EDN: KGHZHV DOI: https://doi.org/ 10.65912/2782-5507.2026.21.2.009
УДК 681.586.5 *2.2.6*

ПРИНЦИПЫ ОПРОСА ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ И ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

А.С. Луценко

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29

Аннотация: Представлен обзор подходов к построению устройств опроса оптических интерферометрических датчиков физических величин. Рассмотрены три основные группы устройств опроса: классические спектрометрические, на основе сканирующих спектральных элементов и радиофотонные. Продемонстрированы основные алгоритмы, использующиеся для обработки формируемых сигналов. Проанализированы достоинства, и ограничения каждой из групп устройств.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, интегрально-оптический датчик, интерферометр, спектральная обработка, оптические измерения.

Введение

Интерферометрические датчики физических величин на основе волоконной и интегральной оптики находят широкое применение в задачах измерения электрического напряжения, показателя преломления, деформации, температуры, давления, вибраций и акустических полей [1-7]. Безусловно, что интерферометрические датчики сочетают в себе высокую чувствительность, широкий динамический диапазон и обладают отличной электромагнитной совместимостью. Особенностью функционирования таких датчиков служит модуляция оптического сигнала, формируемого в результате прохождения излучения через их чувствительный элемент на основе схемы интерферометра Маха-Цендера, Майкельсона, Фабри-Перо, Саньяка или их комбинаций.

Вне зависимости от конкретной конструкции чувствительного элемента такой датчик требует наличие устройства опроса – интеррогатора, основным предназначением которого является формирование сигнала, содержащего информацию об измеряемой величине. От архитектуры и алгоритмической базы интеррогатора зависят точность, быстродействие и масштабируемость всей системы измерения.

За последние десятилетия развитие методов оптической интерферометрии и прогресс в области фотонных компонентов обусловили формирование нескольких принципиально различных направлений построения устройств опроса. Классические спектрометрические схемы, опирающиеся на дифракционные решётки и линейные фотодетекторные матрицы, обеспечивают прямое спектральное преобразование сигнала и хорошо зарекомендовали себя в задачах, требующих надежность и воспроизводимость измерений [8]. Вместе с тем, стремление к повышению разрешающей способности, снижению габаритов и увеличению скорости опроса привело к развитию подходов на основе сканирующих узкополосных спектральных элементов [8-10]: самосканирующих лазеров, перестраиваемых решеток Брэгга, акустооптических и интерференционных фильтров, микроэлектромеханических систем и кольцевых резонаторов, позволяющих реализовать спектральную селекцию с высокой добротностью. Параллельно активно развивается радиофотонное направление [11-13], в котором спектральная информация переносится в радиочастотный диапазон с помощью методов оптического гетеродинирования или модуляционной спектроскопии, что открывает перспективы

создания компактных, высокоскоростных и легко интегрируемых в существующие телекоммуникационные инфраструктуры систем опроса.

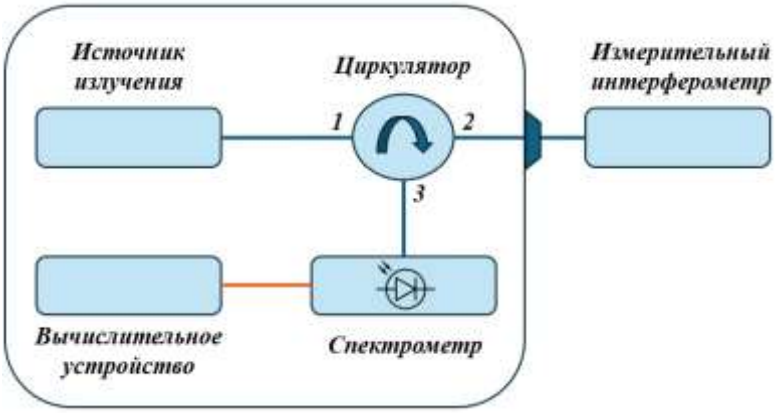
Несмотря на многообразие аппаратных реализаций, эффективность устройств опроса в значительной степени определяется применяемыми алгоритмами обработки формируемых сигналов [14]. К ним относятся методы спектрального пикового детектирования, корреляционного совмещения с эталонными функциями, цифровой фильтрации, а также современные подходы на основе машинного обучения и нейросетевой аппроксимации, позволяющие компенсировать нелинейности и дрейфы оптических компонентов. Выбор аппаратно-алгоритмической платформы диктуется требованиями конкретной области применения: от менее требовательных устройств для лабораторных измерений до прецизионных систем для контроля состояния конструкций.

Целью настоящей работы является обобщение и анализ современных подходов к построению устройств опроса оптических интерферометрических датчиков физических величин.

Спектрометрические и сканирующие схемы опроса

Спектрометрическая архитектура представляет собой наиболее распространённый и технологически зрелый подход к опросу оптических интерферометрических датчиков. В основе схем, представленных на рисунке 1, заложено применение низкокогерентного широкополосного источника оптического излучения (суперлюминесцентного диода, волоконного источника спонтанного излучения или лампы накаливания), светораспределительной установки, и спектрометра в состав которого входит призма или дифракционная решетка, раскладывающие излучение в пространстве на фотоприемную матрицу.

а)



б)

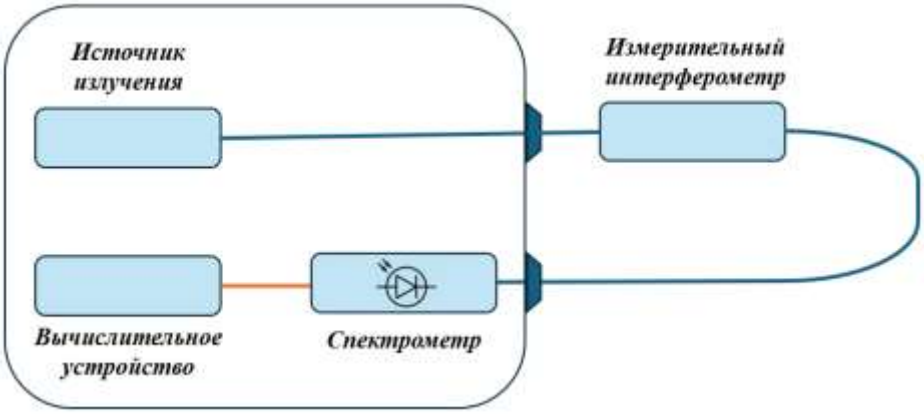


Рис. 1. Спектрометрическая схема опроса:
а) для измерительного интерферометра отражательного типа,
б) для измерительного интерферометра пропускного типа

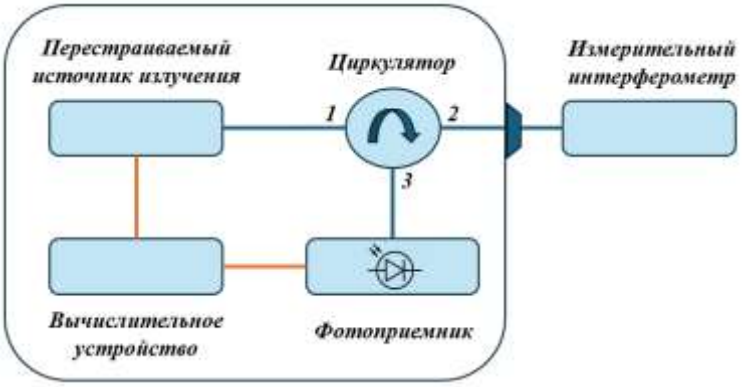
Отраженный или прошедший интерференционный сигнал чувствительного элемента датчика, модулированный за счет внешнего воздействия, поступает в дифракционную решетку или призму, разлагающую полихроматическое излучение в пространственный спектр, регистрируемый фотоприемными устройствами на основе ПЗС- или КМОП-матриц. При этом каждой спектральной компоненте соответствует свой фотоприемник, благодаря чему формируется цифровой массив данных об интенсивностях излучения.

К достоинствам классических спектрометрических устройств относятся долговременная стабильность, надежность, воспроизводимость характеристик от образца к образцу, а также возможность параллельной регистрации всего спектрального диапазона, обеспечивающая скорость обновления данных до единиц килогерц. Вместе с тем данный подход обладает рядом принципиальных ограничений:

- спектральное разрешение жёстко ограничено физическими параметрами дифракционной решётки (числом штрихов на миллиметр), фокусным расстоянием коллимирующей оптики и размером пикселя фотоприёмной матрицы; типичные значения для компактных устройств составляют 10-100 пм;
- измеряемый спектральный диапазон ограничен геометрическими размерами, количеством фотоприемных элементов;
- габаритно-массовые характеристики спектрометрических модулей существенно уступают интегральным решениям, а использование линейных матриц для ближнего инфракрасного диапазона, необходимого для телекоммуникационных приложений, сопряжено с высокой стоимостью и повышенным уровнем теплового шума.

Альтернативой параллельной спектрометрии служат сканирующие архитектуры устройств, типичные схемы которых представлены на рисунке 2.

а)



б)

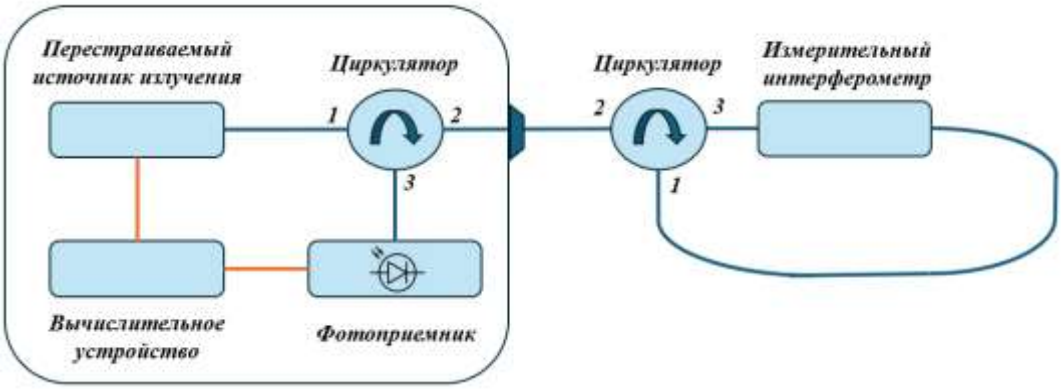


Рис. 2. Сканирующая схема опроса:
а) для измерительного интерферометра отражательного типа,
б) для измерительного интерферометра пропускного типа

Спектральный анализ осуществляется последовательным зондированием узкополосной спектральной областью в пределах рабочего диапазона длин волн. В основе таких устройств лежит перестраиваемый спектрально-селективный элемент – объёмный, волоконный или интегральный фильтр, микроэлектромеханический (МЭМС) фильтр на основе мембран с многослойными диэлектрическими покрытиями, самосканирующий лазер, настраиваемый кольцевой резонатор или акустооптический модулятор. В общем случае источник излучения формирует сигнал, который проходит через сканирующий элемент, и при изменении управляющего воздействия (напряжения на пьезоэлектрическом приводе, тока через структуры МЭМС или частоты акустической волны) центральная длина волны пропускания фильтра смещается по спектру. Фотоприёмник, установленный за фильтром, регистрирует интенсивность прошедшего излучения в каждый момент времени, формируя таким образом временную реализацию, эквивалентную спектральному распределению отклика датчика.

Главное преимущество сканирующих схем заключается в возможности достижения исключительно высокого спектрального разрешения, достигающего десятые доли пм. Применение единичного фотоприёмника вместо линейной матрицы существенно снижает стоимость устройств, особенно в инфракрасном диапазоне, и обеспечивает высокое отношение сигнал/шум за счёт большей площади чувствительного элемента. МЭМС-реализации сканирующих фильтров открывают путь к созданию сверхкомпактных встраиваемых устройств опроса.

Однако последовательный принцип регистрации накладывает жёсткие ограничения: сканирующие элементы подвержены износу, вибрационным помехам и гистерезису, требуют периодической перекалибровки и демонстрируют дрейф нулевого уровня при температурных флуктуациях. Кроме того, в таких устройствах скорость сканирования всегда конфликтует с диапазоном спектральной перестройки. Скорость обновления данных, как правило, не превышает сотен килогерц для диапазона сканирования до 50 нм.

Алгоритмическая обработка данных для обеих схем опроса опирается на следующие известные методы:

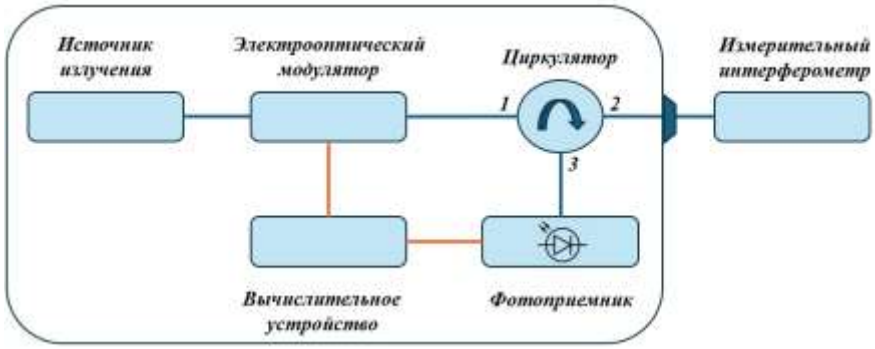
- пиковое детектирование, при котором положение характерных интерференционных компонент определяется по локальным максимумам интенсивности в массиве отсчётов;
- быстрое преобразование Фурье, при котором результатом обработки является спектр пространственных частот, по которому определяются доминирующие гармонические компоненты;
- корреляционный, при котором измеренный спектр сопоставляется с эталонной базой или результатом предыдущего измерения, а смещение максимума взаимной корреляционной функции интерпретируется как изменение измеряемой величины;
- нейросетевые регрессоры или свёрточные сети, обученные на синтетических или экспериментальных спектрах, что позволяет повысить помехоустойчивость, компенсировать аппаратные искажения оптического тракта и определить характеристики измерительного интерферометра.

Радиофотонные схемы опроса

Радиофотонные устройства опроса представляют собой относительно новое, но интенсивно развивающееся направление, в котором спектральная информация от оптического датчика переносится в радиочастотный диапазон с последующей цифровой обработкой. Физический принцип функционирования базируется на гетеродинировании

или модуляционном преобразовании оптических сигналов. В классической радиофотонной схеме, представленной на рисунке 3, излучение узкополосного лазера модулируется по интенсивности или фазе с помощью электрооптического модулятора на частоте внешнего радиочастотного генератора. Модулированный оптический сигнал взаимодействует с чувствительным элементом, после чего на фотоприёмнике происходит оптико-электронное преобразование, в результате которого спектральные особенности отклика датчика отображаются на амплитудно-частотную или фазочастотную характеристику радиочастотного сигнала.

а)



б)

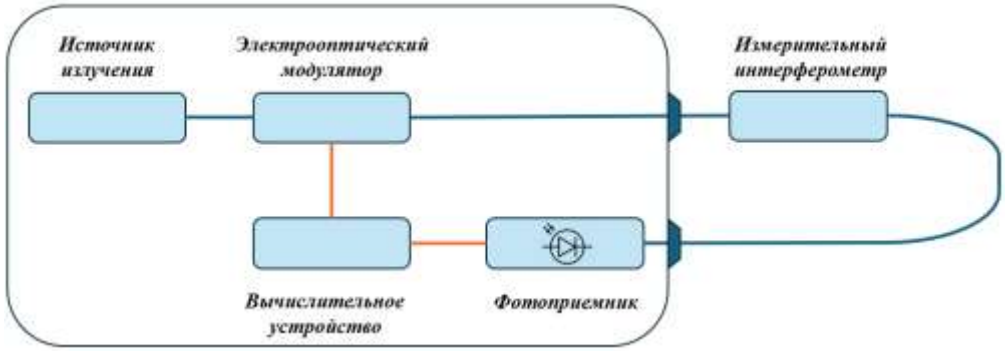


Рис. 3. Радиофотонная схема опроса:
а) для измерительного интерферометра отражательного типа,
б) для измерительного интерферометра пропускного типа

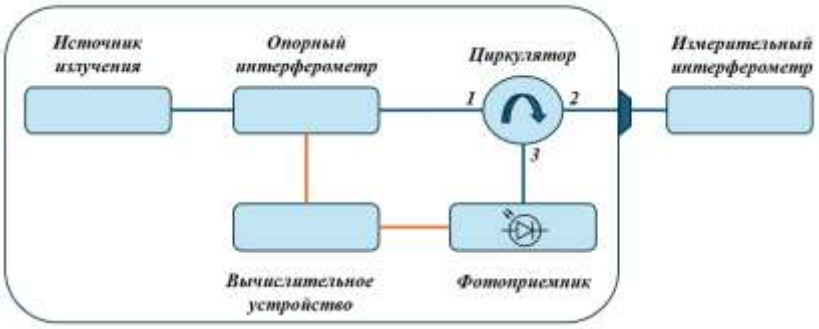
Процесс формирования полезного сигнала заключается в следующем:

- узкополосное излучение проходит через электрооптический модулятор, на который подается СВЧ сигнал с вычислительного устройства;
- в спектре излучения возле оптической несущей появляется набор боковых полос (суммарных и разностных частот), амплитуды которых описываются функциями Бесселя;
- СВЧ-модулированное оптическое излучение проходя через измерительный интерферометр приобретает частотно-зависимый фазовый сдвиг, поскольку компоненты спектра проходят различный оптический путь;
- фотоприемник детектирует оптическое излучение, формируя электрический сигнал, содержащий характерные биения оптической несущей и боковых полос;
- вычислительное устройство определяет амплитуды биений, которые зависят от фазового сдвига в измерительном интерферометре, т.е. внешнего воздействия.

Ещё один подход, который по мнению автора относится к радиофотонному направлению, представлен на рисунке 4. Он реализуется при оптической кросс-корреляции двух сигналов: от опорного интерферометра (с зависимой разностью хода от амплитуды

СВЧ сигнала) и измерительного интерферометра (с чувствительной к внешнему воздействию разностью хода). В данной схеме два интерферометра последовательно освещаются широкополосным источником излучения. Опорный интерферометр Маха-Цендера на основе ниобата лития изменяет оптическую разность хода по линейному закону за счет электрооптического эффекта Поккельса в диапазоне, определяемом величиной размаха электрического СВЧ сигнала от ЦАП вычислительного устройства. Оптический интерференционный сигнал от опорного интерферометра поступает на измерительный интерферометр, после чего результат их объединения поступает на фотоприемник, сигнал от которого регистрируется на АЦП вычислительного устройства. Каждая точка цифрового сигнала представляет собой интеграл произведения спектров широкополосного источника, опорного и измерительного интерферометров. Оптическая кросс-корреляция позволяет по амплитуде детектируемого сигнала определить, когда спектры опорного и измерительного интерферометров полностью идентичны. Изменение оптической разности хода в измерительном интерферометре приведет к смещению всего детектируемого сигнала, благодаря чему можно определять величину воздействия после предварительной градуировки.

а)



б)

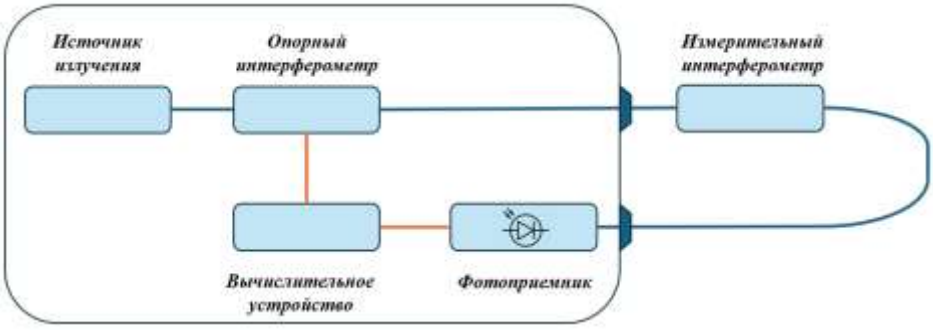


Рис. 4. Схема устройства опроса на основе оптической кросс-корреляции:
а) для измерительного интерферометра отражательного типа,
б) для измерительного интерферометра пропускного типа

На рисунке 5 представлена визуализация расчетных сигналов, получаемых при оптической кросс-корреляции рассматриваемой оптической схемы с параметрами компонентов, приближенными к существующим на российском рынке:

- источник излучения с центральной длиной волны λ = 1550 нм и шириной спектра $\Delta\lambda$ = 50 нм;
- измерительный интерферометр с оптической разностью хода 100 мкм.

Диапазон изменения оптической разности хода опорного интерферометра относительно измерительного для наглядности составлял ± 40 мкм.

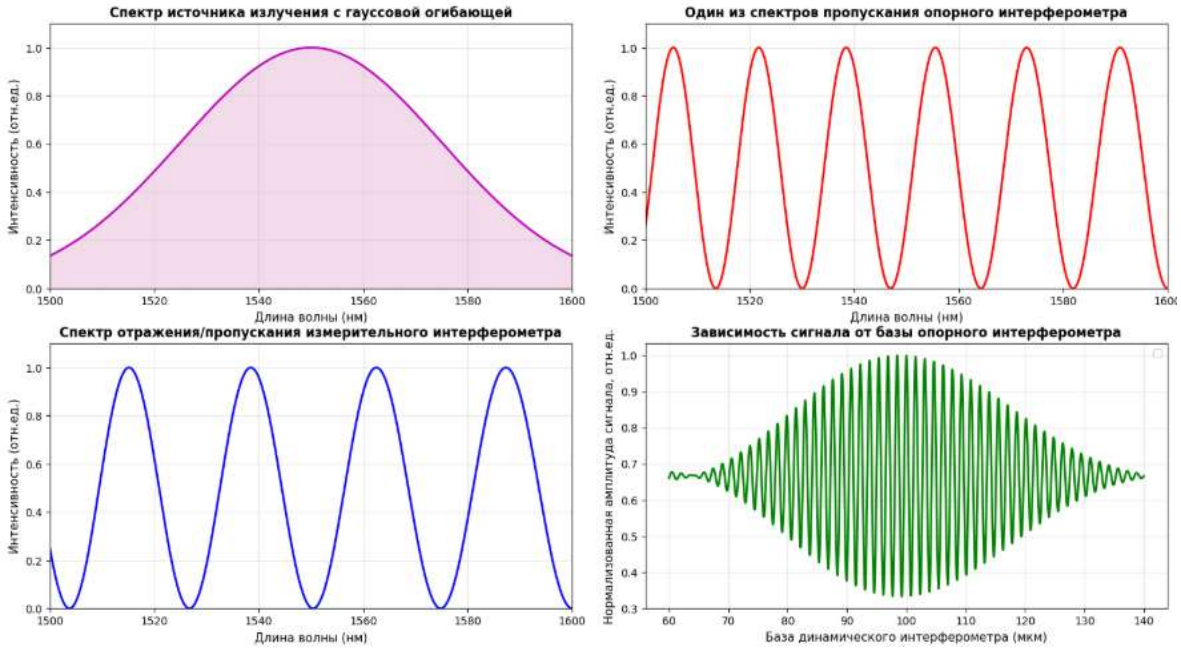
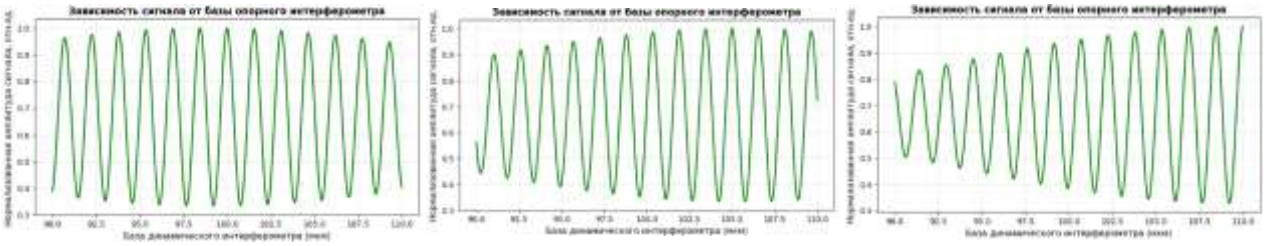


Рис. 5. Расчетные формируемые сигналы при оптической кросс-корреляции

Если оптическая разность хода измерительного интерферометра находится за пределами сканирования опорным интерферометром, то у формируемого сигнала изменяется угол огибающей, по которому возможно отслеживать величину воздействия на измерительный интерферометр, что продемонстрировано на рисунке 6.



а) б) в)

Рис. 6. Расчетная зависимость амплитуды сигнала от оптической разности хода опорного интерферометра в диапазоне от 90 до 110 мкм:
а) оптическая разность хода измерительного интерферометра 100 мкм,
б) 105 мкм, в) 110 мкм

Ключевыми достоинствами радиофотонных архитектур являются высокое быстродействие, определяемое полосой пропускания электрооптических модуляторов и скоростью оцифровки, а также исключительная компактность. Перенос информации в радиочастотный диапазон упрощает её маршрутизацию, усиление и обработку с использованием интегральных микросхем СВЧ-диапазона. Радиофотонные схемы демонстрируют высокую устойчивость к влиянию оптических потерь в волокне, что критично для распределённых систем мониторинга протяжённых объектов. Вместе с тем реализация таких устройств сопряжена с рядом технических сложностей: нелинейности модуляционной характеристики, шумы преобразования и интермодуляционные искажения требуют сложной калибровки и компенсации. Кроме того, радиофотонные методы чувствительны к фазовым шумам источника, что накладывает повышенные требования к экранированию и стабилизации СВЧ генератора.

Сравнительный анализ схем опроса

Для наглядного представления различий между рассмотренными архитектурами устройств опроса в таблице 1 приведены их ключевые технические характеристики. Значения скорости опроса, спектрального разрешения и стоимости представляют собой обобщённые литературные данные и могут варьироваться в зависимости от конкретной реализации.

Таблица 1. Сравнительные характеристики устройств опроса

Параметр	Спектрометрическая схема	Сканирующая схема	Радиофотонная схема	
			СВЧ модуляция	Оптическая кросс-корреляция
Скорость опроса	единицы кГц	сотни кГц	сотни МГц	сотни МГц
Спектральное разрешение	10-100 пм	0,1-1,0 пм	0,1-5,0 пм	1-10 пм
Вычислительная сложность алгоритмов	Высокая	Высокая	Средняя	Средняя
Стоимость	> 3 млн	> 2 млн	≈ 1 млн	< 1 млн

Архитектура устройства опроса интерферометрических датчиков определяет вид формируемого сигнала: спектрометрическая схема – зависимость интенсивности от длины волны излучения, сканирующая схема – зависимость интенсивности от времени сканирования, радиофотонная с СВЧ модуляцией – зависимость амплитуды или фазы от частоты сигнала, радиофотонная с оптической кросс-корреляций – зависимость интенсивности от размаха СВЧ сигнала.

Для устройств опроса со спектрометрическими и сканирующими схемами наибольшая разрешающей способность достигается за счет применения алгоритмов обработки сигналов, основанных на нейросетевых регрессорах и корреляционных методах. Стоит уточнить, что корреляционный метод обеспечивает наилучшее сочетание разрешающей способности и устойчивости к шуму, тогда как нейросетевые методы способны обеспечить минимальную погрешность только при наличии репрезентативной обучающей выборки. При этом методы, основанные на быстром преобразовании Фурье и пиковом детектировании оказываются качественно хуже, но зачастую применяются за счет простоты их реализации.

В устройствах опроса интерферометрических датчиков на основе радиофотонных схем наиболее часто применяется квадратурная (I/Q) демодуляция радиочастотного сигнала, поскольку она обеспечивает наилучшую разрешающую способность. Также применяются алгоритмы, основанные на быстром преобразовании Фурье, синхронном детектировании, корреляционные методы и нейросетевые регрессоры.

Совокупность аппаратной архитектуры и алгоритмов обработки формирует метрологические характеристики измерительного канала, по которым выявляют целесообразные области применения.

Обсуждение результатов

Проведённый обзор показывает, что выбор архитектуры устройства опроса для оптического интерферометрического датчика определяется компромиссом между разрешающей способностью, скоростью опроса, габаритами и, безусловно, стоимостью.

Качественно устройства опроса интерферометрических датчиков характеризуются следующими характеристиками:
- спектральное разрешение устройства опроса, которое непосредственно ограничивает минимально регистрируемое изменение в сигнале датчика;
- отношение сигнал/шум фотоприёмного тракта, зависящее от мощности источника излучения, чувствительности фотодетектора и уровня тепловых шумов;
- относительной погрешности калибровки и градуировки измерительного канала (зависит от температурных флуктуации, вибраций, электромагнитных наводок, а также нелинейности амплитудно-частотной характеристики оптических и электрических компонентов).

Спектрометрические системы остаются наиболее надёжным решением для задач, где критичны повторяемость и долговременная стабильность. Их основное ограничение заключается в жёсткой связи спектрального разрешения с физическими параметрами дифракционной решётки и размером пикселя матрицы. Область применения: лабораторные измерения, контроль технологических процессов, не требующих сверхвысокого разрешения.

Сканирующие архитектуры позволяют преодолеть барьер разрешения, достигая десятых долей пикометра, и снижают стоимость за счёт использования единичного фотоприёмника. Однако принцип регистрации сигнала вносит фундаментальное ограничение на скорость опроса, а механические или термооптические элементы сканирования подвержены износу, гистерезису и температурному дрейфу. Область применения: прецизионные измерения, структурный мониторинг конструкций, геодезический мониторинг, и там, где критично сверхвысокое спектральное разрешение.

Радиофотонный подход, реализуемый методами гетеродинирования или модуляционного преобразования, демонстрирует наибольший потенциал с точки зрения быстродействия и компактности. Перенос спектральной информации в радиочастотный диапазон упрощает маршрутизацию и обработку сигнала стандартными СВЧ-компонентами, а также повышает устойчивость к оптическим потерям в волокне. Вместе с тем радиофотонные схемы чувствительны к фазовым шумам источника и нелинейностям модуляторов, что требует развития методов цифровой компенсации и стабилизации. Область применения: медицина и биомеханика, гидроакустика, сейсмометрия и там, где требуются прецизионные измерения быстропротекающих процессов.

Заключение

В работе обобщены и проанализированы современные подходы к построению устройств опроса оптических интерферометрических датчиков физических величин. Установлено, что ни одна из рассмотренных архитектур не обладает абсолютным преимуществом: спектрометрические системы обеспечивают надёжность и одновременность формирования спектров, сканирующие – сверхвысокое разрешение, а радиофотонные – быстродействие и компактность.

Эволюция устройств опроса интерферометрических датчиков характеризуется переходом от обработки оптической информации к цифровой. Если в спектрометрических и сканирующих системах основная вычислительная нагрузка связана с анализом оптических спектральных характеристик, то в радиофотонных устройствах ключевую роль играет цифровая обработка радиочастотных сигналов. Акцент делается на развитие алгоритмов обработки сигналов и высокопроизводительных вычислительных платформ.

Дальнейшее развитие области также связано с интеграцией источника излучения, модуляторов, фотоприемников и элементов обработки сигналов на единый фотонный чип. Применение интегральной фотоники обеспечит уменьшение размеров устройств опроса, повышение их надежности и снижение стоимости массового производства.

Список литературы

1. Патент на полезную модель № 237924 Российская Федерация. Волоконно-оптический зондовый термометр / А.С. Луценко, В.П. Первадчук; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «ПНИПУ». – № 2025110490; заявл. 23.04.2025; опубл. 09.10.2025, бюл. № 28. – 8 с.
2. Патент на полезную модель № 194557 Российская Федерация. Оптический чувствительный элемент для измерения электрической разности потенциалов /В.С. Ермаков, Е.Д. Вобликов, А.А. Журавлев; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество «Пермская научно-производственная приборостроительная компания». – № 2019128508; заявл. 10.09.2019; опубл. 16.12.2019, бюл. № 35. – 6 с.
3. Аглиуллин Т. А. Многопараметрические внутриволоконные датчики давления, температуры и относительной влажности атмосферного воздуха для контроля протекания суффляционных процессов в ходе эндоскопических операций / Т. А. Аглиуллин, О. Г. Морозов, А. Ж. Сахабутдинов, и др. // XI Международный семинар по волоконным лазерам: Материалы семинара, Новосибирск, 19–25 августа 2024 года. – Новосибирск: Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 2024. – С. 227-228. DOI 10.31868/RFL.2024.227-228.
4. Chesnokova M. Microscopic Temperature Sensor Based on End-Face Fiber-Optic Fabry–Perot Interferometer / M. Chesnokova, D. Nurmukhametov, R. Ponomarev et al.// Photonics.– 2024. – Vol. 11, No. 8. – P. 712. DOI 10.3390/photonics11080712.
5. Morozov O. G. Fiber-Optic Hydraulic Sensor Based on an End-Face Fabry–Perot Interferometer with an Open Cavity / O. G. Morozov, T. Agliullin, A. Sakhabutdinov, et al. // Photonics. – 2024. – Vol. 11, No. 1. – P. 22. – DOI 10.3390/photonics11010022.
6. Луценко, А.С. Спектральное зондирование внутриволоконной квазипериодической полостной структуры / А. С. Луценко, В. П. Первадчук, Р. М. Смертин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2025. – №7 (157). – DOI 10.60797/IRJ.2025.157.36.
7. Sosunov, A. High-Stable Electric Field Integrated Optical Sensor Based on Reduced Lithium Niobate / A. Sosunov, A. Shipitsin, M. Zhitkov, A. Kuznetsov et al. // Sensors. – V. 26. – P.1619. https://doi.org/10.3390/s26051619
8. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists / Eric Udd, William B. Spillman Jr. – 3rd ed. – Hoboken, N. J.: Wiley, 2024. – 624 p. – ISBN 978-1-119-67878-6.
9. Ткаченко А.Ю. Разработка и исследование устройств опроса волоконно-оптических датчиков на основе самосканирующего волоконного лазера: дис. … канд. тех. наук: 1.3.6 / Ткаченко Алина Юрьевна. – Новосибирск, 2022. – 104 с.
10. Белокрылов М.Е. Исследование параметров перестраиваемого фильтра Фабри-Перо в условиях частотного сканирования в широком температурном диапазоне / М.Е. Белокрылов, А.А. Оглезнев, Ю.А. Константинов // Фотон-экспресс. – 2019. – № 6 (158). – С. 332-333.
11. Морозов О.Г., Сахабутдинов А.Ж. Радиофотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах. Уфимский государственный авиационный технический университет, 2018. Р. 10–15.
12. Калаев М.П. Применение SDR-приемников для регистрации сигналов оптоволоконных интерферометрических датчиков с высокочастотной модуляцией лазерного диода / М.П. Калаев, А.М. Телегин // Приборы и техника эксперимента. – 2026.– №3.
13. Каид М. Комбинированные волоконно-оптические сенсоры локального контроля температуры с радиофотонным опросом: дис. … канд. тех. наук: 2.2.6 / Каид Мохаммед Ракиб Табит Мохаммед. – Казань, 2024. – 175 с.

14. Макаров Р.А. Нейросетевые алгоритмы как ключ к повышению точности радиофотонных методов опроса оптоволоконных датчиков температуры / Р.А. Макаров et al. // Фотон-Экспресс. – 2024. – V. 2, № 194. – P. 12–16.

PRINCIPLES OF POLLING INTERFEROMETRIC SENSORS BASED ON INTEGRATED AND FIBER OPTICS

A.S. Lutsenko

Perm National Research Polytechnic University
29, Komsomolsky Ave., Perm, 614990, Russian Federation

Abstract: An overview of approaches to the construction of optical interferometric sensors of physical quantities is presented. Three main groups of polling devices are considered: classical spectrometric, based on scanning spectral elements, and radiophotonic. The basic algorithms used to process the generated signals are demonstrated. The advantages and limitations of each device group are analyzed.

Keywords: fiber-optic sensor; integrated optical sensor; interferometer; spectral processing; optical measurements.

Статья представлена в редакцию 24 мая 2026г.