

Мартынов Александр Сергеевич

**Быстродействующие оптико-электронные
развертывающие поляриметры**

05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Маг-

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель: Уткин Геннадий Иванович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Ищенко Евгений Федорович,
доктор технических наук,
профессор кафедры физики,
Московский энергетический институт

Поспехов Вячеслав Георгиевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры оптико-электронных проборов
научных исследований, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ведущая организация: Научно-технологический центр
уникального приборостроения
Российской академии наук, г. Москва

Защита диссертации состоится « 13 » марта 2013 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5 стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Моск Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому диссертационного совета Д 212.141.19

Автореферат разослан «30» января 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Бурый Е.В.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Область исследований и актуальность работы. Поляриметрия широко используется в аналитической химии – для идентификации и количественного анализа оптически активных веществ, в фармацевтике – при производстве таких веществ, как камфара, кокаин, никотин и др., в медицине – при биохимических исследованиях содержания белка, глюкозы и сахарозы, в биохимии – при титровании и проведении контроля хроматографического разделения оптически активных веществ. Большая практическая ценность метода заключается в его высокой точности (наибольшей из известных методов определения концентрации растворов), что дает возможность проведения анализа при малых количествах образцов. Например, в современных приборах в 0,1 мм³ раствора можно идентифицировать $2,5 \cdot 10^{-9}$ г глюкозы.

Исследуемые растворы органические оптически активных веществ могут содержать органические и биологические примеси, приводящие к рассеянию и поглощению излучения, что затрудняет или делает невозможным применение поляриметров. Удаление примесей из растворов – осветление – может приводить к осаждению части активного вещества. Для осветления применяются соли тяжелых металлов, например, ацетат свинца. Эти вещества опасны для человека и окружающей среды, что ограничивает использование поляриметров условиями лабораторий, снижая удобство и оперативность их широкого применения в производственной практике. Осветление затруднено или невозможно при определении изменения концентрации во времени – при прослеживании кинетики биохимических реакций (например, энзимного расщепления) или для измерений «в потоке» на производстве. Определение оптической активности сильно рассеивающих и поглощающих сред позволит отказаться от процесса осветления, тем самым значительно повысив оперативность инструментального лабораторного анализа и расширив сферу применения оптической поляриметрии.

Впервые быстродействующие сканирующие поляриметры (турбополяриметры) и принципы их построения были предложены в работах Г.И. Уткина на основе информационной концепции развертывающих измерительных систем, созданной Ф.Е. Темниковым. Методы расчета анизотропных оптических трактов поляриметров рассмотрены в работах Ищенко Е.Ф., Уткина Г.И. и других авторов. Применению фазовых дифференциальных методов измерения угла вращения плоскости поляризации в поляриметрах посвящены публикации научного коллектива ВНИИОФИ, создавшего государственный первичный эталон единицы угла вращения плоскости поляризации. Однако в указанных работах не рассматривалось влияние значительного рассеяния и поглощения излучения исследуемой среды на погрешность измерений.

По этим причинам в настоящее время актуальна задача создания быстродействующих развертывающих поляриметров для анализа оптической активности сред с высокими рассеянием и поглощением.

Цель и задачи работы. Целью работы является обоснование принципов построения и создание методов обработки сигналов быстродействующих

развертывающих поляриметров для исследования кинетики реакций в биохимических средах с высокими оптическими рассеянием и поглощением. Для этого были поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ принципов построения структурных и оптических схем быстродействующих оптико-электронных поляриметров. Сравнение быстродействия и метрологических характеристик поляриметров, реализующих развертывающий и следящий принципы измерения.
2. Создание комплексной математической модели процесса измерения угла вращения плоскости поляризации быстродействующими развертывающими поляриметрами.
3. Анализ шумов и мультипликативных помех источников излучения, используемых в поляриметрах. Разработка методов снижения их влияния на погрешность измерения угла вращения плоскости поляризации.
4. Исследование влияния деполяризации излучения исследуемой средой на уровень помех в измерительных сигналах развертывающих поляриметров.
5. Разработка и исследование методов помехоустойчивой обработки сигналов быстродействующих развертывающих поляриметров.
6. Анализ влияния на погрешность измерений угла вращения плоскости поляризации быстродействующими развертывающими поляриметрами дифференциальной нелинейности аналого-цифрового преобразования.
7. Создание аппаратного комплекса для экспериментальной оценки параметров разработанных методов быстродействующей оптической поляриметрии.

Научная новизна результатов.

1. Разработана математическая модель процесса измерения угла вращения плоскости поляризации с учетом рассеяния и поглощения излучения исследуемой средой, позволяющая проводить оценку влияния параметров основных элементов оптико-электронного тракта развертывающих поляриметров на погрешность результатов измерений.
2. Разработан метод двухканального поляризационного подавления мультипликативных помех источника излучения в развертывающих поляриметрах, обеспечивающий снижение погрешности измерений угла вращения плоскости поляризации.
3. Разработан метод обработки сигналов развертывающих поляриметров на основе ортогонального алгоритма вычисления фазового сдвига, обеспечивающий малую погрешность измерений угла вращения плоскости поляризации и высокое быстродействие приборов при наличии помех в условиях значительного рассеяния и поглощения излучения исследуемой средой.
4. Оценено влияние дифференциальной нелинейности аналого-цифрового преобразования на величину погрешности измерений угла вращения плоскости поляризации быстродействующими развертывающими поляриметрами.

Практическая ценность работы.

1. Разработанные и экспериментально апробированные методы обработки информационных сигналов развертывающих поляриметров позволяют создавать быстродействующие поляриметры, обеспечивающие малую

погрешность измерения угла вращения плоскости поляризации в средах со значительными рассеянием и поглощением излучения.

2. Созданное программное обеспечение позволяет оценивать влияние параметров основных элементов оптико-электронного тракта на погрешность измерений угла вращения плоскости поляризации при проектировании быстродействующих развертывающих поляриметров.

3. Разработанная методика оценки качества компонентов аналого-цифрового тракта позволяет обеспечить их входной контроль при изготовлении прецизионных быстродействующих развертывающих поляриметров.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы были внедрены в ФГНУ «ГНИИЦНП при МГТУ им. Н.Э. Баумана» при разработке и производстве прецизионных поляриметров в рамках научно-технических программ Российской академии наук, что подтверждено соответствующими актами. Материалы диссертации используются в учебном процессе кафедры оптико-электронных проборов научных исследований МГТУ им. Н.Э. Баумана в курсе «Спектральные и поляризационные приборы».

Положения, выносимые на защиту.

1. Созданная математическая модель процесса измерения угла вращения плоскости поляризации развертывающими поляриметрами позволяет определить характер и уровень помех, вносимых в измерительные сигналы основными элементами оптико-электронного тракта с учетом рассеяния и поглощения излучения исследуемой средой, а так же оценить достижимую точность измерений.

2. Применение разработанного метода двухканального поляризационного подавления мультипликативных помех в информационных сигналах быстродействующих развертывающих поляриметров позволяет в несколько раз снизить погрешность измерений, вызванную флуктуациями интенсивности и состояния поляризации излучения источника.

3. Разработанный на основе ортогонального алгоритма вычисления фазового сдвига метод обработки сигналов развертывающих поляриметров обеспечивает малую погрешность измерения угла вращения плоскости поляризации и высокое быстродействие приборов при наличии помех в условиях значительного рассеяния и поглощения излучения исследуемой средой.

4. Предложенная математическая модель аналого-цифровой обработки сигналов быстродействующих развертывающих поляриметров позволяет учитывать влияние дифференциальной нелинейности преобразования на погрешность измерения угла вращения плоскости поляризации.

Апробация работы. Основные результаты работы выносились на обсуждение на международных научно-практических конференциях «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabView и технологии National Instruments», г. Москва, 2005 и 2006 гг., «Прикладная оптика», г. Санкт-Петербург, 2006 г., «Поляризационная оптика», г. Москва, 2008 и 2010 гг. По теме диссертации опубликованы 5 статей в научных журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК, и 5 тезисов докладов на международных научно-технических конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Она изложена на 120 листах машинописного текста, включает 77 рисунков и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложены цель и задачи диссертационной работы, обоснована ее актуальность, научная новизна и практическая ценность, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен сравнительный анализ принципов построения оптико-электронных поляриметров. Определены основные факторы, ограничивающие быстродействие и погрешность измерений поляриметров следящего типа: шумы и мультипликативные помехи источника излучения, низкий уровень сигнала в момент компенсации, быстродействие и погрешность электромеханического следящего контура и угломерного устройства. Показано, что использование развертывающего принципа измерения угла вращения плоскости поляризации (УВПП) предпочтительно при разработке быстродействующих оптико-электронных поляриметров, так как он позволяет обеспечить их высокое быстродействие и значительно упростить конструкцию приборов за счет исключения прецизионных элементов петли обратной связи.

Для описания принципа измерения УВПП и разработки математической модели процесса измерения УВПП были рассмотрены две функциональные схемы развертывающих поляриметров с двухканальными поляризационными трактами. В первой схеме (рисунок 1) неполяризованное излучение источника излучения проходит через равномерно вращающийся поляризатор, становясь линейно поляризованным и модулированным по азимуту плоскости поляризации, затем через исследуемую среду, приобретая дополнительный поворот плоскости поляризации, и двухканальный поляризационный анализатор-светоделитель, выделяющий ортогонально поляризованные составляющие излучения, интенсивность которых регистрируется фотоприемниками.

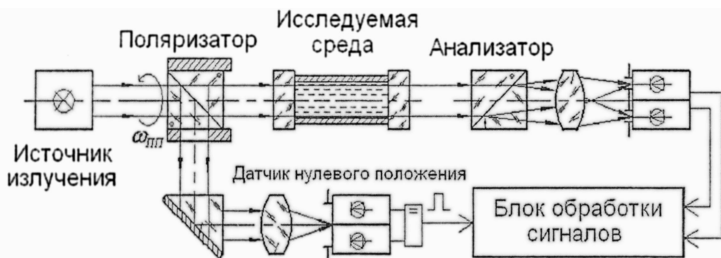


Рисунок 1. Функциональная схема развертывающего поляриметра с источником неполяризованного излучения и вращающимся поляризатором

Во второй схеме (рисунок 2) для осуществления поляризационной модуляции применен источник линейно поляризованного излучения, вращающийся вокруг своей оси. В дальнейшем излучение так же проходит

через исследуемую среду и двухканальный анализатор.

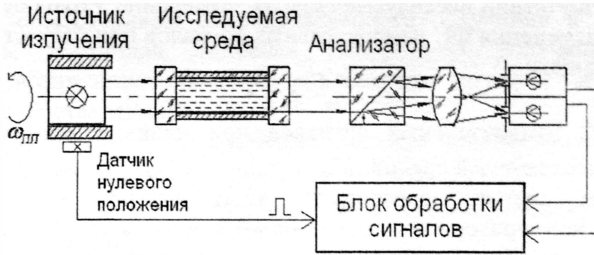


Рисунок 2. Функциональная схема развертывающего поляриметра с вращающимся источником линейно поляризованного излучения

Для определения нулевого положения плоскости поляризации и частоты поляризационной модуляции излучения предназначен опорный тракт. В рассмотренных реализациях опорный сигнал представляет собой последовательность импульсов, формируемых электронной схемой при прохождении вращающимся элементом нулевого положения.

Для описания состояния поляризации излучения и его преобразования анизотропными элементами оптического тракта был использован матричный метод на основе векторов Стокса и матриц Мюллера. Вектор Стокса для излучения на входе исследуемой среды выглядит следующим образом:

$$S_{\text{иг}} = I_{\text{ист}} \tau_{\text{пм}} \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(2\theta) \\ \sin(2\theta) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $I_{\text{ист}}$ – интенсивность излучения источника, $\tau_{\text{пм}}$ – коэффициент пропускания элемента, осуществляющего поляризационную модуляцию излучения, $\theta = \theta(t) = \omega_{\text{пл}} t$, $\omega_{\text{пл}}$ – угловая частота поляризационной модуляции. На основании известных матриц Мюллера для оптически-активной исследуемой среды и поляризационного светоделителя определяются матрицы Мюллера $M_{\text{ит},2}$ двухканального поляриметрического тракта:

$$M_{\text{ит},2} = M_{\text{а1,2}} \cdot M_{\text{ср}} = \frac{1}{2} \tau_{\text{ср}} \begin{bmatrix} 1 & \pm(1 - \mu_{\text{ср}}) \cos(2\alpha) & \pm(1 - \mu_{\text{ср}}) \sin(2\alpha) & 0 \\ \pm 1 & (1 - \mu_{\text{ср}}) \cos(2\alpha) & (1 - \mu_{\text{ср}}) \sin(2\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $M_{\text{а1,2}}, M_{\text{ср}}$ – матрицы Мюллера для каждого из каналов поляризационного двухканального анализатора и исследуемой среды соответственно, $\tau_{\text{ср}}$ и $\mu_{\text{ср}}$ – коэффициенты пропускания и деполаризации среды соответственно, α – УВПП исследуемой средой.

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

$$I_{\text{а1,2}} = 0,5 \cdot \tau_{\text{пм}} \cdot \tau_{\text{ср}} \cdot I_{\text{ист}} \cdot (1 \pm (1 - \mu_{\text{ср}}) \cos(2\theta - 2\alpha + \varphi_0)), \quad (3)$$

где φ_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:

$$2\alpha = \varphi_0 - \varphi_\alpha, \quad (4)$$

где φ_α – ФС измерительных сигналов при наличии поворота плоскости поляризации исследуемой средой.

Проведена оценка погрешности используемого в развертывающих поляриметрах компараторного метода, основанного на вычислении отношения интервала времени между поступлением сигнала опорного тракта и моментом равенства измерительных сигналов t_φ к интервалу времени между двумя последовательными импульсами опорного сигнала $T_{изм}$:

$$\varphi_{изм} = 720 \cdot t_\varphi / T_{изм}, \quad (5)$$

где $\varphi_{изм}$ – ФС сигналов, угл. градусы. Погрешность измерения моментов начала и окончания измеряемых периодов приводит к погрешности измерения ФС, максимальное значение которой можно оценить как

$$\Delta\varphi = 1440 \cdot \Delta t / T_{изм}, \quad (6)$$

где $\Delta\varphi$, Δt – максимальные погрешности измерения ФС и определения моментов времени соответственно. Наличие в измерительных сигналах аддитивной шумовой составляющей с дисперсией $\sigma_{ш}^2$ приводит к ошибке определения момента их равенства, совпадающего с моментом равенства нулю их разности. Ее можно описать гармоническим колебанием без постоянной составляющей. Для аддитивной смеси гармонического сигнала $S(t) = A \cos(2\pi\omega_0 t)$ и нормально распределенного шума $\eta(t)$ с дисперсией σ_η^2 момент равенства нулю может наступить раньше на время Δt . Вероятность этого события $P(\Delta t_\varphi)$ равна вероятности того, что в момент времени $t_\varphi = t_0 - \Delta t$ (t_0 – момент равенства сигнала нулю при отсутствии шума) величина шумовой составляющей не меньше величины сигнала и имеет противоположный знак:

$$P(\Delta t_\varphi) = \int_{-\infty}^{-S(t_0 - \Delta t)} p_\eta(s) ds \text{ при } S(t) > 0; P(\Delta t_\varphi) = \int_{-S(t_0 - \Delta t)}^{\infty} p_\eta(s) ds \text{ при } S(t) < 0, \quad (7)$$

где $p_\eta(s)$ – плотность распределения амплитуды шумовой составляющей. Для вычисления ФС с погрешностью не более $0,01^\circ$ требуется отношение сигнал/шум $q = A/\sigma_\eta \geq 10^4$. Для разности сигналов при идентичных характеристиках каналов электронного тракта $\sigma_\eta = \sqrt{2}\sigma_{ш}$ и $A = \tau_{пм} I_{ист}$.

Проведен анализ помех, вносимых в измерительные сигналы развертывающих поляриметров источником и приемниками излучения, а также влияния на уровень этих помех деполяризации и ослабления излучения исследуемой средой. Модуляция $v_{ист}(t)$ и флуктуация $\Delta I_{ист}(t)$ интенсивности излучения источника вызывают модуляцию измерительных сигналов:

$$I_{A1,2} = 0,5 \cdot \tau_{\text{ПМ}} \cdot [V_{\text{ИСТ}}(t) \cdot I_{\text{ИСТ},0} + \Delta I_{\text{ИСТ}}(t)] \cdot (1 \pm \cos(2\theta - 2\alpha)). \quad (8)$$

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

$$I_{A1,2} = 0,25 I_{\text{ИСТ}} \cdot (1 \pm \cos(2\theta - 2\alpha) \pm 0,5 \cos(4\theta - 2\alpha) \cdot \delta Q \pm 0,5 \sin(4\theta - 2\alpha) \cdot \delta U + \cos(2\theta) \cdot \delta Q + \sin(2\theta) \cdot \delta U \pm 0,5 \cos(2\alpha) \cdot \delta Q \pm 0,5 \sin(2\alpha) \cdot \delta U), \quad (9)$$

где δQ и δU – отклонения величин 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:

$$I_{A1,2} = 0,5 \cdot \tau_{\text{ПМ}} \cdot I_{\text{ИСТ}} \cdot [1 \pm (1 - \delta Q) \cdot \cos(2\theta - 2\alpha)]. \quad (10)$$

Фотоприемники вносят в измерительные сигналы аддитивные шумовые составляющие:

$$I_{A1,2} = 0,5 \cdot \tau_{\text{ПМ}} \cdot \tau_{\text{СР}} \cdot I_{\text{ИСТ}} \cdot (1 \pm \mu_{\text{СР}} \cos(2\theta - 2\alpha)) + I_{\text{ПШ1,2}}, \quad (11)$$

где $I_{\text{ПШ1,2}}$ – эквивалентная интенсивность шумов фотоприемника, $I_{\text{ПШ}} = i_{\text{ПШ}} / S_{\text{П}}$, $i_{\text{ПШ}}$ и $S_{\text{П}}$ – 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 $\tau_{\text{СР}} \cdot \mu_{\text{СР}}$. При высоких оптических рассеянии и поглощении излучения возможно снижение отношения сигнал/шум до значений, близких к 1.

Во второй главе описаны разработанные методы обработки сигналов быстродействующих развертывающих поляриметров.

В основе метода двухканального поляризационного подавления мультипликативных помех, вызванных флуктуациями интенсивности излучения источника, лежит суммарно-разностная обработка измерительных сигналов:

$$S_{\Sigma\Delta} = \frac{I_{A1} - I_{A2}}{I_{A1} + I_{A2}} = \mu_{\text{СР}} \cos(2\theta - 2\alpha). \quad (12)$$

В получаемом суммарно-разностном сигнале также снижается уровень аддитивных составляющих, обусловленных флуктуациями состояния поляризации излучения источника. Вместе с тем, в таком сигнале может происходить увеличение уровня флуктуаций, вызванных шумами фотоприемников:

$$S_{\Sigma\Delta} = \frac{\mu_{\text{СР}} \cdot \tau_{\text{СР}} \cdot \cos(2\theta - 2\alpha) + \eta_{\text{ПШ1}}(t) - \eta_{\text{ПШ2}}(t)}{\tau_{\text{СР}} + \eta_{\text{ПШ1}}(t) + \eta_{\text{ПШ2}}(t)}, \quad (13)$$

где $\eta_{\text{ПШ1,2}}(t) = I_{\text{ПШ1,2}} / \tau_{\text{ПМ}} I_{\text{ИСТ},0}$.

Для обеспечения измерений УВП развертывающими поляриметрами в условиях значительного рассеяния и поглощения излучения средой проведен

анализ алгоритмов вычисления ФС, способных работать при $q=1$.

В основе корреляционного алгоритма лежит связь между функцией взаимной корреляции $K(\tau)$ двух гармонических сигналов и их ФС φ :

$$K(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T S_{изм}(t) \cdot S_{оп}(t - \tau) dt = \frac{1}{2} A_{изм} \cdot A_{оп} \cdot \cos(\omega\tau + \varphi), \quad (14)$$

где T – время измерения, $A_{изм}$ и $A_{оп}$ – амплитуды измерительного и опорного сигнала соответственно, ω – их частота. Тогда ФС определяется как

$$\varphi = \arccos(2 \cdot K(0) / A_{изм} \cdot A_{оп}). \quad (15)$$

Амплитуды сигналов могут быть определены через их дисперсию:

$$D_{изм} = \frac{1}{T} \int_0^T [S_{изм}(t)]^2 dt = \frac{1}{2} A_{изм}^2, \quad D_{оп} = \frac{1}{T} \int_0^T [S_{оп}(t)]^2 dt = \frac{1}{2} A_{оп}^2. \quad (16)$$

Наличие в измерительном сигнале аддитивной шумовой составляющей $\eta(t)$ со среднеквадратичным отклонением σ_η приводит к ошибке вычисления его дисперсии и систематической погрешности $\Delta\varphi$ определения ФС:

$$\varphi_{изм} = \varphi + \Delta\varphi = \arccos(\cos(\varphi) / \sqrt{1 + 2/q^2}), \quad (17)$$

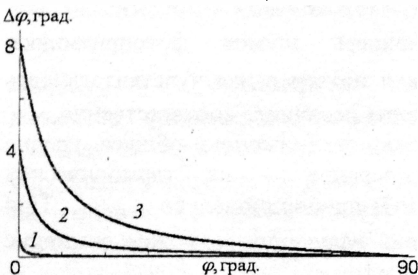


Рисунок 3. Погрешность вычисления ФС при использовании метода обработки на основе корреляционного алгоритма:

1 – $q=100$; 2 – $q=20$; 3 – $q=10$

где φ – реальный ФС сигналов, $q = A_{изм} / \sigma_\eta$ – отношение сигнал/шум. Зависимость $\Delta\varphi$ от ФС при различных q приведена на рисунке 3. Величина погрешности практически линейно зависит от отношения сигнал/шум, максимальна при ФС 0° и 180° и не может быть снижена путем применения методов статистической обработки результатов.

В основе компенсационного алгоритма лежит поиск минимума функции взаимной корреляции сигналов, что соответствует ФС в 90° и нулевой погрешности его вычисления. Недостатком этого алгоритма является значительная ресурсоемкость.

Ортогональный алгоритм вычисления ФС основан на вычислении отношения функций взаимной корреляции измерительного и опорных гармонических ортогональных сигналов:

$$\varphi = \arctg \left(\frac{\int_0^T S_{изм}(t) \cdot \sin(\omega t) dt}{\int_0^T S_{изм}(t) \cdot \cos(\omega t) dt} \right). \quad (18)$$

Дисперсия погрешности вычисления ФС этим алгоритмом определяется как

$$\sigma_\varphi = \sqrt{S_0 / A_{изм}^2 T}, \quad (19)$$

где S_0 – спектральная плотность шумовой составляющей. Проведенное моделирование показало, что величина погрешности не превышает несколько сотых градуса при отношении сигнал/шум, равном единице (рисунок 4).

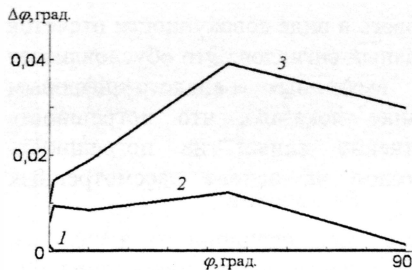


Рисунок 4. Погрешность вычисления ФС при использовании метода обработки на основе ортогонального алгоритма:

1 – $q=100$; 2 – $q=10$; 3 – $q=1$

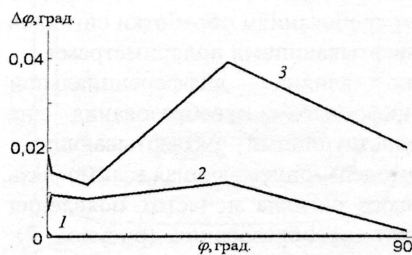


Рисунок 5. Погрешность вычисления ФС при использовании метода обработки на основе Фурье-алгоритма:

1 – $q=100$; 2 – $q=10$; 3 – $q=1$

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 (рисунок 6).

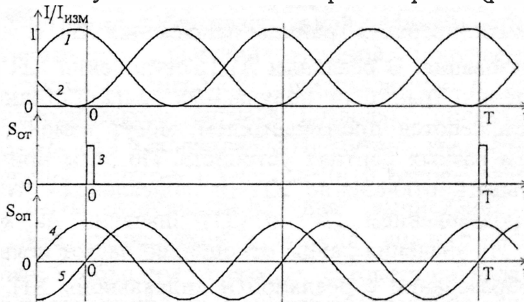


Рисунок 6. Определение частоты опорных гармонических сигналов и времени измерения: 1,2 – измерительные сигналы; 3 – сигнал опорного тракта; 4,5 – опорные гармонические сигналы; $I_{изм} = \tau_{пм} \cdot I_{ист}$

Алгоритм вычисления ФС на основе преобразования Фурье (Фурье-алгоритм) включает в себя следующие операции: вычисление частотных спектров измерительного и опорного сигналов, полосовая фильтрация обоих спектров с выделением первой гармоники и обратное преобразование Фурье, перемножение восстановленных комплексно-сопряженного опорного и измерительного сигналов и вычисление аргумента полученного комплексного сигнала. Проведенное моделирование показало высокую устойчивость данного алгоритма к наличию шумов в измерительном сигнале (рисунок 5). Его недостатком является высокая ресурсоемкость.

Также был рассмотрен алгоритм с усреднением, являющийся модификацией корреляционного алгоритма. В нем амплитуды сигналов, для которых вычисляется ФС, вычисляются путем усреднения модулей их значений. Моделирование показало, что данный алгоритм обладает низкой помехоустойчивостью.

Для рассмотренных алгоритмов

Опорные сигналы предложено формировать в виде совокупности отсчетов в моменты времен дискретизации измерительных сигналов. Это обуславливает отсутствие шумов, в том числе вызванных аналого-цифровым преобразованием. Проведенное исследование показало, что погрешность определения периода измерения существенно влияет на погрешность вычисления ФС при использовании методов на основе рассмотренных алгоритмов и не должна превышать $10^{-3} \%$.

При использовании методов на основе компенсационного алгоритма, ортогонального алгоритма и Фурье-алгоритма погрешность вычисления ФС составляет несколько сотых долей градуса при отношении сигнал/шум, равному несколько единиц, что делает возможным применение этих методов для обработки сигналов развертывающих поляриметров в условиях значительного рассеяния и поглощения излучения исследуемой средой. Ортогональный алгоритм обладает наименьшей ресурсоемкостью и метод на его основе наилучшим образом удовлетворяет требованиям обработки сигналов при высокоскоростных измерений УВП развертывающими поляриметрами.

В третьей главе работы оценено влияние дифференциальной нелинейности характеристики аналого-цифрового преобразования на погрешность измерения УВП быстродействующими развертывающими поляриметрами. Для этого была разработана модель, описывающая взаимосвязь плотности вероятности амплитуды аналогового сигнала и частот появления значений отсчетов, получаемых в результате преобразования (рисунок 7). Вероятность появления отсчета со значением i определяется как

$$p_i = \int_{U_{i-1}}^{U_i} p_U(U) dU, \quad (20)$$

где $p_U(U)$ – плотность вероятности амплитуды аналогового сигнала, U_{i-1} и U_i – верхние границы диапазонов напряжений для $i-1$ и i -го значения. При «идеальной» характеристике преобразования (ХП) шаг квантования $h_i = U_i - U_{i-1} = \text{const}$ для всех значений и границы диапазонов напряжений могут быть определены следующим образом:

$$U_i = i \cdot h = i \cdot (U_{\max} - U_{\min}) / 2^b, \quad (21)$$

где $U_{\min}$, $U_{\max}$ – нижняя и верхняя границы напряжения ХП, b – число разрядов устройства преобразования. В реальных АЦП отклонения ХП от «идеальной» приводят к отклонению границ от получаемых по (21). Точные их значения обычно не предоставляются производителем, могут изменяться в пределах одной партии или в разных партиях устройств. По этим причинам в модели предлагается учитывать отклонение ХП от «идеальной» путем умножения получаемых с использованием (20) и (21) значений на корректирующие коэффициенты δp_i . Их значения равны отношению частот появления значений отсчетов при преобразовании с реальной и «идеальной» ХП. Использование данной модели позволяет упростить вычисления, при этом относительная погрешность определения частот появления значений отсчетов не более 6%.

Сигналы развертывающих поляриметров представляют собой аддитивную



Рисунок 7. Влияние дифференциальной нелинейности на распределение значений отсчетов при преобразовании гармонического сигнала: 1, 2 – частоты появления значений отсчетов при «идеальной» ХП и ХП с дифференциальной нелинейностью

поляриметров с учетом их дифференциальной нелинейности. Она заключается в анализе распределения значений отсчетов, получаемых в результате преобразования тестовых сигналов. Использование в качестве тестового треугольного периодического сигнала позволяет оценить отклонение ХП исследуемого АЦП от идеальной ХП путем сравнения распределения получаемых значений отсчетов с равномерным распределением. Полученные данные могут быть использованы для вычисления корректирующих коэффициентов δp_i в разработанной модели аналого-цифровой обработки сигналов. При этом необходим генератор тестового сигнала с малым уровнем искажений и собственных шумов, а так же обеспечение точного согласования его параметров с входными характеристиками исследуемого АЦП. Анализ преобразования исследуемым АЦП случайных сигналов позволяет проводить оценку его влияния на погрешность результатов, получаемых с использованием

смесь гармонической и шумовой составляющих. Для проведения оценок с использованием описанной модели необходимы основные статистические характеристики таких сигналов – функции распределения и плотности распределения амплитуд. Была разработана методика определения данных параметров для детерминированных сигналов и получены результаты для некоторых из них – периодического треугольного и гармонического.

При обработке сигналов быстродействующих развертывающих поляриметров широко применяются алгоритмы статистического анализа: нахождение математического ожидания, дисперсии, функций взаимной корреляции и автокорреляции. Проведенная оценка показала, что асимметрия дифференциальной нелинейности приводит к погрешности результатов, получаемых с использованием этих алгоритмов. Относительная погрешность может достигать 1,5%, приводя к существенным ошибкам измерения УВПП.

Была разработана методика, позволяющая оценить возможность применения АЦП в составе быстродействующих развертывающих

статистических алгоритмов обработки. Использование гармонического сигнала или его аддитивной смеси с шумовой составляющей, моделирующих сигнал измерительного тракта быстродействующих развертывающих поляриметров, позволяет оценивать влияние исследуемого АЦП на погрешность измерений УВПП.

Анализ распределений значений получаемых в результате аналого-цифрового преобразования отсчетов возможен с использованием как визуальных, так и численных методов. Был разработан метод, позволяющий оценить отклонение частот появления значений получаемых при преобразовании отсчетов от заданного закона распределения. Он заключается в сравнении моментов, вычисляемых для исследуемой совокупности отсчетов, с моментами, рассчитанными для эталонного распределения. Для вычисления моментов исследуемой совокупности отсчетов был разработан алгоритм с накоплением, применение которого значительно повышает скорость обработки. Данный метод позволяет определять относительное отклонение частот появления значений в исследуемой совокупности отсчетов от эталонного закона распределения до 10^{-6} . Проведенная оценка показала, что в зависимости от величины определяемого отклонения необходимый объем выборки составляет от 10^7 до 10^{10} отсчетов.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальной оценки разработанных методов быстродействующей оптической поляриметрии. Было создано специальное программное обеспечение для анализа, моделирования и обработки сигналов быстродействующих развертывающих поляриметров, структурная схема которого показана на рисунке 8.

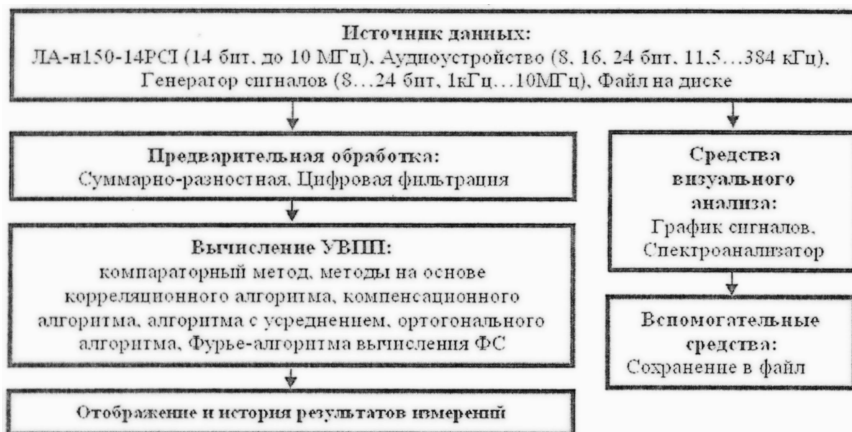


Рисунок 8. Структурная схема специального программного обеспечения для анализа, моделирования и обработки сигналов развертывающего поляриметра

В его состав входят программные реализации методов вычисления УВПП на основе рассмотренных алгоритмов определения ФС измерительных сигналов для их сравнительного анализа. Сигналы могут быть получены как от

реальных приборов, так и с использованием программной реализации разработанной комплексной математической модели процесса измерения УВП, включающей процедуру аналого-цифрового преобразования. При этом могут быть применены реализованные методы двухканального поляризационного подавления помех и цифровой фильтрации. Помимо этого, в его состав включены средства статистической обработки результатов и визуального анализа сигналов.

С применением средств моделирования была выполнена оценка погрешности, вносимой процедурой аналого-цифрового преобразования в результаты измерений с применением реализованных методов обработки сигналов. Определены основные параметры процедуры преобразования, при которых вносимая ей погрешность не играет существенной роли.

Было проведена оценка погрешности результатов, получаемых с применением реализованных методов обработки сигналов при малых отношениях сигнал/шум (рисунок 9).

$S(n)$

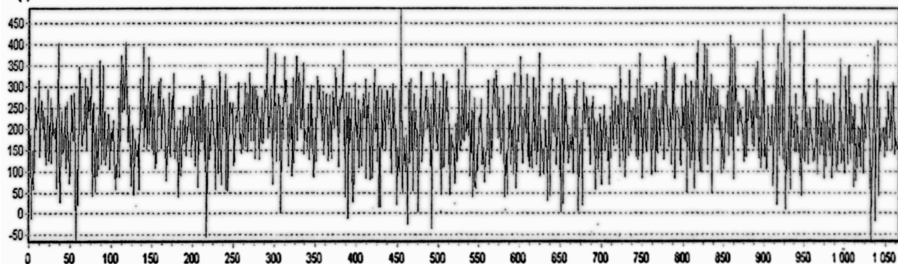


Рисунок 9. Пример получаемых значений отсчетов сигнала развертывающего поляриметра, получаемого при моделировании. Отношение сигнал/шум задано равным 1

При отношениях сигнал/шум, близких к единице, обработка сигналов возможна только с использованием методов на основе компенсационного и ортогонального алгоритмов. При этом погрешность вычисления ФС составляет $0,02^\circ$, для чего требуется статистическая обработка не менее $2,5 \cdot 10^3$ результатов. При использовании метода на основе ортогонального алгоритма время измерения не превышало 200с. При указанных условиях часто возникают моменты, когда сумма измерительных сигналов равна нулю, из-за чего использование суммарно-разностной обработки затруднено. Применение цифровой фильтрации позволило повысить отношение сигнал/шум, что дало возможность использования суммарно-разностной обработки, но потребовало дополнительных временных затрат и не позволило существенно снизить погрешность измерений.

Был создан опытно-экспериментальный поляриметрический стенд, в состав которого входят два образца развертывающих поляриметров, созданных на основе рассмотренных функциональных схем (рисунок 10). Для аналого-цифрового преобразования сигналов был применен двухканальный синхронный АЦП разрядностью 14 бит и частотой дискретизации до 10 МГц.

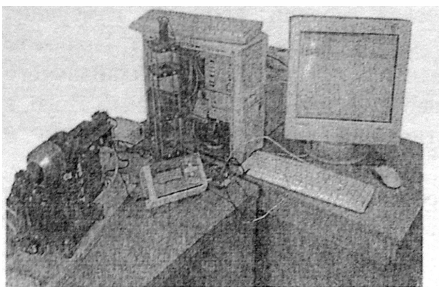


Рисунок 10. Опытно-экспериментальный поляриметрический стенд

С использованием стенда была проведена оценка погрешности измерений достигаемой при использовании реализованных методов вычисления УВПП в условиях значительного ослабления излучения исследуемой средой. При ослаблении излучения около 200 раз погрешность вычисления ФС с использованием метода на основе ортогонального алгоритма не превышала $0,02^\circ$ а время измерения 200 с. Применение методов на основе корреляционного алгоритма и алгоритма с усреднением приводило к большой

величине ошибки а методов на основе компенсационного алгоритма и Фурье алгоритма требовало неприемлемо большого времени вычислений.

При исследованиях с использованием образцовых поляриметрических пластинок погрешность вычисления ФС с применением метода на основе ортогонального алгоритма составила $0,03^\circ$ и измерения УВПП $0,04^\circ$ при ослаблении излучения более 200 раз. Полученные результаты экспериментальных исследований показали применимость разработанных методов быстродействующей оптической поляриметрии для анализа оптической активности сред со значительными рассеянием и поглощением излучения а их согласованность с результатами моделирования подтверждает адекватность созданной модели.

На основе разработанной методики оценки качества АЦП был создан стенд для анализа их работы в условиях реальных сигналов (рисунок 11). В его состав входит набор источников для формирования тестовых сигналов: периодического, треугольного, случайного с нормальным распределением, гармонического а так же модули сопряжения с ЭВМ.

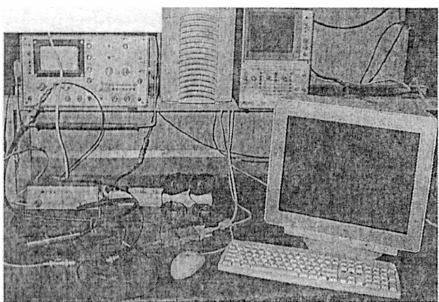
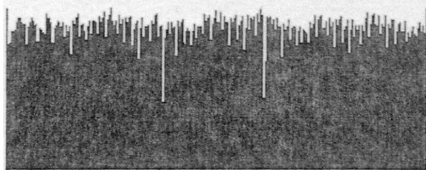


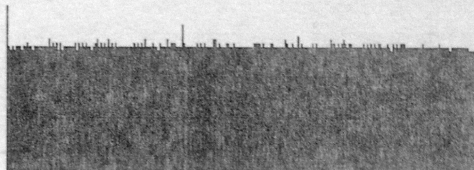
Рисунок 11. Экспериментальный стенд для анализа работы и качества АЦП

Было создано программное обеспечение для визуального и численного анализа данных. С использованием стенда и разработанной методики был произведен анализ некоторых быстродействующих АЦП, показавший значительную величину и асимметрию их дифференциальной нелинейности (рисунок 12). Применение таких АЦП в составе быстродействующих развертывающих поляриметров может

приводить к существенной погрешности измерения УВПП.



а)



б)

Рисунок 12 Примеры гистограмм распределения значений при преобразовании периодического треугольного сигнала двумя различными АЦП
В заключении приведены основные результаты диссертационной работы

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате работы была решена актуальная научно-техническая задача обоснованы принципы построения и созданы методы обработки сигналов быстродействующих развертывающих поляриметров для исследования кинетики реакций в биохимических средах с высокими оптическими рассеянием и поглощением

Основные результаты работы заключаются в следующем

- 1 Разработана и программно реализована математическая модель процесса измерения УВПП развертывающими поляриметрами позволяющая определять уровень и характер помех вносимых в измерительные сигналы основными элементами оптико-электронного тракта с учетом рассеяния и поглощения излучения исследуемой средой что необходимо для оценки достижимой точности измерений
- 2 Разработан и экспериментально апробирован метод обработки информационных сигналов быстродействующих развертывающих поляриметров обеспечивающий малую погрешность и высокое быстродействие при измерении УВПП в условиях значительного рассеяния и поглощения излучения исследуемой средой
- 3 Разработан метод двухканального поляризационного подавления мультипликативных помех информационных сигналов развертывающих поляриметров, вызванных флуктуациями интенсивности и состояния поляризации излучения источника, позволяющий значительно снизить погрешность измерений УВПП
- 4 Проведена оценка влияния дифференциальной нелинейности характеристики аналого-цифрового преобразования на погрешность измерений УВПП быстродействующими развертывающими поляриметрами На основе предложенного метода оценки отклонения распределения значений получаемых в результате аналого-цифрового преобразования отсчетов от эталонного распределения была разработана методика проведения входного контроля компонентов аналого-цифрового тракта с учетом дифференциальной нелинейности их характеристики преобразования при изготовлении прецизионных быстродействующих развертывающих поляриметров
- 5 Проведено практическое внедрение результатов исследований в ФГНУ «ГНИИЦНП при МГТУ им. Н.Э. Баумана» при разработке и изготовлении

прецизионных поляриметров в рамках научно-технических программ РАН и используемых в практических работах институтов РАН.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Мартынов А.С., Перчик А.В., Уткин Г.И. Цифровой амплитудный анализатор для учебно-исследовательского эксперимента. // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabView и технологии National Instruments: Тезисы докладов Международной научно-практической конференции. – М., 2004. – С. 87.
2. Мартынов А.С., Перчик А.В., Уткин Г.И. Программное обеспечение поляриметров в среде LabView. // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabView и технологии National Instruments: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. – М., 2005. – С. 206-210.
3. Мартынов А.С., Перчик А.В., Уткин Г.И. Программное обеспечение оптико-электронных приборов в среде LabView // Прикладная оптика-2006: Труды 7 Международной конференции. – СПб., 2006. – Т.3 : Компьютерные технологии в оптике. – С. 309–313.
4. Мартынов А.С., Перчик А.В., Уткин Г.И. Прецизионный цифровой преобразователь угловых перемещений // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabView и технологии National Instruments: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. – М., 2006. – С. 272–274.
5. Метод оценки параметров распределений случайных последовательностей при статистических исследованиях качества цифровых оптико-электронных приборов / В. И. Алехнович [и др.] // Измерительная техника. – 2006. – №11. – С. 33–36.
6. Оценка влияния параметров АЦП на статистические характеристики сигнала моделируемого оптико-электронного тракта / В.И. Алехнович [и др.] // Измерительная техника. – 2007. – №8. – С. 12–15.
7. Прецизионный поляриметр для контроля нанокolicеств оптически активных веществ. / А.С. Мартынов [и др.] // Поляризационная оптика: Тезисы докладов международной научно-технической конференции. – М., 2008. – С. 72–73.
8. Мартынов А.С., Уткин Г.И. Анализ точности методов обработки сигналов сканирующих поляриметров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. – 2011. – Специальный выпуск «Современные проблемы оплотехники». – С. 168–176.
9. Мартынов А.С., Уткин Г.И. Анализ двухканального измерительного тракта развертывающих поляриметров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. – 2012. – Специальный выпуск «Современные оптические системы». – С. 3–9.
10. Мартынов А.С., Уткин Г.И. Программное средство для моделирования, анализа и обработки сигналов развертывающих поляриметров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. – 2012. – Специальный выпуск «Современные проблемы оплотехники». – С. 74–81.