

Эволюция систем мониторинга на основе меток и датчиков на поверхностных акустических волнах



И. Г. Анцев,
к. т. н., исполнительный директор



С. В. Богословский,
д. т. н., профессор, зам. директора НПК
ММСН – начальник научного комплекса

АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург

Представлены цели, задачи и состав аппаратных и программных средств систем мониторинга. Приведена классификация систем дистанционного мониторинга на пассивных беспроводных датчиках мониторинга (СПБДМ). Проведен анализ структур системы беспроводного мониторинга. Рассмотрены методы измерения и идентификации на основе ПАВ-технологий.

Ключевые слова: система мониторинга, поверхностные акустические волны, пассивный беспроводной датчик.

Мониторинг состояния физических, химических и биологических объектов представляет собой процесс контроля их физических, химических и биологических свойств.

Системой мониторинга объектов называется система, осуществляющая мониторинг объектов с передачей информации в дежурно-диспетчерские службы этих объектов [1].

Средствами мониторинга являются средства информационной поддержки принятия решения по предупреждению и ликвидации невалидных состояний.

Объектами мониторинга, на которых обязательно должно быть предусмотрено использование беспроводных пассивных датчиков, являются потенциально опасные, особо опасные, технически сложные и уникальные объекты, непосредственный доступ персонала к которым для наблюдений конструктивным элементам которых физически затруднен. Перечень таких объектов содержится в [2].

Критерием качества системы мониторинга может служить вероятность решения с его помощью следующих задач [3]:

- безопасное увеличение межремонтных интервалов с планированием технического обслуживания только в практически необходимых случаях;
- выявление и идентификация дефектов;
- непосредственное определение необходимости осмотров и ремонтов при известных симптомах, исключая необходимость разборок машин и механизмов, уменьшающих их долговечность;

- оптимизация моментов и продолжительности остановок на ремонты с учетом плановой загрузки оборудования;
- предотвращение аварийных простоев из-за неожиданных отказов;
- продление работоспособности объектов;
- снижение времени на ремонт и обслуживание благодаря более точному и подробному планированию.

Одним из основных направлений повышения надежности конструкций сложных технических объектов является обеспечение непрерывного контроля их целостности и механической напряженности, возникающих в процессах деформации под действием внешних сил. Поэтому мониторинг состояния конструкций обеспечивается измерением физических характеристик объекта (например, деформации, давления, перемещения, температуры и др.) во время его работы и информационным обменом между компонентами системы мониторинга с использованием средств связи [4].

Функциональная схема системы мониторинга

В качестве чувствительных элементов измерительных преобразователей физических величин в системах мониторинга физических параметров (МФП) ранее широко использовались проводные датчики с дистанционным съемом информации.

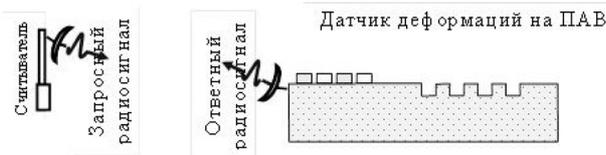


Рис. 1. Принцип действия пассивного беспроводного датчика на ПАВ

Перспективным направлением в развитии современных систем мониторинга является дистанционная беспроводная система сбора и обработки информации с пассивными датчиками на динамических неоднородностях, таких, как поверхностные акустические волны [5].

Далее представлена общая схема работы беспроводной сенсорной системы мониторинга состояний и идентификации [6].

Основными компонентами МФП являются считыватель и датчик [7]. Считыватель излучает в направлении датчика электромагнитные волны. Датчик принимает электромагнитную энергию от считывателя, которая возбуждает колебания несущей частоты в чувствительном элементе и посылает модулированный измеряемым параметром ответный сигнал, который, в свою очередь, принимается антенной считывателя и распознается (идентифицируется). Считывание информации с датчиков возможно как неподвижным, так и транспортируемым считывателем.

Принцип действия пассивного беспроводного датчика на ПАВ приведен на рис. 1.

Функциональная схема системы мониторинга на основе пассивных беспроводных датчиков приведена на рис. 2.

Система мониторинга состояний объектов (рис. 2) имеет следующие специфические особенности:

- большие площади территорий размещения датчиков;
- большое число измеряемых характеристик состояния;
- постоянный и долговременный контроль состояний многих объектов;
- входной информацией для системы МФП является информация, поступающая с датчиков физических величин.

Это подчеркивает важность разработки новых и усовершенствования существующих измерительных преобразователей физических величин для системы мониторинга состояний объектов социальной инфраструктуры.

Классификация систем дистанционного мониторинга на пассивных беспроводных датчиках мониторинга техногенных объектов

Классификация систем мониторинга

Классификация систем дистанционного мониторинга на пассивных беспроводных датчиках мониторинга (СПБДМ) может быть построена в соответствии с классификацией беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

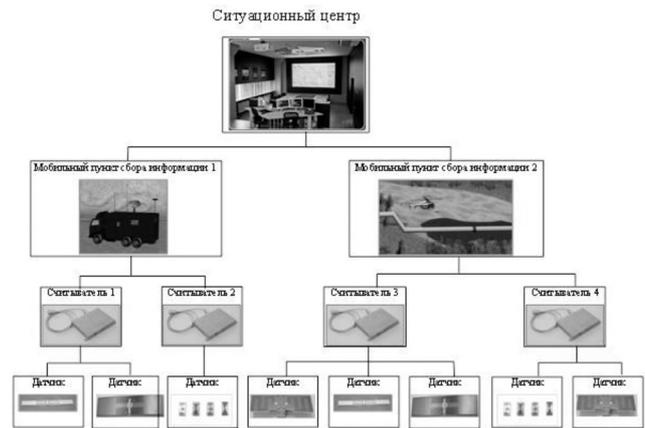


Рис. 2. Функциональная схема системы мониторинга

По применяемым системам управления СПБДМ можно классифицировать аналогично классификации беспилотных авиационных систем [8]:

- СПБДМ с дистанционно пилотируемым летательным аппаратом (ДПЛА);
- СПБДМ с беспилотным автоматическим летательным аппаратом (БПАЛА);
- СПБДМ с дистанционно управляемым летательным аппаратом (ДУЛА);
- СПБДМ с дистанционно управляемой авиационной системой (ДУАС).

По массе и типу применяемых БПЛА, СПБДМ можно классифицировать аналогично классификации БПЛА, приведенной в работе [9]:

- СПБДМ с БПЛА взлетной массой до 10 кг;
- СПБДМ с БПЛА взлетной массой до 100 кг.

Требования к используемым системой мониторинга датчикам находятся в прямой зависимости от используемого класса БПЛА:

- СПБДМ с БПЛА взлетной массой до 10 кг могут быть использованы для наблюдения на дальностях до 15 км в составе стационарных постов или мобильных групп охраны; при этом основным прибором является видеокамера дневного или инфракрасного диапазонов;
- СПБДМ с БПЛА взлетной массой до 100 кг могут использоваться для наблюдения на дальностях до 500 км; при этом основными приборами могут являться цифровая фотокамера высокого разрешения или фотограмметрический комплекс, радар, газоанализатор, а также считыватель сигналов датчиков и файловый накопитель.

Для использования в СПБДМ траектория полета БПЛА должна проходить над расположением радиочастотных датчиков в зоне взаимодействия датчиков и считывателя.

Метрологические требования к датчикам системы мониторинга

Работа датчика СПБДМ во многом аналогична работе самолетного ответчика, передающего ответный радиосигнал при получении радиосигнала запроса. К системам вторичной радиолокации [10], в том числе, бортовой аппаратуре, предъявляются следующие требования:

- генератор запросных сигналов
 - диапазон частот, ГГц — 0,4-1,2;
 - погрешность установки частоты, %, не более — 0,5;
 - выходная мощность на нагрузке 75 Ом, Вт — 10^{-3} -1;
- генератор импульсов
 - диапазон длительностей, мкс — 0,1-10;
 - частота повторения, Гц — 1-100000;
 - погрешность установки длительности на нагрузке 75 Ом, %, не более — 10.

На погрешность измерений с использованием СПБДМ, кроме параметров аппаратуры, оказывают влияние следующие факторы:

- метод модуляции передаваемых сигналов;
- затухание при распространении сигнала в пространстве и во времени;
- многократные переотражения;
- помеховый фон.

Диапазон частот считывателя для систем мониторинга должен быть согласован с Государственной комиссией по радиочастотам (ГКРЧ). Из имеющихся широко используемых диапазонов можно выделить диапазон частот 433 МГц и 915 МГц.

Мониторинг с использованием БПЛА предполагает, что радиус действия датчиков должен составлять более 100 м. Более точно минимальный радиус действия определяется подстилающей поверхностью. Для большинства задач мониторинга (измерение температуры, деформация трубопровода и т. д.) достаточно иметь погрешность от 0,5 до 1%.

Классификация датчиков физических величин

Для того, чтобы определить место, которое занимают датчики на динамических неоднородностях среди прочих датчиков, применяемых в системах дистанционного мониторинга, ограничимся их классификацией по сочетанию следующих классификационных признаков:

- по формированию энергии выходного сигнала (пассивные, полуактивные или активные);
- по методу измерения (прямое или косвенное);
- по способу передачи энергии входных сигналов (контактно или бесконтактно);
- по способу передачи энергии выходных сигналов (по проводам или без проводов);
- по видам энергетических преобразований.

По формированию энергии выходного сигнала различают пассивные, активные и полуактивные датчики.

Пассивным называется датчик, энергия выходного сигнала которого формируется только за счет энергии входного сигнала.

Активным называется датчик, энергия выходного сигнала которого формируется, в том числе, за счет энергии собственного источника питания.

Полуактивным называется датчик, который не содержит встроенного источника питания (батареек) и по этому признаку является пассивным, однако в его конструкцию внедрены диоды и транзисторы, что позволяет в качестве собственного источника питания

использовать накопитель внешней энергии — энергохарвестер.

Системы мониторинга с датчиками на полупроводниковых чипах используют полупроводниковые элементы для приема и выпрямления сигнала, посланного считывателем, а также, впоследствии, для декодирования сигнала и генерации отклика [11]. Функциональные блоки типичной радиометки на полупроводниковых чипах включают накопление энергии, вычисления и передачу радиосигнала. Особенностью радиометок на полупроводниковых чипах является то, что они должны содержать собственный источник постоянного тока.

Пассивные радиометки на полупроводниковых чипах должны получать энергию из радиочастотного сигнала запроса [12]. Выпрямитель преобразует высокочастотный сигнал в постоянный ток для накопления энергии в конденсаторе и, в конечном счете, для питания чипа. Считывание радиометки осуществляется по заранее определенному протоколу и возможно только тогда, когда достаточный уровень мощности постоянного тока поддерживается в течение всего цикла опроса. Поэтому минимальная критическая мощность (около 100 мкВт) должна непрерывно приниматься антенной радиометки в течение всего периода декодирования сигнала радиометки. Ниже этого порога сигнала выпрямление невозможно. Такое ограничение по мощности накладывается существующей элементной базой.

У радиометок на ПАВ, которые являются линейными пассивными устройствами, такого порога не существует. Они генерируют отклик на всех уровнях мощности, которые обычно на несколько порядков ниже, чем у радиометок на полупроводниковых чипах. Соответственно и потенциально достижимые дальности радиометок и датчиков на ПАВ при одинаковых мощностях существенно больше, чем у их полупроводниковых аналогов.

Контактные (локальные) измерения осуществляются с помощью чувствительных элементов датчиков. В системах мониторинга преимущественно используются дистанционные беспроводные измерения на основе радиочастотных датчиков.

Датчики на ПАВ преобразуют энергию электромагнитного поля в механическую энергию акустических волн в пьезоэлектрической пластине вначале в прямом направлении, а затем в обратном направлении. Так формируется выходной сигнал, содержащий информацию об изменении скорости распространения механических колебаний по поверхности пьезоэлектрической пластины [13].

Другой тип датчиков на динамических неоднородностях — это датчики на магнитостатических волнах. Магнитостатические волны возбуждаются в пленке током проводника, находящегося на поверхности магниточувствительной пленки. Эти волны формируют выходной сигнал, содержащий информацию об изменении скорости распространения магнитостатических колебаний по поверхности пленки и зависящий от формы пленки.

Фазовая скорость динамических неоднородностей (акустических и магнитостатических волн) много

меньше скорости света, что позволяет осуществлять значительную задержку выходного сигнала (временное разделение радиочастотных входного и выходного сигналов) без использования полупроводниковых элементов, катушек индуктивности и конденсаторов [14, 15].

Датчики на динамических неоднородностях имеют особые преимущества перед другими типами датчиков при решении ряда задач, в том числе специального назначения, для которых является актуальной задача надежных измерений в условиях ионизирующего излучения. Применение батареек питания, аккумуляторов и харвестеров ограничивает использование активных датчиков достаточно узким температурным диапазоном (от -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$) или делает их дорогостоящими.

Пассивные датчики на динамических неоднородностях получают энергию от считывателя, поэтому они не содержат встроенного источника питания (аккумуляторной батарейки), что позволяет использовать их неограниченное время и в более широком температурном диапазоне (от -60°C до более, чем $+85^{\circ}\text{C}$).

Важной характеристикой пассивных датчиков именно на ПАВ является устойчивость работы в условиях повышенной радиации и в широком температурном диапазоне (от -190°C до $+900^{\circ}\text{C}$ и выше). Только пассивные датчики на ПАВ можно использовать в жестких условиях радиации, так как их стойкость к гамма-излучению составляет до 50 Дж/г.

Анализ возможных вариантов создания пассивных беспроводных датчиков, предназначенных для работы в условиях экстремальных температур, радиационных и других воздействий, позволяет сделать вывод, что наиболее перспективными являются датчики, реализующие принципы функциональной электроники и, в частности, датчики на ПАВ.

Беспроводные технологии мониторинга

Классификация применений датчиков в беспроводных системах мониторинга

Пассивные беспроводные датчики могут применяться в следующих отраслях промышленности:

- в автомобильной промышленности могут найти применение датчики давления и температуры в шинах и камерах сгорания двигателей, измерения крутящего момента на валу двигателей и в электро-механическом усилителе руля [16, 17];
- в атомной промышленности применение датчиков температуры и давления позволяет проводить дистанционное беспроводное считывание информации о превышении пороговых значений для идентификации аварийных ситуаций, а также состояния объекта в реальном времени;
- в биологии и медицине могут применяться датчики температуры, давления, в том числе имплантируемые непосредственно в тело пациента;
- в пищевой промышленности и сельском хозяйстве могут найти применение датчики температуры, датчики влажности и точки росы при хранении и транспортировке продуктов, датчики газов и

жидкостей при изготовлении продуктов, а также датчики газового состава, включая датчики утечки рабочих газов холодильных установок;

- в строительстве — для идентификации состояний зданий и других сооружений, в том числе, жилого и нежилого назначений;
- в химической и нефтеперерабатывающей промышленности могут применяться датчики газов и жидкостей, температуры, а также датчики механических величин (давления, температуры, концентрации и т. д.) при производстве и синтезе химических веществ.

Отдельно следует выделить возможность применения пассивных беспроводных датчиков в космической области в условиях очень низких или очень высоких температур [18, 19].

Таким образом, к преимуществам ПАВ-датчиков следует отнести:

- большой радиус действия до 30 м;
- большой срок службы (более 25 лет);
- возможность работы в широком диапазоне температур; в зависимости от применяемых материалов диапазон рабочих температур может находиться практически в любой части интервала от -196°C до $+1000^{\circ}\text{C}$ (для лангаситов, лангататов);
- высокую прочность к действию радиации (до 100 крад);
- высокую стойкость к воздействию акустических шумов (до 160 дБ);
- высокую стойкость к механическим воздействиям, в том числе вибрационным;
- дистанционность (беспроводность);
- отсутствие элементов питания (батареек).

Во всех перечисленных применениях необходима идентификация состояний объектов в процессе их перемещения, складирования и хранения, поскольку логистика является неотъемлемой частью практически любого бизнес-процесса, в том числе в специальных применениях [20].

Использование пассивных беспроводных датчиков на ПАВ позволяет маркировать и в дальнейшем контролировать местонахождение и физические параметры объектов окружающей среды, а также товаров, тары, транспорта и любых других объектов.

Использование пассивных датчиков на ПАВ целесообразно также для защиты от кражи запчастей и объектов с высоким уровнем радиации в местах хранения.

В качестве дополнения к существующей системе спутниковой ориентации Глонасс, которая может быть выведена из строя еще до возникновения чрезвычайной ситуации, можно использовать систему геодезических радиометок на ПАВ, каждая из которых будет поставлена в соответствие одной определенной точке в пространстве координат в стратегически важных районах страны. Такие радиометки на ПАВ могут быть размещены на хорошо заметных природных и рукотворных объектах, а также на метеостанциях, геодезических вышках, на столбах линий электропередачи, в окрестностях отдельно стоящих зданий и сооружений, на садовых участках и печных трубах жилых домов.

Геодезические радиометки на ПАВ в чрезвычайных ситуациях позволяют оперативно уточнять свои координаты пролетающим над ними БПЛА.

Основными критериями качества датчиков на динамических неоднородностях являются их чувствительность и дальность действия.

Обзор достигнутых чувствительностей датчиков на ПАВ к измеряемым величинам был выполнен в работе [21].

Метки на ПАВ уже к 2013 г. достигли дальности действия до 20 м, что в мирное время позволяет с вертолета считывать информацию, например, о появлении новых объектов недвижимости на конкретном земельном участке или рядом с ним. Размещение геодезических радиометок на ПАВ может быть совмещено с размещением датчиков радиации на ПАВ, что позволит получать оперативную информацию о координатах и уровне радиационного заражения местности.

Датчики температуры и газоанализаторы на ПАВ позволят своевременно получать привязанную к координатам информацию о возникновении пожаров, задымлении местности, концентрации и перемещении дымовых завес. Условия работы датчиков температуры и газоанализаторов отличаются невысокой вероятностью возникновения и возможностью воздействия высоких температур при пожаре, что делает нецелесообразным применение недолговечных и не пригодных к работе в условиях пожара полупроводниковых устройств, в том числе, на харвестерах.

Перспективным направлением развития датчиков на ПАВ является их включение в сенсорные сети, т. е. вместо пассивных меток, которые просто хранят в себе ту или иную информацию, сенсорные сети могут использоваться для контроля и записи параметров окружающей среды (температуры, давления, скорости ветра, химического состава) в местах хранения и возможного применения опасных объектов. Например, для мониторинга состояния и поддержания необходимых запасов в больших емкостях со сжиженным газом, состояния атмосферы в подземных хранилищах на основных площадках их размещения. Сенсорные сети на основе датчиков на ПАВ, закрепленных на объектах с повышенной радиацией, позволяют осуществлять дистанционный мониторинг местонахождения и безопасности состояния не объектов вообще, а именно спецобъектов.

Сенсорные сети на основе датчиков на ПАВ, покрывающих практически всю поверхность спутника, позволят измерять величины и направления физических воздействий (механических, электромагнитных, лазерных) на космические аппараты, на которых эти датчики закреплены.

Для построения системы сейсмического контроля актуальной является задача выявления и контроля движения людей и транспортных средств в отдаленных районах. Эта задача может быть решена с применением высокочувствительных сейсмических датчиков нового поколения. Для этого необходимо с помощью специальных разведывательных групп или авиации установить на подконтрольной территории пассивные сейсмические датчики на ПАВ нового по-

коления. Сигналы от таких сейсмических датчиков могут быть получены по запросу с расстояния до сотни метров, что вполне достаточно для их приема приемопередатчиком, установленным на борту БПЛА.

Сейсмические датчики позволяют организовать круглосуточное и круглогодичное выявление несанкционированного пересечения границ, нахождения, в том числе, в укрытиях, и передвижения на подконтрольной территории террористических и других преступных групп и техники.

Для повышения эффективности целеуказания сейсмические датчики могут разрабатываться с учетом различных условий их применения, что дает возможность получать следующие сведения:

- вид подлежащих обнаружению объектов (тяжелые, легкие, техника, люди — все они возбуждают различные сейсмические волны);
- пространственные особенности решаемой задачи (полный или частичный контроль области или границы);
- метод развертывания (ручной, выстреливание сейсмических датчиков с БПЛА, из миномета, пусковой ракетной установки, винтовки);
- долговременность развертывания (постоянный или мобильный вид развертываемой системы сейсмического контроля и целеуказания).

Учет указанных особенностей применения сейсмических датчиков для системы сейсмического контроля позволяет решить задачу их проектирования и производства в соответствии с наилучшим отношением цена/качество.

Таким образом, основными областями применения пассивных беспроводных датчиков на ПАВ являются системы дистанционного мониторинга: мониторинг напряженно-деформируемого состояния строительных конструкций (зданий, сооружений, мостов, туннелей и т. д.), измерение параметров высокоскоростных объектов (автомобилей, вертолетов, летательных аппаратов других типов и т. д.), измерение физических величин и задача идентификации в экстремальных условиях (наличие радиации, высоких или низких температур).

Выбор структуры системы беспроводного мониторинга

Комбинируя логические цепочки из физических эффектов, используемых для дистанционного измерения физических величин, можно найти несколько возможных вариантов реализации беспроводной связи, однако системный подход требует решать задачу выбора того из возможных вариантов, который является оптимальным. В частности, если в качестве критерия оптимальности принять величину, обратную длине логической цепочки преобразований энергии в процессе приема-передачи, то оптимальным оказывается выбор решения, состоящего из одного преобразования: «излучение – отражение».

Однако при использовании отражения звукового или радиосигнала можно получить информацию только о наличии или отсутствии объекта; при использовании отражения оптического сигнала получаем

информацию и об изменении параметров формы или параметров приповерхностного слоя объекта.

Возможности получения отраженных звуковых и оптических сигналов ограничены атмосферными условиями при выполнении мониторинга, т.е. пыль, туман и экранирующие предметы могут значительно повлиять на результаты мониторинга. При этом сигналу ПАВ-датчика можно придать такую форму, чтобы он принципиально отличался от сигнала, отраженного от объектов окружающей среды.

Поэтому даже в случае использования только одного преобразования (эффекта отражения) более эффективными оказываются радиочастотные средства мониторинга на основе динамических неоднородностей.

Высокая информативность такого варианта мониторинга обеспечивается благодаря извлечению информации о следующих параметрах чувствительного пьезоэлектрического элемента:

- форма поверхности;
- механическая напряженность приповерхностного слоя;
- скорость распространения ПАВ и распределение скоростей вдоль траектории распространения ПАВ;
- частота собственных колебаний чувствительного элемента.

Два элемента логической цепочки преобразований в чувствительных элементах на ПАВ реализуются с использованием прямого и обратного пьезоэлектрических эффектов [22].

Если в качестве критерия информативности выбрать количество информативных параметров, а в качестве критерия сложности принять количество преобразований формы или вида энергии при мониторинге, то наиболее эффективной по критерию информативность/сложность оказывается технология мониторинга на основе радиочастотных датчиков на ПАВ.

В настоящее время несколько зарубежных фирм серийно выпускают датчики и радиометки на ПАВ: Baumer Ident GmbH (ФРГ), RF SAW (США), System Sensor (США), Sensor Technology Ltd. (Великобритания), Vectron (США) и др.

Методы измерения и идентификации на основе ПАВ-технологий

Первые попытки создания датчиков на ПАВ были предприняты в 1960-1970-е гг. [23, 24]. При этом основное внимание исследователей в области ПАВ-датчиков было сконцентрировано на ограниченном количестве типов топологических решений.

Одним из наиболее востребованных направлений при проектировании датчиков (температуры, деформации, влажности) на ПАВ является использование резонаторов, например, в работах В. В. Новикова, А. С. Багдасаряна, В. А. Калинина.

Фирма Senseog серийно выпускает датчики на ПАВ на основе резонаторов в диапазоне 434 МГц (433,05 МГц, 434,79 МГц, European ISM band) [25, 26]. В Российской Федерации требования к вторичным

радиолокаторам (в рассматриваемом случае — к считывателям) определяются федеральными авиационными правилами. В качестве зондирующих сигналов используется последовательность радиосигналов длительностью до 100 мкс и центральными частотами с шагом 5 кГц. Малый шаг квантования по частоте обеспечивает увеличение точности датчика. Длительность ответного сигнала составляет около 20 мкс. Первичным чувствительным элементом является высокочастотный одноходовый резонатор на ПАВ ($Q=13300$). Если рассматривать изменение частоты резонатора при внешних воздействиях на уровне 0,1%, что составляет для частоты 433 МГц около 400 кГц, то для полного зондирования всего диапазона будет необходимо около 100 запросных сигналов. Это приводит к существенному уменьшению быстродействия системы мониторинга.

Кроме того, при конструировании резонаторов разработчик существенно ограничен в выборе пьезоматериалов (используется, как правило, кварц). Например, ниобат лития, имеющий большой коэффициент электромеханической связи (КЭМС), но преобразующий на статических неоднородностях часть энергии ПАВ в другие виды акустических волн, в частности в объемные акустические волны (ОАВ). Это существенно для резонаторных схем, но не существенно для большинства линий задержки.

Поэтому уже первые попытки применения ПАВ-технологии для проектирования датчиков были связаны и с линиями задержки. Например, Б. Н. Яковкин впервые в России выполнил исследования радиометок на ПАВ на основе времяпозиционного метода кодирования, реализованного по технологии линии задержки.

Измеряемым параметром в устройствах на основе линий задержки является время задержки. Наиболее точным способом измерения времени задержки в настоящее время являются фазовые методы, которые могут обеспечить точность на уровне 0,1 град. Однако погрешность бесконтактного дистанционного (по радиоканалу) измерения фазы при незначительном превышении сигнала над шумами будет не менее 0,5 нс при однократном измерении, что на частоте 433 МГц эквивалентно изменению фазы более чем на 60 град.

Таким образом, основным недостатком датчиков на основе линий задержки при дистанционных измерениях времени задержки является низкая точность фазовых беспроводных измерений. Увеличение точности таких измерений фазового сдвига предполагает увеличение отношения сигнал/шум, а это, в свою очередь, ведет к уменьшению дальности.

Существенный вклад в развитие теории и практики применения линий задержки для измерения физических величин внес L. Reindl, который показал возможность увеличения чувствительности датчиков на основе дисперсионных линий задержки.

При использовании дисперсионных структур, как правило, в качестве запросного сигнала используется радиоимпульс с линейной частотной модуляцией.

Можно выделить несколько вариантов технологий использования дисперсионных линий задержки, в каждом из которых осуществляется:

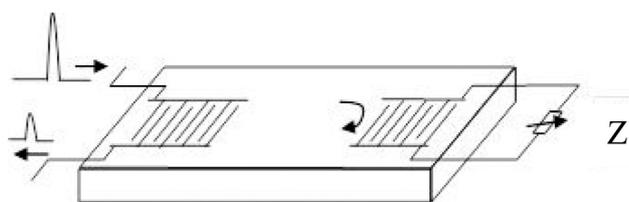


Рис. 3. Схема измерения внешнего аналогового сигнала

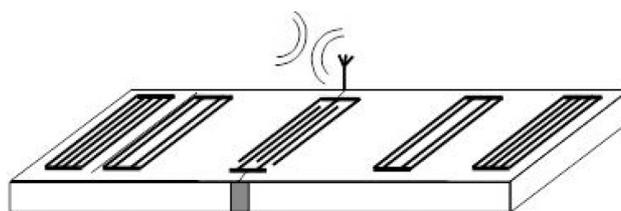


Рис. 4. Схема датчика с кодом на ортогональных частотах

- сжатие (увеличение частоты) запросного сигнала;
- двойное преобразование запросного сигнала: применяются запросные ЛЧМ-сигналы с возрастающей во времени частотой, а переизлученный ответный сигнал имеет убывающую во времени частоту;
- преобразование свертки запросного сигнала и импульсной переходной функции ПАВ.

Во всех указанных случаях частотно-модулированный запросный сигнал (например, ЛЧМ) излучается считывателем и принимается ПАВ-устройством (датчиком или радиометкой).

Длительность запросного ЛЧМ сигнала составляла 100 нс, центральная частота 1 ГГц, девиация частоты 500 МГц. Встречно-штыревой преобразователь (ВШП) имел 100 пар электродов и примерно 400 мкм длины при апертуре 75 мкм. Вносимые потери составили не менее 20дБ, причем общая длина пьезоплаты не превышала в эксперименте 1,1 мм, что существенно меньше аналогов.

Отдельно следует выделить датчики на ПАВ с внешней нагрузкой. Измерение внешнего аналогового сигнала осуществляется подключением к отражающим структурам дополнительного импеданса (рис. 3). При изменении величины нагрузки коэффициент отражения ПАВ от ВШП изменяется. Это приводит к изменению величины и фазы отраженного радиосигнала, что позволяет оценить величину нагрузки, а по ней и величину исследуемого параметра.

Группа исследователей из University of Central Florida под руководством D. Malocha предложила вариант реализации корреляционно-экстремального подхода применительно к ПАВ-радиометкам и датчикам, который авторы назвали кодированием ортогональными частотами [Orthogonal Frequency Coding (OFC)].

Схема датчика приведена на рис. 4.

Импульсная переходная функция датчика меняется под действием внешних факторов (например, температуры). Принятый от датчика сигнал (близкий

к импульсной переходной функции) сравнивается с эталонными сигналами, хранящимися в памяти считывателя. В качестве эталонных сигналов используются сигналы, полученные в результате градуировочной процедуры: при заданной величине внешнего воздействия измеряется отклик датчика на запросный сигнал. Сравнение осуществляется по взаимокорреляционным функциям. Решение о величине измеряемого параметра принимается по номеру эталонного сигнала, обеспечивающего максимальное значение взаимокорреляционной функции. Основные характеристики разработанной системы дистанционного мониторинга представлены в табл. 1.

Область применения таких систем ограничивается разрешенными ГКРЧ диапазонами частот. Кроме того, малая энергия запросного сигнала предполагает использование когерентного накопления, что усложняет обработку сигналов и уменьшает быстродействие. Экспериментальный образец, использующий OFC-технологии, имеет дальность не более 1,2 м и основную относительную приведенную погрешность не менее $\pm 2,5\%$.

Таким образом, все упомянутые варианты датчиков на ПАВ имеют дальность не более 10 м.

В случае, когда в зоне действия считывателя находится несколько объектов с радиодатчиками, в многоадресных системах передачи информации используются различные «антиколлизийные» методы, например, применяются шумоподобные сигналы с различными типами модуляции. В системах радиочастотной идентификации на ПАВ также могут быть использованы стандартные методы пространственного, частотного и кодового разделения сигналов.

Проведенный анализ показывает, что существующие беспроводные системы на основе датчиков и радиометок, использующих физический эффект распространения ПАВ, имеют ограничения по дальности действия и точности, сужающие область их применения. Преодоление этих недостатков возможно

Таблица 1

Основные характеристики системы дистанционного мониторинга на ПАВ

№	Характеристики системы	Параметры	Значения
1.	Основные характеристики системы	Центральная частота	915 МГц
		Полоса частот приемника	95 МГц
2.	Характеристики запросных сигналов	Частота заполнения радиои импульса	915 МГц
		Длительность радиои импульса	10 нс
		Импульсная мощность	1 Вт
3.	Характеристики ПАВ-устройства	Апертура	377 мкм
		Вносимые потери	не менее 20дБ
		Начальная задержка	1 мкс

на основе оптимизации структуры (топологии) ПАВ-устройств по следующим критериям качества:

- чувствительность к изменению информационного параметра;
- дальность действия беспроводного дистанционного мониторинга;
- погрешность измерения при заданной достоверности.

Ограничениями при оптимизации могут служить быстродействие системы, максимальная импульсная мощность и средняя излученная мощность. Большинство современных устройств удовлетворяет ограничению на длительность сигнала 1 мс (тактовая частота 1000 Гц).

Таким образом, на основе исследования различных вариантов реализации пассивных беспроводных датчиков можно сделать вывод, что фактически единственной реализованной в производстве эффективной технологией беспроводных измерений с использованием пассивных датчиков является технология ПАВ.

Перспективы развития

Основным направлением совершенствования систем мониторинга на основе радиометок и датчиков на ПАВ является повышение дальности их действия.

Дальность действия системы мониторинга зависит от дальностей действия их основных элементов — считывателя и датчика (радиометки).

Дальность действия считывателя (дальность считывания сигнала датчика) определяется мощностью запросного сигнала передатчика, чувствительностью приемника считывателя и отношением сигнал/шум, а со стороны датчика — эффективностью переизлучения запросного сигнала и его информативностью. Мощность сигнала датчика должна быть не менее чувствительности приемника считывателя, а информативность сигнала датчика (определяемая топологией отражающих структур) совместно с программным обеспечением считывателя должны позволять в достаточной мере снижать пороговое значение отношения сигнал/шум.

Именно поэтому основные работы по повышению дальности действия радиометок и датчиков на ПАВ в последние годы направлены на разработку моделей формирования сигналов датчиков в зависимости от их топологий и на совершенствование программного обеспечения считывателей.

Список использованных источников

1. ГОСТ Р 22.1.12-2005. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений.
2. СП 11-107-98. Порядок разработки и состав раздела «Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны. Мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций проектов строительства».
3. Как правильно выбрать средства для мониторинга промышленного оборудования / Краткое начальное руководство по средствам и методам мониторинга состояния (Condition Monitoring) Издано компанией «SKF Condition Monitoring». 2012.

Для справки. АО «НПП «Радар ммс» — предприятие радиоэлектронной промышленности является одним из лидеров в области создания авионики, систем мониторинга и навигации, специального оборудования с использованием СВЧ и цифровой техники, точного приборостроения, сложного программного обеспечения. Разрабатывает и производит изделия микроэлектроники и микросистемной техники с использованием нанотехнологий, метеорологические комплексы, беспилотные летательные аппараты. Продукция предприятия конкурентоспособна, пользуется огромным спросом не только в России, но и за рубежом.

197375, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д.37. Тел.: +7 (812) 777-50-51; факс: +7(812) 600-04-49.

E-mail: radar@radar-mms.com; http://www.radar-mms.com.

4. В. В. Коннов, И. В. Глушаков, И. А. Куц, А. В. Конов. Опыт работы компании по обеспечению промышленной безопасности опасных производственных объектов. М.: ЗАО ННЦ «МОЛНИЯ», 2013.
5. И. Г. Анцев. Пассивные беспроводные системы мониторинга на ПАВ. Четвертая научно-практическая конференция «Инновационные технологии и технические средства специального назначения», Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, 13-14 октября 2011 г.
6. С. Е. Ададуров, Н. Н. Лябах, А. Н. Шабельников, В. А. Шабельников. Патент № 2450346 РФ, G06F17/40 (2006.01), B61L27/00 (2006.01). Система мониторинга потенциально опасных объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта. Патентообладатель: Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (ОАО «НИИАС»). № заявки 2011128056/08, 08.07.2011, приоритет 08.07.2011, опубликовано: 10.05.2012.
7. M. Cardullo, W. L. Parks. Transponder apparatus and system. U. S. Patent no. 3713148. 1973.
8. В. В. Ростопчин. Современная классификация беспилотных авиационных систем военного назначения. ООО «Техкомтех». http://www.uav.ru.
9. В. Воронков. Комплексная система мониторинга объектов ОАО «Газпром» с помощью БЛА. ФНПЦ «НефтеГазАэроКосмос». http://www.uav.ru.
10. ГОСТ 25620-83 (СТ СЭВ 3412-81) Системы вторичной радиолокации для управления воздушным движением. Методы измерений основных параметров.
11. P. H. Cole, R. Vaughan. Electronic surveillance system. U. S. Patent no. 3706094. 1972.
12. M. Epstein. Passive transponders using acoustic surface wave devices. U. S. Patent no. 4059831. 1977.
13. L. Reindl, G. Scholl, T. Ostertag, H. Scherr, U. Wolff, F. Schmidt. Theory and application of passive SAW radio transponders as sensors // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 45, 1998.
14. R. C. Woods. Dispersive delay lines using 180 reflecting metal dot arrays // Proc. 1982 IEEE Ultrasonics Symposium, 1982.
15. S. M. Balashov, V. P. Plessky, C.-U. Kim, C.-W. Nam, V. I. Grigorievsky. Dispersive delay lines based on the use of narrow open metal reflectors and fan transducer // Proc. 2005 IEEE Ultrasonics Symposium, 2005.
16. A. Pohl, G. Ostermayer, L. Reindl, F. Seifert. Monitoring the tire pressure at cars using passive SAW sensors // Proc. IEEE Ultrason. Symp., Toronto, 1997.
17. A. Pohl, R. Steindl, L. Reindl, F. Seifert. Wirelessly interrogable sensors for different purposes in industrial radio channel // Proc. IEEE Ultrason. Symp., Sendai, Japan, 1998.
18. P. Brown, P. Hartmann, A. Schellhase, A. Powers, T. Brown, C. Hartmann, D. Gaines. Asset tracking on the International Space Station using Global SAW tag RFID technology // Proc. 2007 IEEE Ultrasonics Symposium, 2007.
19. B. Lee, H. Kim. Design and implementation of a secure IBS platform using RFID and sensor network, in Proc. 2006 IEEE Tenth International Symposium on Consumer Electronics, 2006.
20. S. Shepard. RFID Radio Frequency Identification. New York: McGraw-Hill, 2005.
21. G. Fischerauer. Surface Acoustic Wave Devices / W. Gopel, J. Hesse, J. N. Zemel, I. Meixner, R. Jones (Eds.) // Sensors. A Comprehensive Survey, Vol. 8. Weinheim: VCH, 1995.
22. R. M. White, F. W. Voltmer. Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves. Appl. Phys. Lett. 7, 1965.
23. J. H. Collins, H. M. Gerard, T. M. Reeder, H. J. Shaw. Unidirectional surface wave transducer. Proc. IEEE 57, 1969.
24. F. G. Marshall, E. G. S. Paige. Novel surface-acoustic-wave directional coupler with diverse applications // Electron. Lett. 7.
25. W. Buff and co-authors. Remote Sensor System Using Passive SAW Sensors. Proc. 1994 Ultrasonic's Symp.
26. M. Hamsch, R. Hoffmann, W. Buff, M. Binhack, S. Klett. An Interrogation Unit for Passive Wireless SAW Sensors Based on Fourier Transform. IEEE Trans. UFFC, 2004.

Development of monitoring systems on the basis of tags and sensors based on surface acoustic waves

I. G. Antcev, PhD, Executive Director, JSC «Scientific-Production Enterprise «Radar mms», St. Petersburg. **S. V. Bogoslovsky**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the scientific complex, JSC «Scientific-Production Enterprise «Radar mms», St. Petersburg.

There are presented the objectives, tasks and composition of hard and soft ware of monitoring systems. It is given the classification of remote monitoring systems based on passive wireless monitoring sensors. It is performed the analysis of the wireless remote monitoring systems. There are considered the methods of measurement and identification on the basis of surface acoustic wavetechnologies.

Keywords: monitoring system, surface acoustic waves, passive wireless sensor.