площадок логическая схема на основе компаратора вырабатывает импульс опорного сигнала, определяющий нулевое положение поляризатора.



**Рис. 1.** Функциональная схема развертывающего поляриметра с источником неполяризованного излучения и вращающимся поляризатором

Во второй схеме (рис. 2) для осуществления поляризационной модуляции применен источник линейно поляризованного излучения, вращающийся вокруг своей оси. В дальнейшем излучение также проходит через исследуемую среду и двухканальный анализатор. Для формирования сигнала опорного тракта используется датчик Холла, вырабатывающий импульс при прохождении вращающимся основанием нулевого положения. Данная схема обеспечивает более полное использование излучения источника.

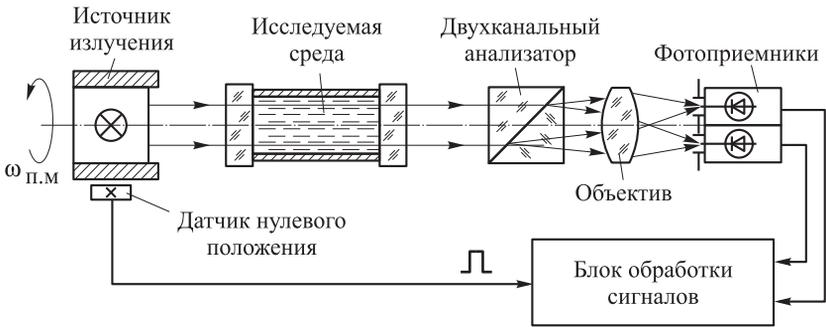


Рис. 2. Функциональная схема развертывающего поляриметра с вращающимся источником линейно поляризованного излучения

Интенсивность излучения на выходе каждого из каналов анализатора изменяется по гармоническому закону

$$I_{a1,2} = 0,5\tau_{п.м}\tau_{ср}I_{ист} [1 \pm (1 - \mu_{ср}) \cos(2\theta - 2\alpha + \varphi_0)]. \quad (1)$$

Здесь  $I_{ист}$  — интенсивность излучения источника;  $\tau_{п.м}$  — коэффициент пропускания элемента, осуществляющего поляризационную модуляцию излучения;  $\tau_{ср}$ ,  $\mu_{ср}$  — коэффициенты пропускания и деполаризации среды соответственно;  $\theta \equiv \theta(t) = \omega_{п.м}t$  ( $\omega_{п.м}$  — угловая частота поляризационной модуляции);  $\alpha$  — УВПИ исследуемой среды;  $\varphi_0$  — фазовый сдвиг (ФС) измерительных сигналов относительно опорного сигнала при отсутствии исследуемой среды. Измерение УВПИ основывается на определении изменения ФС измерительных сигналов при отсутствии и наличии исследуемой среды:

$$2\alpha = \varphi_0 - \varphi_\alpha, \quad (2)$$

где  $\varphi_\alpha = \varphi_0 - 2\alpha$  — ФС измерительных сигналов при наличии вращения плоскости поляризации исследуемой средой.

В рассмотренных схемах нет необходимости в точном определении частоты вращения поляризатора или источника излучения, достаточно обеспечить ее стабильность в пределах одного периода. При этом время измерения не зависит от измеряемого значения УВПИ,

как в следящих поляриметрах, и определяется только частотой модуляции излучения по азимуту плоскости поляризации.

С использованием разработанной модели проведен анализ характера и уровня помех, вносимых в измерительные сигналы развертывающих поляриметров основными элементами оптико-электронного тракта [6]. Модуляция  $v_{\text{ист}}(t)$  и флуктуация  $\Delta I_{\text{ист}}(t)$  интенсивности излучения источника вызывают модуляцию измерительных сигналов:

$$I_{a1,2} = 0,5\tau_{\text{п.м}}\tau_{\text{ср}} [v_{\text{ист}}(t)I_{\text{ист},0} + \Delta I_{\text{ист}}(t)] [1 \pm \cos(2\theta - 2\alpha)]. \quad (3)$$

В схеме с источником неполяризованного излучения и вращающимся поляризатором частичная линейная поляризация излучения источника приводит к появлению в измерительных сигналах дополнительных гармонических составляющих:

$$\begin{aligned} I_{a1,2} = 0,25I_{\text{ист}} [1 \pm \cos(2\theta - 2\alpha) \pm 0,5 \cos(4\theta - 2\alpha)\delta Q \pm \\ \pm 0,5 \sin(4\theta - 2\alpha)\delta U + \cos(2\theta)\delta Q + \sin(2\theta)\delta U \pm \\ \pm 0,5 \cos(2\alpha)\delta Q \pm 0,5 \sin(2\alpha)\delta U], \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\delta Q$ ,  $\delta U$  — отклонения значений линейно поляризованных компонент излучения источника от требуемых.

В схеме с вращающимся источником линейно поляризованного излучения возможно снижение степени его поляризации, что приводит к снижению уровня гармонической составляющей измерительных сигналов:

$$I_{a1,2} = 0,5\tau_{\text{п.м}}\tau_{\text{ср}}I_{\text{ист}} [1 \pm (1 - \delta Q)\cos(2\theta - 2\alpha)]. \quad (5)$$

Если оптический тракт не изолирован от внешней среды, то на фотоприемники попадает излучение фона, приводящее к появлению в измерительных сигналах аддитивных составляющих, одинаковых для обоих каналов:

$$I_{A1,2} = 0,5\tau_{\text{п.м}}\tau_{\text{ср}}I_{\text{ист}} [1 \pm \mu_{\text{ср}} \cos(2\theta - 2\alpha)] + I_{\text{ф}}(t). \quad (6)$$

Фоновые помехи могут носить случайный характер с постоянной составляющей, возможны также наводки с гармоническим или иным законом:

$$I_{\text{ф}}(t) = I_{\text{ф},0} + I_{\text{ф},\text{ш}}(t) + I_{\text{ф},\text{н}}(t). \quad (7)$$

Поскольку обычно поляриметры изготавливают в корпусах с поглощающими внутренними покрытиями, то в большинстве случаев влиянием фоновой засветки можно пренебречь.

Фотоприемники вносят в измерительные сигналы аддитивные шумовые составляющие, статистически независимые для каждого из каналов:

$$I_{a1,2} = 0,5\tau_{п.ш}\tau_{ср}I_{ист} \left[ 1 \pm \mu_{ср} \cos(2\theta - 2\alpha) \right] + I_{п.и.ш1,2}, \quad (8)$$

где  $I_{п.и.ш1,2}$  — эквивалентная интенсивность шумов фотоприемника;  $I_{п.и.ш} = i_{п.и.ш}/S_{п.и}$ ;  $i_{п.и.ш}$  и  $S_{п.и}$  — шумовой ток и интегральная чувствительность приемника в спектральном диапазоне излучения источника соответственно.

Поглощение излучения средой приводит к снижению общего уровня сигналов измерительного тракта, а рассеяние — их гармонических составляющих, снижая отношение сигнал/шум пропорционально  $\tau_{ср}\mu_{ср}$ . При высоких оптических рассеянии и поглощении излучения возможно снижение отношения сигнал/шум до значений, близких к единице.

Изначально в развертывающих поляриметрах с двухканальным измерительным трактом для измерения ФС сигналов применялся компараторный метод, который основан на вычислении отношения интервала времени между поступлением сигнала опорного тракта и моментом равенства измерительных сигналов  $t_{\phi}$  к интервалу времени между двумя последовательными импульсами опорного сигнала  $T_{изм}$ :

$$\phi_{изм} = 720 t_{\phi} / T_{изм}, \quad (9)$$

где  $\phi_{изм}$  — ФС сигналов. Использование двухканального измерительного тракта позволяет отказаться от определения в процессе измерения экстремума (например, минимума) измерительного сигнала и тем самым существенно снизить влияние мультипликативных помех источника излучения и шумов фотоприемников. Погрешность измерения моментов начала и окончания измеряемых периодов приводит к погрешности измерения ФС, максимальное значение которой можно оценить по формуле

$$\Delta\phi = 1440 \Delta t / T_{изм}, \quad (10)$$

где  $\Delta\phi$ ,  $\Delta t$  — максимальные погрешности измерения ФС и определения моментов времени соответственно.

Для определения моментов времени начала и окончания периода измерения можно использовать высокоточные системы, обеспечивающие относительную погрешность измерений, равную  $10^{-4} \dots 10^{-6}$ . В этом случае основным источником погрешности измерения ФС является погрешность определения момента равенства сигналов измерительного тракта. К возникновению этой погрешности приводит

наличие в измерительных сигналах аддитивной шумовой составляющей. Проведенные оценки показали, что для обеспечения погрешности измерений ФС не более  $0,01^\circ$  требуется отношение сигнал/шум  $q \geq 10^3 \dots 10^4$ . По этой причине компараторный метод нельзя использовать для обработки сигналов быстродействующих развертывающих поляриметров в условиях значительного рассеяния и поглощения излучения исследуемой средой.

Использование в развертывающих поляриметрах двухканального измерительного тракта позволяет снизить погрешность измерений, вызванную флуктуациями интенсивности излучения источника путем применения разработанного метода двухканального поляризационного подавления мультипликативных помех в информационных сигналах. Этот метод основан на суммарно-разностной обработке измерительных сигналов:

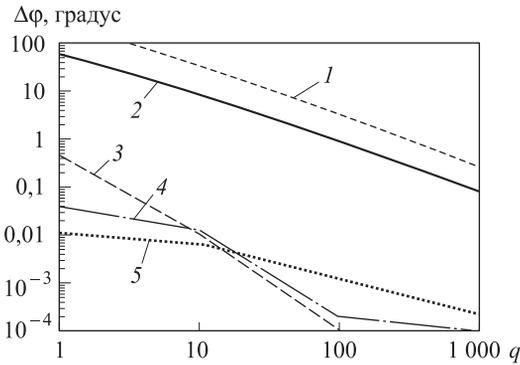
$$S_{\Sigma\Delta} = \frac{I_{a,1} - I_{a,2}}{I_{a,1} + I_{a,2}} = \mu_{cp} \cos(2\theta - 2\alpha). \quad (11)$$

В получаемом суммарно-разностном сигнале также снижается уровень аддитивных составляющих, возникающих вследствие флуктуаций состояния поляризации излучения источника и наличия фоновых помех. Вместе с тем при суммарно-разностной обработке возможно повышение уровня флуктуаций, вызванных шумами фотоприемников:

$$S_{\Sigma\Delta} = \frac{\mu_{cp} \tau_{cp} \cos(2\theta - 2\alpha) + \eta_{п.и,1}(t) - \eta_{п.и,2}(t)}{\tau_{cp} + \eta_{п.и,1}(t) + \eta_{п.и,2}(t)}, \quad (12)$$

где  $\eta_{п.и,1,2}(t) = I_{п.и.ш1,2} / (\tau_{п.и} I_{ист,0})$ .

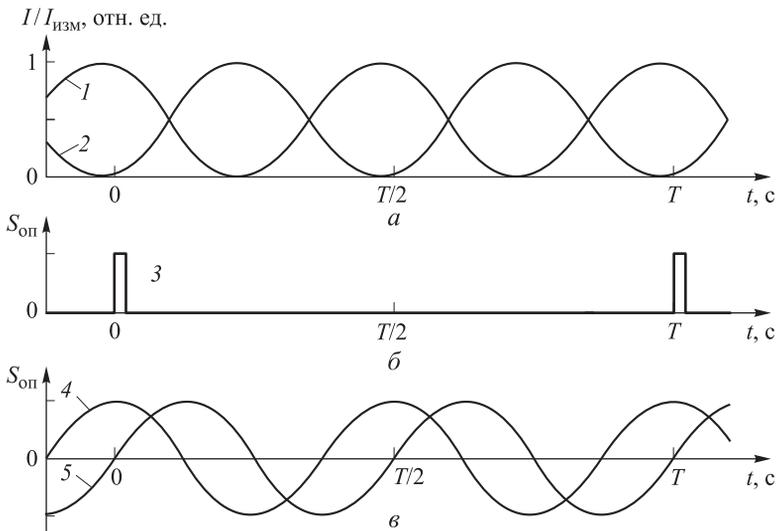
Для обеспечения измерений УВПП развертывающими поляриметрами в условиях значительного рассеяния и поглощения излучения средой проведен анализ алгоритмов вычисления ФС для оценки погрешности при отношении сигнал/шум, близком к единице: корреляционный, компенсационный, ортогональный [7], на основе усреднения, на основе преобразования Фурье [8]. Результаты проведенного анализа показали, что использование компенсационного и ортогонального алгоритмов, а также алгоритма на основе преобразования Фурье позволяет обеспечить при отношении сигнал/шум  $q = 1$  погрешность измерений  $0,2^\circ \dots 0,4^\circ$  (рис. 3). При этом использование ортогонального алгоритма не требует значительного объема вычислений, что делает его наиболее предпочтительным для обработки сигналов быстродействующих развертывающих поляриметров.



**Рис. 3.** Погрешность вычисления ФС от отношения сигнал/шум:

1 — компараторный метод; 2, 3 — корреляционные алгоритмы при  $\varphi$ , равном нулю и  $89^\circ$  соответственно; 4, 5 — ортогональные алгоритмы при  $\varphi$ , равном  $45^\circ$  и нулю соответственно

Для рассмотренных алгоритмов требуется один или два опорных гармонических сигнала с частотой, равной частоте измерительного сигнала. Частоту этих сигналов и время измерения предложено определять на основании периодов времени между двумя последовательными импульсами сигнала опорного тракта (рис. 4). Опорные сигналы формируют в виде совокупности отсчетов в моменты времени дискретизации измерительных сигналов. Это обуславливает отсутствие шумов, в том числе вызванных аналого-цифровым преобразованием.

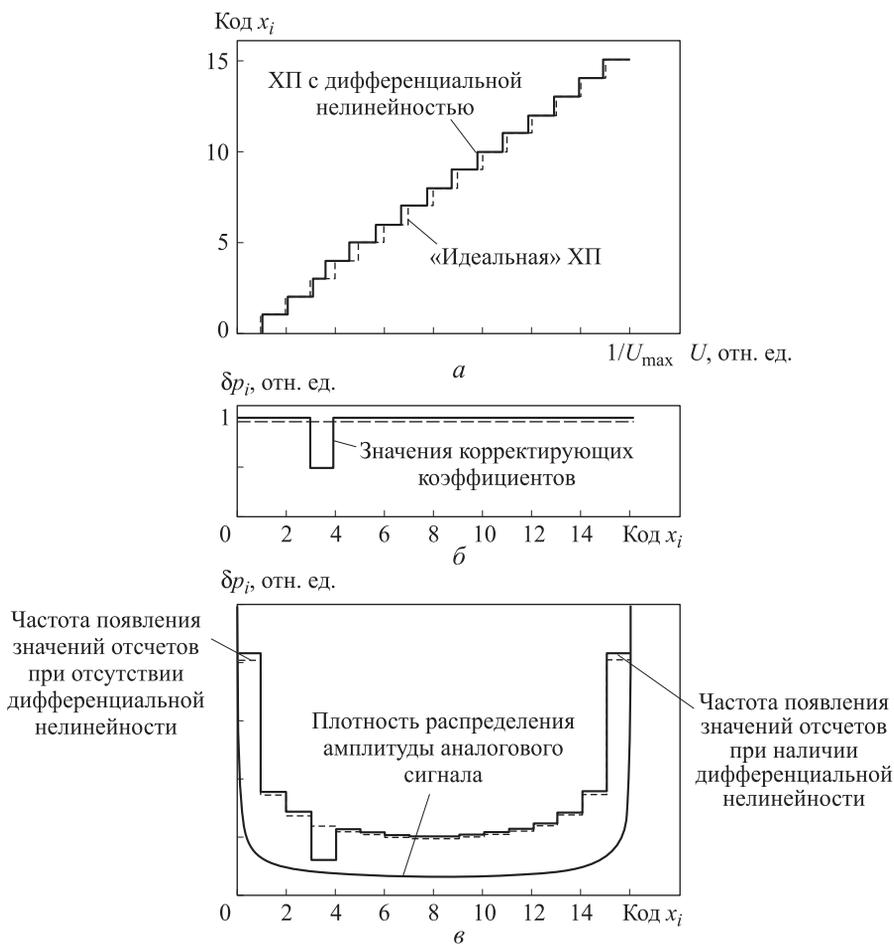


**Рис. 4.** Определение частоты опорных гармонических сигналов и времени измерения ( $I_{\text{изм}} = \tau_{\text{п.м}} I_{\text{ист}}$ ):

*a* — сигналы измерительного тракта; *б* — сигнал цифрового опорного тракта; *в* — опорные гармонические сигналы

Проведенная оценка показала, что погрешность определения периода измерения существенно влияет на погрешность вычисления ФС при использовании методов на основе рассмотренных алгоритмов и не должна превышать  $10^{-4}$ .

Использование цифровой обработки сигналов быстродействующих развертывающих поляриметров позволяет применять сложные методы обработки. Вместе с тем процедура аналогово-цифрового преобразования может вносить искажения, приводящие к погрешности измерений при использовании методов обработки на основе статистических алгоритмов. Для оценки этой погрешности разработана модель, описывающая взаимосвязь плотности вероятности амплитуды аналогового сигнала и частот появления значений отсчетов, получаемых в результате преобразования [9] (рис. 5).



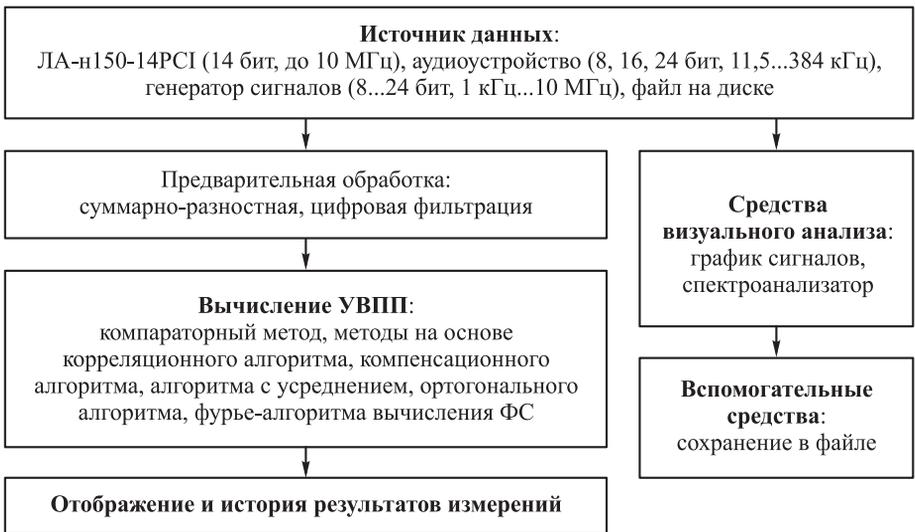
**Рис. 5.** Влияние дифференциальной нелинейности на распределение значений отсчетов при преобразовании гармонического сигнала (ХП — характеристика преобразования АЦП)

Данная модель позволяет упростить расчеты и использовать данные о дифференциальной нелинейности, полученные экспериментально. Проведенная оценка показала, что погрешность результатов, получаемых при использовании основных статистических алгоритмов об-

работки сигналов развертывающих поляриметров, зависит не только от значения, но и от асимметрии дифференциальной нелинейности и может приводить к существенной погрешности измерения УВП.

Для проведения входного контроля качества АЦП была предложена методика, в основе которой лежит анализ распределений значений отсчетов, получаемых при преобразовании исследуемым АЦП тестовых сигналов с различными распределениями амплитуд. Разработан метод сравнения получаемых распределений с расчетными, позволяющий определять относительное отклонение частот появления значений в исследуемой совокупности отсчетов от эталонного закона распределения до  $10^{-6}$ . Проведенная оценка показала, что в зависимости от определяемого отклонения необходимый объем выборки составляет  $10^7 \dots 10^{10}$  отсчетов.

Для экспериментальной оценки разработанных методов быстродействующей оптической поляриметрии разработано специальное программное обеспечение для анализа, моделирования и обработки сигналов быстродействующих развертывающих поляриметров. Его структурная схема представлена на рис. 6.

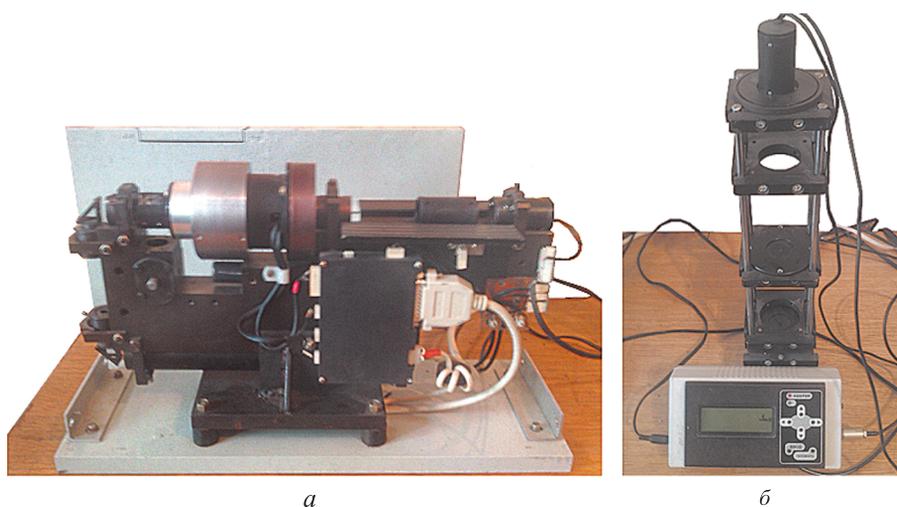


**Рис. 6.** Структурная схема оптической поляриметрии для анализа, моделирования и обработки сигналов быстродействующих развертывающих поляриметров

Сигналы могут быть получены от реальных приборов или с использованием программной реализации модели процесса измерения. При оценке с использованием средств моделирования погрешность вычисления фазового сдвига методом на основе ортогонального алгоритма составила  $0,02^\circ$  при отношении сигнал/шум, равном едини-

це. Время измерения и статистической обработки результатов не превышало 200 с. Суммарно-разностная обработка при таком отношении сигнал/шум была невозможна. Цифровая фильтрация повышает отношение сигнал/шум, что позволяет провести суммарно-разностную обработку сигналов, но требует дополнительных временных затрат.

Для экспериментальной проверки результатов разработан опытно-экспериментальный поляриметрический стенд. В его состав входят два образца развертывающихся поляриметров с двухканальными измерительными трактами, выполненные по различным схемам (рис. 7). Стабильность частоты поляризационной модуляции в образцах обеспечивается специально разработанными приводами и системами автоматической регулировки частоты.



**Рис. 7.** Быстродействующие развертывающиеся поляриметры:

- а* — с источником неполяризованного излучения и вращающимся поляризатором;  
*б* — с вращающимся источником линейно поляризованного излучения

Для используемых в стенде образцов быстродействующих развертывающихся поляриметров использованы две модификации универсальных блоков двухканального поляризационного светоделителя и фотоприемников (рис. 8).

Преобразование сигналов и их ввод в ЭВМ для последующей обработки осуществляется платой сбора данных ЛАн-150-14РСІ компании «Руднев — Шилиев». В ней использован двухканальный синхронный АЦП разрядностью 14 бит с частотой дискретизации до 10 МГц и возможностью синхронного ввода сигнала цифрового опорного тракта.

При экспериментальных исследованиях погрешность вычисления ФС методом на основе ортогонального алгоритма составила 0,02°



а

б

**Рис. 8.** Универсальные блоки двухканального поляризационного анализатора-светоделителя и фотоприемников:

а — с призмой Волластона; б — с призмой Глана — Томпсона

при ослаблении излучения в 200 раз и времени измерения не более 200 с. Применение других методов обработки сигналов приводило к слишком большой погрешности либо требовало неприемлемо большого времени. При исследованиях с использованием образцовых поляриметрических пластинок погрешность вычисления ФС составила  $0,03^\circ$ , а измерения угла вращения плоскости поляризации — не более  $0,04^\circ$  при ослаблении излучения более чем в 200 раз. Полученные значения погрешности измерения УВП и быстродействия в условиях значительного рассеяния и поглощения излучения исследуемой средой сопоставимы с погрешностью измерений и быстродействием наиболее массовых моделей современных следящих поляриметров при отсутствии рассеяния и поглощения излучения. Таким образом, использование развертывающих поляриметров позволяет отказаться от процесса осветления.

Также был разработан стенд для анализа работы и оценки качества АЦП. С его использованием проведены исследования некоторых недорогих быстродействующих преобразователей, показавшие высокие значения и асимметрию их дифференциальной нелинейности, которая может приводить к существенной погрешности измерения.

Некоторые полученные результаты внедрены при разработке и изготовлении прецизионных поляриметров, обеспечивающих измерение УВП с погрешностью измерения  $0,0002^\circ$ . В них используются корреляционные алгоритмы обработки сигналов.

Разработанные и экспериментально апробированные методы обработки сигналов быстродействующих развертывающих поляриметров показали перспективность использования развертывающего принципа измерения УВП для исследований растворов оптически активных веществ с высокими рассеянием и поглощением. Применение фотоприемников с высокой чувствительностью позволит снизить погрешность измерений или проводить измерения при еще большем поглощении и рассеянии излучения. Увеличение частоты модуляции

излучения по азимуту плоскости модуляции обеспечивает повышение быстродействия приборов, а для механических средств модуляции — повышение стабильности частоты модуляции. Использование немеханических методов модуляции дополнительно позволит полностью исключить механические узлы из конструкции поляриметров и тем самым снизить сложность изготовления и обслуживания приборов, уменьшить их габариты и энергопотребление. Метод обработки сигналов быстродействующих развертывающих поляриметров на основе ортогонального алгоритма вычисления ФС дает возможность проведения обработки сигналов параллельно несколькими вычислительными устройствами. Применение для этих целей современных недорогих многоядерных микропроцессоров, ускорителей трехмерной графики или специализированных процессоров обеспечивает высокую точность измерений при работе в режиме реального времени.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Потапов В.М. *Стереохимия*. Москва, Химия, 1988, 464 с.
- [2] Utkin G.I. *Morphological analysis of Azimuth Scanning Polarimeters. Topics in Radioelectronic and Laser System Design*. Boca Raton (Florida, USA), CRS Press, 1992, pp. 208–220.
- [3] Utkin G.I. Compact turbopolarimeter. *SPIE Proceeding*, 2001, vol. 4517, «Lightmetry: Metrology, Spectroscopy and Testing Techniques Using Light», pp. 153–158.
- [4] Уткин Г.И. *Турбополяриметр*. Пат. 2269101 Российская Федерация, МКИ G01J 4/04, № 2004118823/28, заявл. 23.06.2004, опубли. 2006, бюл. № 3.
- [5] Темников Ф.Е. *Теория развертывающих систем*. Москва, Госэнергоиздат, 1963, 168 с.
- [6] Мартынов А.С., Уткин Г.И. Анализ двухканального измерительного тракта развертывающих поляриметров. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2012. Спец. выпуск «Современные оптические системы», с. 39.
- [7] Чмых М.К. *Цифровая фазометрия*. Москва, Радио и связь, 1993, 184 с.
- [8] 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.
- [9] Алехнович В.И., Мартынов А.С., Перчик А.В., Уткин Г.И. Оценка влияния параметров АЦП на статистические характеристики сигнала моделируемого оптико-электронного тракта. *Измерительная техника*, 2007, № 8, с. 12–15.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Мартынов А.С., Уткин Г.И. Быстродействующие поляриметры для биохимических применений. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/909.html>

**Уткин Геннадий Иванович** родился в 1949 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, лауреат премии Ленинского комсомола в области науки и техники 1981 г., научный руководи-

тель отраслевой лаборатории «Оптическая поляриметрия» РАН, член Комиссии РАН по работе с молодежью. Автор более 100 опубликованных научных работ и 22 изобретений в области оптической поляриметрии и оптического научного приборостроения. e-mail: utkin@bmstu.ru

**Мартынов Александр Сергеевич** родился в 1981 г. Научный сотрудник отраслевой лаборатории «Оптическая поляриметрия» РАН. Автор 10 опубликованных научных работ в области оптической поляриметрии и оптического научного приборостроения.