



МОРОЗОВ  
Олег Геннадьевич

Слияние микроволновой и фотонной сенсорики — это логичный и мощный тренд, создающий идеальную синергию: микроволны обеспечивают проникновение сквозь материалы и среды, фотоника дает высочайшее пространственное разрешение и точность. Это переход к отказоустойчивым системам, где физические ограничения одной технологии полностью компенсируются сильными сторонами другой. Фактически, это путь к созданию «всевидающей» сенсорики. Главный вызов такого слияния — синхронизация разнородных данных и их обработка в реальном времени, которая требует развитого поискового и анализирующего инструмента. Однако создание новой аппаратной части нельзя преуменьшать в ее влиянии на развитие «всевидающей» сенсорики, поскольку развитие движется во встречных направлениях и разрешение обработки сигналов в радиофотонных системах существенно превышает разрешение фотонных. Некоторые ученые скептически сравнивают это разрешение с размером атома водорода. В самом деле это реально в самом распространенном диапазоне длин волн инфотелекоммуникационных систем, лежащем в области 1552,52

нм. Отталкиваясь от этого перейдем к содержанию номера, основной темой которого стали микроволновая и фотонная сенсорики и вопросы построения комбинированных систем на их основе.

В двух статьях раздела «Электроника», написанных проф. Морозовым Г.А., доц. А.Ф. Аглиуллиным, А.Н. Пиккулевым, С.В. Смирновым (КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева) и их учениками рассматриваются вопросы сравнительного анализа различных топологий планарных СВЧ-сенсоров, их массивов и фотонной термокомпенсации. Ценность первой работы заключается в строгой методологии: проведен системный сравнительный анализ трех различных топологий планарных СВЧ-резонаторов в единых условиях, что позволяет перейти от эмпирического проектирования к обоснованному выбору сенсора под конкретные задачи. Миниатюрные СВЧ-сенсоры для диэлькометрии жидкостей критически востребованы в биосенсорике, химическом синтезе, фармацевтике и контроле качества продукции. Оцениваются не только сдвиг резонансной частоты (чувствительность), но и стабильность добротности, а также реакция на тангенс угла диэлектрических потерь. Наличие четких, доказанных рекомендаций по применению каждого типа датчика в зависимости от требуемых параметров. Во второй работе предложен оригинальный гибридный подход, объединяющий СВЧ-планарные структуры (включая резонанс Фано для самокалибровки) и волоконно-оптическую термокомпенсацию на линейно-чирпированных волоконных брэгговских решетках). Это элегантно решает фундаментальную проблему перекрестной температурной чувствительности в диэлькометрии. Многомерность анализа: Формирование «диэлектрического отпечатка» за счет многочастотных массивов резко повышает селективность к примесям с точным устранением температурного дрейфа через оптический канал. Приведены четкие количественные метрики частоты, глубины резонанса, температурных коэффициентов, разрешения.

Технологии гибридных систем нашли отражение и в разделе «Фотоника», в работах проф. Морозова О.Г. и проф. Морозова Г.А. (КНИТУ-КАИ). В первой работе предложена оригинальная гибридная архитектура (эффект Френеля + брэгговские решетки + радиофотоника) для одновременного измерения показателя преломления (степень отверждения), деформаций и температуры термореактивных полимерных композитных материалов (ТРПКМ). Использование фазовых адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) для математического и физического разделения перекрестных чувствительностей представляет собой весомый научный вклад в волоконно-оптическую сенсорику. Мониторинг отверждения ТРПКМ in-situ – важнейшая задача в авиа-, ракетостроении и ветроэнергетике. Контроль позволяет оптимизировать циклы термообработки, предотвращать внутренние дефекты и сохранять заданную геометрию плоских листов. Во второй работе предложена оригинальная архитектура трехкомпонентного датчика и применение радиофотонного опроса для разделения термо- и механодеформаций. Радиофотонный опрос решает реальную проблему дороговизны и низкого быстродействия традиционных оптических интеррогаторов, использование самой смолы в качестве части оболочки волокна

(«сердцевина-смола как оболочка») для специфических измерений снимает ряд вопросов при мониторинге полного цикла от заливки до отверждения смолы.

Три следующие статьи проф. Нуреева И.И., Юсупова Р.А., доц. Юсупова Ш.Р., Иванова А.А., Габдулхакова И.М. (КНИТУ-КАИ, КСК «Олимп») посвящены проблемам развития волоконно-оптической сенсорики в системах спортивной инженерии. В первой статье новизна заключается не в самой задаче мониторинга походки (она хорошо изучена), а в адаптации сложной фотонной архитектуры (фазовых АВБС, волноводные упорядоченные решетки, радиофотонного опроса) для биомеханических измерений. Неинвазивный, непрерывный и высокоточный мониторинг биомеханики стопы критически востребован в спортивной медицине, реабилитации, ортопедии и для предотвращения падений у пожилых людей. Использование АВБС и радиофотоники обеспечивает высочайшую скорость опроса, мультиплексирование и абсолютный иммунитет к электромагнитным помехам. Вторая статья посвящена математическому синтезу многоадресных АВБС со сдвигом фаз (3л-АВБС), что является известной нишей в волоконной оптике, но не описана активно в периодической литературе. Сам домен (спортивная инженерия, носимые мультисенсоры) критически актуален. Грамотно описан тренд на универсальные (многопараметрические) датчики и киберфизические системы. Использование АВБС с фазовыми сдвигами действительно является передовым методом для создания компактных мультиплексированных сенсоров и вопросы их проектирования, рассматриваемые в статье очень важны. В третьей статье рассматривается применение волоконных брэгговских решеток (ВБР) для измерения деформаций — классическая и хорошо изученная задача. Рассчитанная чувствительность ( $\sim 1.21$  пм/ $\mu\epsilon$ ) совпадает стандартным справочным значением для кварцевых волокон, вытекающим напрямую из уравнения Брэгга. Аналитическое моделирование в Matlab с гауссовой аппроксимацией представляет собой базовый инженерный расчет. Задачи спортивной инженерии, биомеханического анализа и оптимизации техники лыжников крайне востребованы. Использование носимых оптических сенсоров для этих целей имеет высокий практический потенциал. Работа ориентирована на создание конкретного прикладного продукта (стенда подготовки спортсменов), указанный диапазон деформаций (0–400  $\mu\epsilon$ ) реалистичен и адекватен для биомеханики лыжного хода, приведены четкие количественные оценки ожидаемого отклика (сдвиг  $\sim 0.5$  нм), что подтверждает принципиальную возможность регистрации сигнала стандартной аппаратурой. В качестве развития исследований рассматривается замена ВБР на АВБС, преимущества которых хорошо представлены в данном и других номерах нашего журнала.

В заключительных статьях раздела «Фотоника» представлены два обзора от авторов из Уральского федерального университета и Пермского научно-исследовательского политехнического университета. Первая работа – это аналитический/наукометрический обзор. Ценность его заключается в систематизации поля, выявлении «слепых зон» и обосновании необходимости смены парадигмы для решения проблем масштабирования. Своевременное выявление тупиковых ветвей (проблемы масштабирования дискретных структур) и указание перспективных направлений (градиентные среды) критически важно для векторизации будущих НИОКР в нанооптике. Декларируется использование количественных методов анализа вместо субъективного нарратива и применение четких критериев (восемь параметров) для оценки массива данных. Выявлены конкретные физических пробелы (непрерывные/градиентные среды, поляризационно-инвариантные режимы) и осуществлена постановка задач дальнейших исследований. Вторая работа систематизирует существующие знания в области. Ценность определяется глубиной сравнительного анализа и обоснованием перспектив перехода к радиофотонным методам опроса интерферометрических датчиков на основе интегральной и волоконной оптики. Блок опроса (интеррогатор) – самая сложная, дорогая и ограничивающая производительность часть волоконно-оптических сенсорных систем. Сравнение аппаратных и алгоритмических подходов критически важно для выбора архитектуры при создании систем для аэрокосмоса, нефтегазового сектора и мониторинга критических конструкций. Охвачены все три базовые архитектурные парадигмы опроса (от классики до передовой радиофотоники). Рассматривается не только «железо» (аппаратная часть), но и алгоритмы цифровой обработки сигналов, что часто упускается в чисто инженерных обзорах. Приведенный анализ ограничений каждого метода поможет инженерам избегать системных ошибок при проектировании.

В разделе «Киберфизические системы» представлены две фундаментальные работы проф. Тагирова Л.Р. (КФУ, ИПИ АН РТ) и проф. Морозова О.Г. (КНИТУ-КАИ) с соавторами.

В первой статье проводится системное сравнение трех принципиально различных морфологий Pd (эпитаксиальная, поликристаллическая, островковая) на границе размерных эффектов (~10 нм), что вносит вклад в понимание физики гидрирования палладия и механизмов диффузии водорода в наноструктурированных средах. Развитие водородной энергетики и инфраструктуры требует надежных, безопасных и селективных сенсоров утечек H<sub>2</sub>. Оптические сенсоры на Pd обладают иммунитетом к ЭМ-помехам и пригодны для взрывоопасных зон. Одновременное исследование трех морфологий на разных подложках позволяет выявить роль границ зерен дефектов и островковой структуры. Установлены связи кинетики с морфологией и температурой, обсуждена природа явлений. Результаты позволяют выбирать оптимальную морфологию под конкретные требования сенсора (быстродействие или чувствительность).

Вторая работа выходит за рамки прикладной сенсорики, предлагая строгое математическое обоснование ограничений (доказательство матричной сингулярности) и применяя передовые методы (радиофотоника, АВБС с  $\pi$ -сдвигом) для перехода в радиочастотный домен. Непрерывный мониторинг температуры и влагосодержания трансформаторного масла – важнейшая задача для прогнозирования отказов и обеспечения надежности высоковольтного оборудования в электроэнергетике. В работе построена логичная цепочка от выявления фундаментальной проблемы (перекрестная чувствительность, сингулярность матриц) до ее аппаратного решения (радиофотоника). Выявлена деградация спектра из-за интерференции Фабри-Перо и обоснован выбор гомогенного волокна (PS-1500) для ее устранения. При этом использовано сочетание математического моделирования, физики волноводных структур и инженерного выбора компонентов.

Надеюсь, что данный номер внесет определенный вклад в решение задач слияния микроволновой и фотонной сенсорики и отражает его синергию.