

БЕСКОНТАКТНОЕ ДАЛЬНЕПОЛЕВОЕ НЕДЕСТРУКТИВНОЕ СКАНИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУР И СРЕД РАДИОЧАСТОТНЫМ «МАГНИТНО-ПОЛЕВЫМ» SFCO ЗОНДОМ – НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

А.С. ХАЧУНЦ^{1*}, С.Г. ГЕВОРГЯН², Г.С. ГЕВОРГЯН², С.А. ХАЧУНЦ²

¹Институт физиологии им. Л.А. Орбели НАН Армении, Ереван, Армения

²Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: aleks.khach@gmail.com

(Поступила в редакцию 8 августа 2019 г.)

Обсуждается возможность применения нового класса SFCO-сенсоров (радиочастотных «магнитно-полевых» зондов) для бесконтактного дальнеполевого неdestructивного сканирования различных структур и сред. Показана перспективность их использования как для выявления структурных дефектов сканируемых объектов, так и для изучения тканей и сред организма «in vivo».

1. Введение

В конце 90-х годов в Армении была создана новая высокочувствительная измерительная методика, в которой в качестве чувствительного элемента (сенсора) используется маломощный автогенератор на однослойной плоской катушке (ПК) [1]. Она легла в основу решения актуальных задач экспериментальной физики. В частности, созданные на базе этого метода низкотемпературные измерители уже продемонстрировали свои уникальные возможности как при выявлении и изучении слабовыраженных особенностей физических свойств высокотемпературных сверхпроводников [2–7], так и для повышения разрешения детекторов элементарных частиц и ионизирующих излучений [1]. Эта методика быстро переросла в оригинальную технологическую платформу, названную впоследствии SFCO технологией (a Single-layer Flat-Coil-Oscillator technology), которая способствовала повышению чувствительности детектирующей техники в сейсмологии, геофизике [8–10], а также разработке диагностической техники в физиологии, биофизике и медико-биологических исследованиях [11–13].

Все созданные до сих пор разновидности SFCO-сенсоров можно разделить на два основных класса. Первый класс – прецизионные сенсоры с колебательной системой, включающие несколько типов: позиционный сенсор (датчик положения, скорости, ускорения), вибрационный сенсор (виброфон, сейсмичес-

кий сенсор), акустический сенсор (микрофон, гидрофон) и прецизионный датчик дифференциального давления. Перспективность использования вибрационных и вибро-акустических SFCO-сенсоров при изучении сигналов биологических объектов была обсуждена нами ранее [11–12]. Второй класс – сенсоры без колебательной системы, представленные на данный момент тремя типами: безынерционный (из-за малой массы) термодатчик с высоким разрешением (~ 1 мкК), нановаттный измеритель добротности/поглощения (Q-meter) и радиочастотный «магнитно-полевой» (РЧ–МП) зонд [7,14].

Физические принципы работы SFCO-сенсоров основаны на изменении частоты и/или амплитуды измерительного генератора, запускаемого маломощным обращённым туннельным диодом (ТД). В сенсорах с колебательной системой сдвиг частоты обусловлен деформацией силовых линий РЧ измерительного поля ($F \sim 10\text{--}50$ МГц) у поверхности приёмной катушки измерительного генератора в ответ на приближение или удаление металлической (например, медной) пластины колебательной системы [8–13] (см., например, Рис.1 в [12]) за счёт токов Фуко (Eddy currents), наводимых этим же полем в пластине. Для сенсоров второй группы механизмы изменения частоты и/или амплитуды измерительного генератора другие. SFCO-термосенсор обеспечивает почти линейный сдвиг частоты генератора из-за прогрева/охлаждения самой приёмной плоской катушки,

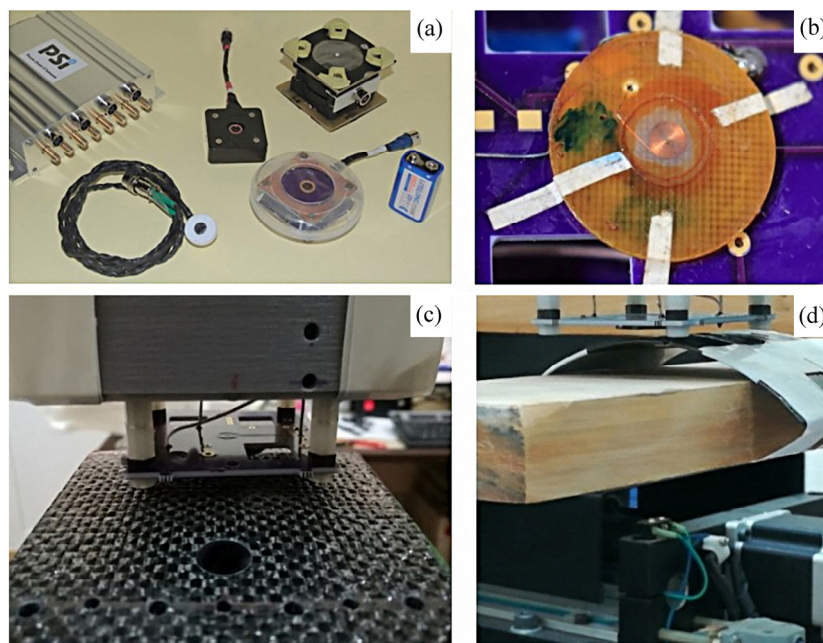


Рис.1. Радиочастотные «магнитно-полевые» SFCO-зонды (а, б) – чувствительный элемент дальнеполевых неdestructивных бесконтактных систем сканирования различных структур и сред (с, d). Различные конструкции «магнитно-полевых» SFCO-зондов и четырёхканальная измерительная электроника (а).

выступающей в роли прецизионного терморезистора в цепи колебательного контура. В случае «магнитно-полевого» зонда механизмы изменения частоты и амплитуды измерительного генератора могут быть разными. В диэлектрической среде одним из наиболее вероятных механизмов следует считать поглощение средой энергии поля измерительной катушки из-за «навязанной» переориентации дипольных структур изучаемой среды РЧ полем автогенератора, другим – перенос свободных зарядов в изучаемой структуре или среде, и наконец дополнительными факторами, приводящими к изменению частоты и/или амплитуды измерительного автогенератора могут быть также и механизмы, изложенные выше для сенсоров первого класса.

Уже показана возможность реализации нового типа микроскопов на базе МП SFCO-зонда в дополнение к (а в ряде случаев и взамен) туннельным и атомно-силовым микроскопам [7, 14]. Причём, в отличие от последних, SFCO-микроскоп имеет нетвердотельный зонд дальнего поля, что обеспечивает ряд преимуществ при сканировании поверхности образцов. Следует отметить, что в таких микроскопах мощность РЧ поля у поверхности изучаемого объекта крайне мала и может составлять (в зависимости от задачи и настройки) от 1 нВт до 10 мкВт при диаметре ПК ~8 мм [5]. В то же время показано высокое пространственное разрешение МП зонда (~1 мкм) при сканировании гребёнки, состоящей из тонких металлических проволок [7, 14]. На данный момент диаметр изученных катушек SFCO-сенсоров охватывает диапазон от 1 мм до 1 м. Соответствующая настройка генератора позволяет «вынести» наиболее чувствительную «иглообразную» зону РЧ магнитного поля МП зонда на расстояние 20–25 см от поверхности катушки уже при диаметре приёмной катушки ~8 мм. Это весьма заманчиво в плане использования SFCO-зондов в исследованиях биологических объектов и сред в связи с возможностью невозмущающего (ввиду крайне малой энергии поля) дистантного (бесконтактного) изучения [13, 14].

Целью работы является изучение возможности использования РЧ–МП зондов для бесконтактного дальнеполевого неdestructивного сканирования различных структур и сред (Рис.1).

2. Условия и методы исследований

Сканирование объектов исследований осуществлялось радиочастотным «магнитно-полевым» SFCO-зондом с приёмной плоской катушкой (ПК) размером ~3 мм, закрепленным на устойчивой треноге, позволяющей подстраивать положение сенсора в трёх координатах для обеспечения параллельности плоскостей приёмной катушки и поверхности сканируемого объекта, а также выставлять требуемую дистанцию (h) между сканируемым объектом и сенсором. Расстояние h от плоскости катушки МП зонда до поверхности сканируемого

объекта составляло 3–7 мм (в зависимости от размеров объекта сканирования). Сканируемый объект фиксировался на двухкоординатном столике, приводимом в движение двумя шаговыми двигателями, управляемыми программно (с помощью программного обеспечения Mach3). Фактически, собранная установка сканирования обеспечивала перемещение объекта сканирования по осям «X», «Y», в то время как сканирующая детекторная «головка» – МП SFCO-зонд – неподвижно фиксировалась по оси «Z» на требуемой высоте от поверхности изучаемого объекта. Скорость перемещения объекта относительно сканирующего зонда по треку сканирования составляла 2, 3 или 5 мм/сек (в зависимости от размеров объекта сканирования), что с учётом частоты дискретизации (1000 Гц) обеспечивало разрешение 500, ~333 и 200 измерений в одном миллиметре соответственно. Последовательные треки сканирования программно сдвигались на 0.2 мм либо 0.3 мм, формируя разрешение сканируемой структуры/объекта по поперечной оси 5 или 3.3 измерений в 1 мм. Сигналы от МП-зонда подавались на специальный быстродействующий восьмиканальный частотомер SFFM-8 – для счёта и обработки поступающей информации. Измеренные данные поступали в персональный компьютер и регистрировались разработанным фирмой PSI в среде LabView (National Instruments, USA) виртуальным прибором (программой). Частотомер регистрировал частоту измерительного генератора (ИГ) со скоростью 1000 измерений в секунду, т.е. динамические процессы в результате наших измерений оценивались с временным шагом в 1 мсек. Точность считывания частоты составляла $\pm 2\text{--}3$ Гц, что существенно ниже уровня собственных шумов ИГ (± 100 Гц). Дополнительная обработка измеренных данных производилась с помощью программ Diadem (National Instruments) и MatLab (MathWorks Inc., USA). Цифровая обработка данных проводилась как методами цифровой фильтрации сигналов и Фурье-преобразования [15], так и с помощью эмпирической модовой декомпозиции (Empiric Mode Decomposition – EMD) для разложения сигнала на собственные модовые функции [16–17]. Из полученных треков сканирования после цифровой обработки сигналов формировались двумерные матрицы карт сканируемых образцов. Значение каждого элемента матрицы должно отражать величину абсорбции энергии электромагнитного поля SFCO-зонда в соответствующей координате сканируемой зоны.

3. Результаты и их обсуждение

Для тестирования «магнитно-полевого» зонда в качестве сканирующего устройства был использован образец из композитного материала (Рис.2), широко используемого в качестве конструкционного материала в космических станциях и спутниках ввиду его уникальных свойств: высокой прочности и малой массы. Образец толщиной ~17 мм отличается сложной структурой – между двумя

слоями композитного пластика (толщиной ~ 1 мм и ~ 4 мм) расположен толстый слой плотно компонованной гофрированной алюминиевой фольги (толщиной ~ 12 мм, Рис.2с).

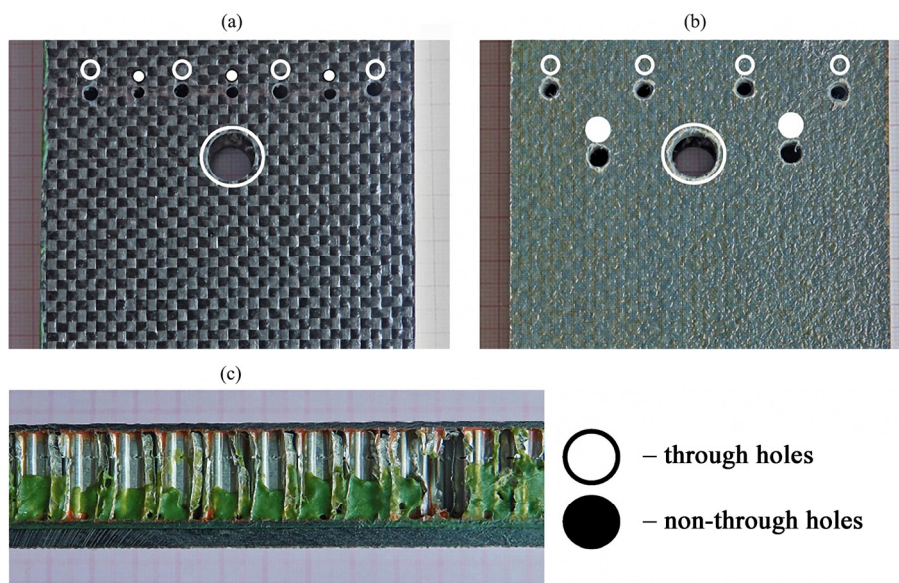


Рис.2. Образец из композитного материала, подготовленный к сканированию SFCO МП-зондом. Лицевая, обращённая к сканирующему сенсору (а), обратная (b) и боковая (с) поверхности объекта, имеющего сложную структуру. На рисунках а и b представлена лишь область сканирования объекта. Кольцевые метки указывают на места сквозных отверстий, круговые метки – места несквозных отверстий. Остальные пояснения в тексте.

Для получения надёжных результатов до сканирования тест-образец был специально подготовлен к проведению сканирования. Для этого в зоне сканирования образца было просверлено сквозное отверстие (Рис.2а,б) диаметром $d = 10$ мм. Кроме этого, в зоне сканирования были просверлены в ряд четыре сквозных (Рис.2а) отверстия ($d = 3$ мм), перемежающихся тремя несквозными ($d = 2.5$ мм, глубина – 13 мм) до нижнего композитного слоя (Рис.2с), дополнительно, по бокам большого сквозного отверстия ещё два несквозных отверстия (Рис.2b) с обратной стороны тест-объекта ($d = 4$ мм, глубина – 16 мм) до верхнего композитного слоя (Рис.2с). Таким образом, просверленные отверстия разного диаметра и типа представляли собой контролируемые искусственные дефекты в структуре объекта, которые предстояло детектировать в процессе сканирования радиочастотным «магнитно-полевым» SFCO-зондом.

Прежде чем перейти к полученным данным отметим, что измерительные приборы на основе SFCO технологии, как правило, состоят из 2-х автогенераторов на ТД, один из которых является измерительным (у поверхности плоской

катушки которого располагают изучаемый объект), а другой – опорным [3–4]. Такой дизайн сенсора позволяет избегать приборных эффектов, упростить электронику и повысить точность измерений. Исходя из сказанного понятно, что сканирование образцов будет приводить к изменению значения разности частот опорного (reference) и измерительного (measuring) генераторов, а именно $\Delta F = F_{\text{ref}} - F_{\text{meas}}$. При этом, параметры опорного генератора остаются неизменными при измерениях.

В случае использованного тест-образца прогнозировался комплексный характер регистрируемой динамики разностной частоты МП-зонда, сочетающий одновременно как механизм поглощения энергии РЧ электромагнитного поля зонда, так и механизм экранирования этого же поля токами Фуко, наводимыми самим тестирующим РЧ полем зонда в среднем слое толщиной 12 мм, представляющем гофрированную плотно упакованную металлическую фольгу (Рис.2с).

ЭКСПЕРИМЕНТ 1 (Рис.3). В предшествующей публикации [13] показана возможность регистрации SFCO МП-зондом диэлектрических, магнитных и проводящих (экранирующих) свойств биологических тканей и сред, обоснована перспективность применения этих зондов для биомедицинских исследований. Опираясь на эти результаты, нами, прежде всего, предпринята попытка сканирования биологических тканей и сред. В силу ограничений технического характера наиболее удобным участком организма для сканирования явились концевые и средние фаланги II–IV пальцев руки (Рис.3а) одного из авторов этой статьи. Результаты сканирования после цифровой обработки сигналов представлены на рисунках 3б,с. Для наглядности на Рис.3д карта сканирования наложена на схематическое анатомическое изображение костных структур II–IV пальцев, соответствующих области сканирования. Прохождение МП-зонда над костными структурами пальцев сопровождается максимальным поглощением энергии электромагнитного поля зонда, и, наоборот, при сканировании межпальцевых зон, в которых толщина слоя сканирования мягких тканей мала даже при тесном прилегании пальцев друг к другу, прослеживается низкий уровень поглощения энергии измерительного зонда (Рис.3б,с). Эти результаты позволяют утверждать, что сканирование SFCO МП-зондом представляет собой новый метод визуализации биологических сред и структур, основанный на оценке их диэлектрических, магнитных и проводящих характеристик в каждой точке сканирования в силу изменений разностной частоты ΔF осциллятора сканера, обусловленной конкретным уровнем поглощения энергии МП-зонда.

ЭКСПЕРИМЕНТ 2 (Рис.4). Сканирование образца, имеющего сложную структуру (Рис.4д), также подтверждает высокое пространственное разрешение используемого метода зондирования. Поскольку при поперечном сканировании зона сканирования была больше ширины объекта, с обеих сторон объекта были

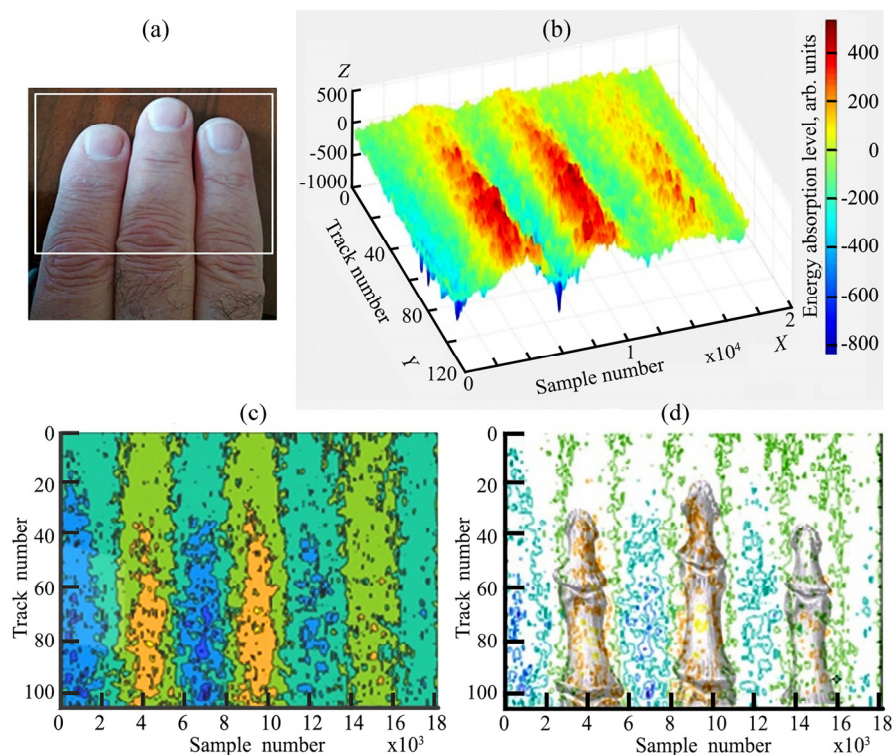


Рис.3. Динамика абсорбции (поглощения) энергии РЧ электромагнитного поля измерительного SFCO МП-зонда при сканировании концевых фаланг II–IV пальцев руки: (а) – участок сканирования очерчен белой рамкой, (б) – трёхмерное отображение динамики поглощения энергии поля, (с, d) – контурное отображение динамики поглощения энергии поля. По оси «X» – номера «сэмпл» оценки динамики абсорбции энергии, по оси «Y» – номера последовательных треков сканирования. Вертикальная полоса справа отображает уровни абсорбции энергии измерительного поля в условных единицах. Для наглядности на рисунке (d) карта сканирования наложена на схематическое анатомическое изображение костных структур II–IV пальцев, соответствующих области сканирования.

участки сканирования менее плотной среды («воздуха»), которые соответствуют меньшим уровням поглощения энергии поля. «Наезд»/выход «иглообразной» чувствительной зоны сканера на тест-объект сопровождается резким увеличением/уменьшением уровня абсорбции энергии поля и, соответственно, формирует боковые стенки «колодца» на изображении исходных сигналов сканирования (Рис.4а).

Прохождение чувствительной зоны сканера по поверхности тест-объекта формирует «дно колодца» (Рис.4а). На этом фоне чётко прослеживаются структурные особенности сканируемого участка тестируемого образца. Визуализируются как большое сквозное отверстие диаметром 10 мм, так и 4 сквозных

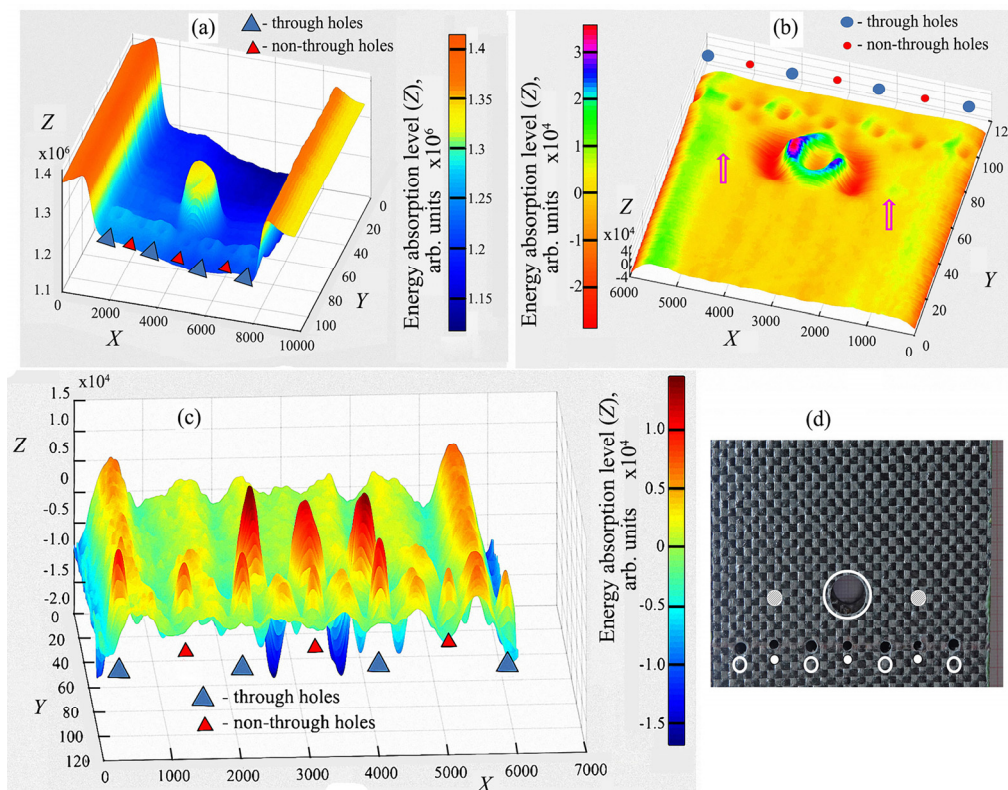


Рис.4 Карты величин степени поглощения (абсорбции) энергии электромагнитного поля измерительного SFCO-зонда (a, b, c) при сканировании образца сложной структуры (d). Кольцевые метки указывают на места сквозных отверстий, круговые метки – места несквозных отверстий. Вертикальные полосы на (a, b, c) отображают уровни абсорбции энергии измерительного поля в условных единицах. Пояснения в тексте.

отверстия диаметром 3мм и расположенные между ними несквозные отверстия диаметром 2.5 мм (Рис.4а). Как видно из рисунка, степень поглощения энергии поля различна для разных отверстий. Она минимальна для большого сквозного отверстия диаметром 10 мм, много больше для 4-х сквозных отверстий диаметром 3 мм (большие треугольные метки) и максимальна для 3-х несквозных отверстий диаметром 2.5 мм (маленькие метки), но меньше уровня поглощения энергии поля в интактных (необработанных) участках тест-объекта (Рис.4а), соответствующих «дну колодца». Из этих данных следует, что и диаметр отверстий, и наличие определенных неоднородностей в сканируемой структуре тест-объекта (в случае сканирования трёх несквозных отверстий диаметром 2.5 мм имеется четырёхмиллиметровый слой композитного пластика на дне отверстий) существенно влияют на уровень поглощения энергии РЧ поля зонда. Применение более комплексной цифровой обработки сигналов позволяет дополнительно

зафиксировать расположение 2-х сквозных отверстий диаметром 4 мм по сторонам от большого отверстия, просверленных с обратной стороны образца до верхнего композитного слоя (отмечено стрелками, Рис.4b). Более того, цифровая обработка полученных сигналов позволяет наглядно продемонстрировать разные величины поглощения энергии РЧ измерительного магнитного поля зонда для сквозных и несквозных отверстий (большие и малые треугольные метки на Рис.4с). Значение поглощения энергии поля для четвёртого сквозного отверстия занижено за счёт наложения на нисходящий фронт сигнала сканирования (Рис.4с). Полученные результаты указывают на возможность использования радиочастотных SFCO «магнитно-полевых» зондов как основы неdestructивного сканера для изучения структурных особенностей различных сред, образцов и дефектоскопии.

Эмпирическая модовая декомпозиция позволяет выделить из детектируемого сигнала наиболее информативные компоненты. На Рис.5a приведены внутренние модовые функции (ВМФ), полученные в результате эмпирической модовой декомпозиции 3-х треков сканирования образца со сложной структурой. Следует отметить устойчивый характер паттерна кривых ВМФ треков сканирования. Как видно из представленных кривых, наиболее информативными являются ВМФ9–ВМФ11 (Imf 9–11). На Рис.5bI приведены ВМФ 9-11 множественных треков сканирования узкой области объекта сложной структуры, соответствующей семи просверленным в ряд отверстиям. В правом столбце кривых ВМФ11, начиная с 55-ого трека (T_{55}), прослеживается формирование топики отверстий, которое уже на треках сканирования T_{62} , T_{63} чётко сформировано. Приведенные на рисунке 5b вертикальные прямые соответствуют негативным пикам кривых ВМФ11 для треков T_{62} , T_{63} . Изображение самой области сканирования объекта под кривыми (Рис.5bII) демонстрирует устойчивую корреляцию пиков кривых ВМФ11 с топикой сканируемых отверстий. Для приведенного узкого участка сканирования объекта сложной структуры по кривым ВМФ 9–11 получены соответствующие им частотные пределы (Рис.5b): 1–5 Гц для ВМФ 9, 0.5–2.5 Гц для ВМФ 10 и 0.25–1.25 Гц для ВМФ 11.

Суммирование кривых как ВМФ 10–11, так и ВМФ 9–11 обеспечивает требуемую цифровую фильтрацию регистрируемого сигнала и, как результат адекватной фильтрации, точное описание расположения сканируемых отверстий (Рис.6). На рисунках 6aII и 6bII можно заметить, что расположение просверленных отверстий не строго линейно. Имеются отверстия, расположенные как выше (3, 7), так и ниже (1) условной линии, соединяющей центры большей части отверстий (2, 4, 5, 6). Контурные карты сканирования этого участка (Рис.6aIII, bIII) также повторяют особенности такого расположения отверстий (замкнутые контуры на картах сканов, расположенные под линиями разметки на Рис.6aIII).

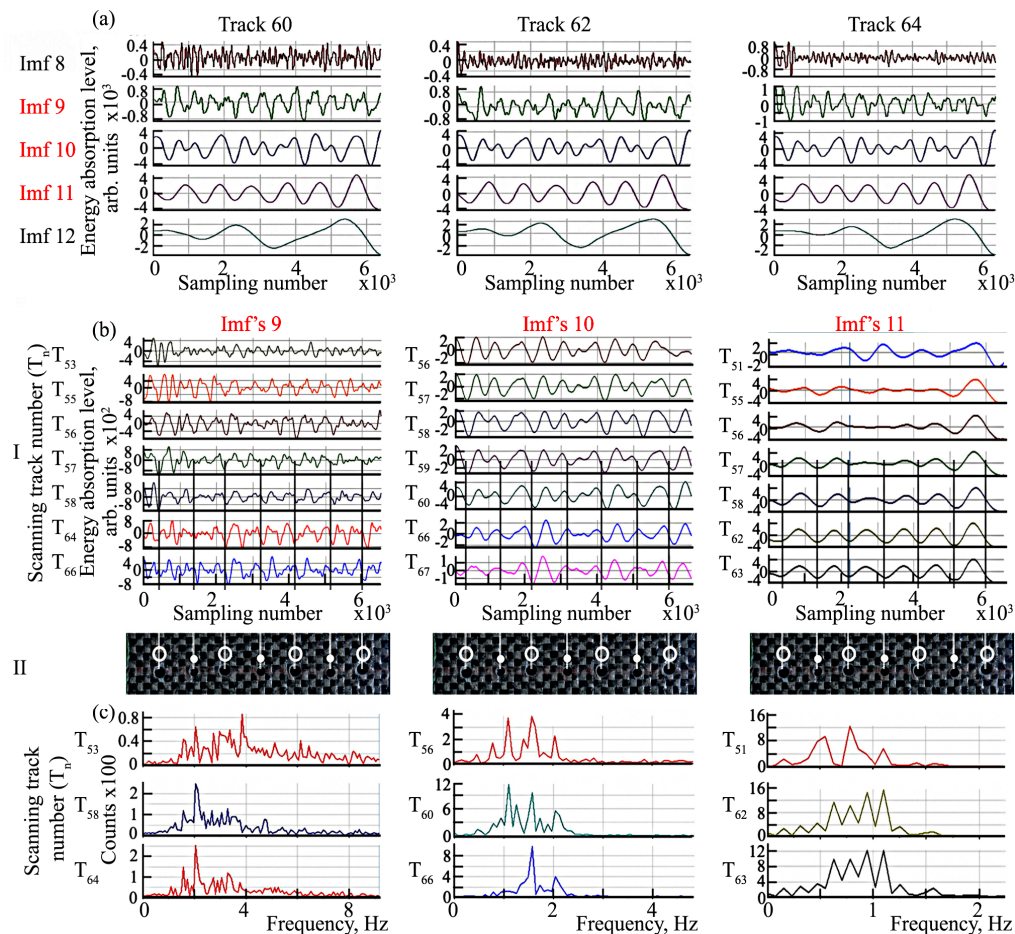


Рис.5 Внутренние модовые функции (Imf) величин степени поглощения (абсорбции) энергии электромагнитного поля измерительного SFCO МП-зонда для трёх треков сканирования (а) области семи отверстий тест-образца, полученные в результате эмпирической модовой декомпозиции (EMD). Наиболее информативные Imf9-11 семи треков сканирования (bI) и соответствующая им область сканирования тест-образца сложной структуры (bII). Частотные характеристики Imf9 – Imf11 для трёх треков сканирования (c). Вертикальные линии на bI и bII соответствуют негативным пикам Imf11 и чётко коррелируют с топикой отверстий. Наиболее выраженная мощность прослеживается на спектральных кривых Imf 11 (c). На bI справа прослеживается формирование топки отверстий на кривых Imf11, начиная с 55-ого трека (T_{55}), которое на треках сканирования T_{62} , T_{63} чётко сформировано. Пояснения в тексте.

ЭКСПЕРИМЕНТ 3 (Рис.7). С целью сравнительного изучения эффектов экранирования и поглощения было проведено сканирование области большого сквозного отверстия в 3-х разных условиях: 1) сканирование этой области (зоны) без каких-либо модификаций (Рис.7bII), 2) сканирование зоны большого сквозного отверстия, закрытого металлическим винтом (Рис.7aII)), введённым в

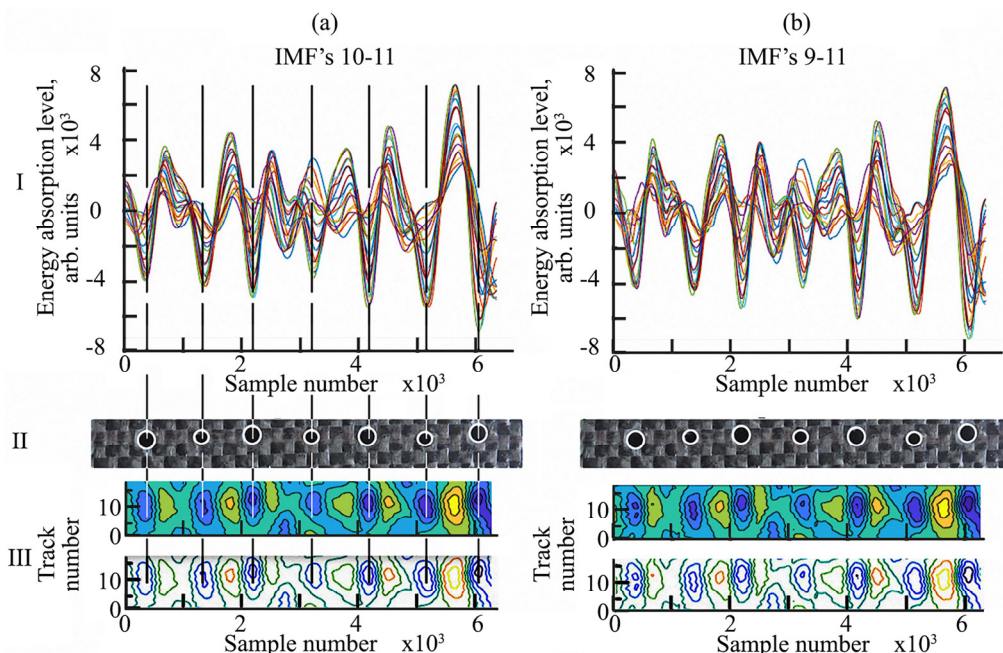


Рис.6. Результат суммирования Imf10-11 (aI) и Imf9-11 (bI) и контурные карты сканирования (aIII, bIII) области семи отверстий (aII, bII) в тест-объекте. Замкнутые контуры на картах сканов (aIII, bIII) четко повторяют топикю отверстий (aII, bII). Остальные пояснения в тексте.

отверстие (относительная оценка экранирующего эффекта), 3) сканирование этой зоны, прикрытой органической пластиковой пластиной толщиной 2 мм (Рис.7сII), напечатанной на 3D принтере филаментом растительного происхождения. Оценивали максимальный перепад (уход частоты измерительного автогенератора) вследствие экранировки РЧ поля приёмной катушки (МП-зонда) объектом исследования, или же уход частоты из-за изменения добротности катушки [5] вследствие поглощения объектом энергии РЧ поля катушки в ходе прохождения МП-зонда (катушки) через большое отверстие при сканировании.

Как видно на Рис.7bI, перепад уровня поглощения энергии приёмной катушки (МП-зонда) при сканировании «открытого» сквозного отверстия (Рис.7bII) составил 50100 условных единиц (УЕ) (Рис.7bIII). В случае, когда отверстие закрыто металлическим винтом (Рис.7aII), перепад составил 40000 УЕ (Рис.7aI, aIII). Столь малая разница (~10100 УЕ) между результатами этих 2-х экспериментов (разность перепадов уровней поглощения энергии) связана вероятно с тем, что плотность токов Фуко, наводимых в металлическом винте за счёт поглощения энергии поля зонда, начиная с некоторой величины, оказывается достаточной для эффективной экранировки («выталкивания») этого же поля, что предотвращает дальнейший уход частоты измерителя, поскольку

эффект экранировки на частоту автогенератора противоположен эффекту поглощения [5]. При сканировании той же области, прикрытой пластиковой пластиной толщиной 2 мм (Рис.7сII), перепад энергии (уход частоты генератора) вследствие избыточного поглощения пластиной энергии электромагнитного поля измерительного автогенератора SFCO МП-зонда оказался равным 14000 уе (Рис.7сI, сIII). Полученные результаты указывают на то, что диэлектрические характеристики структур и сред в конкретном случае оказывают относительно большее воздействие на энергию поля измерительного зонда, однако, это не даёт возможности обобщения данного утверждения, так как площади поверхностей винта и пластиковой пластины неодинаковы. Большая поверхность пластиковой пластины может рассматриваться как один из существенных факторов большего поглощения энергии электромагнитного поля. Тем не менее, можно утверждать,

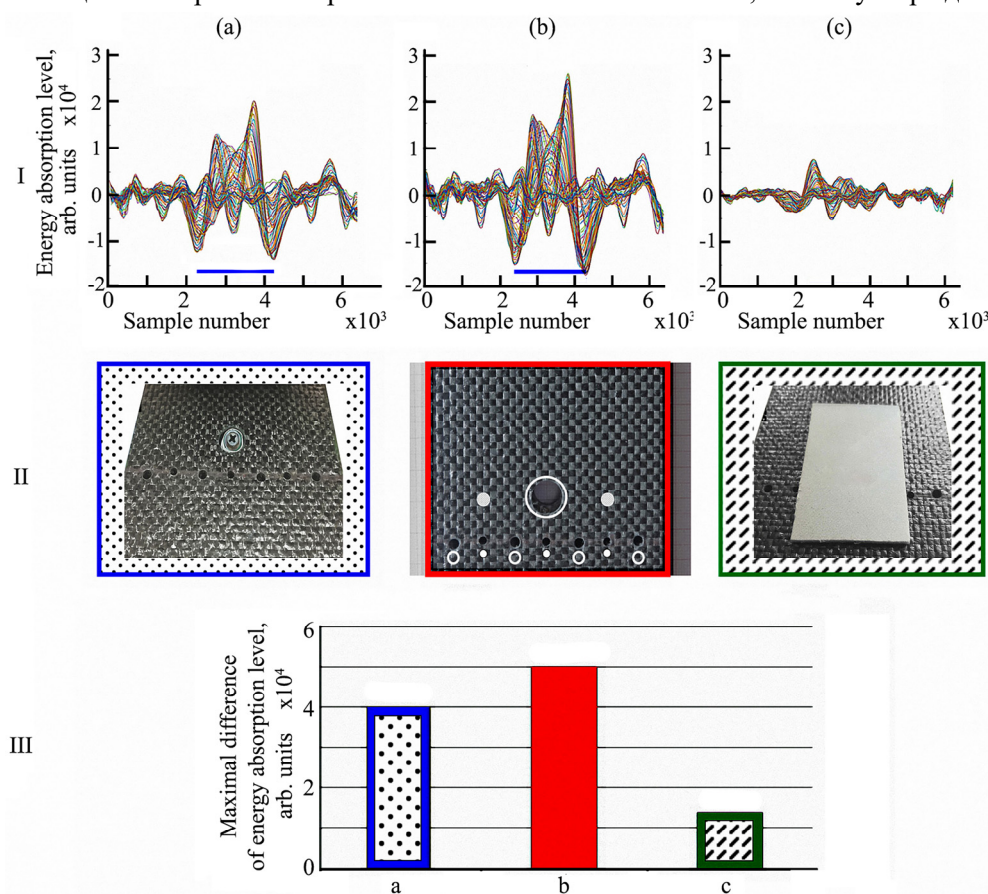


Рис.7. Зависимость величины перепада поглощенной энергии электромагнитного поля измерительного автогенератора SFCO МП-зонда (III) при сканировании области большого сквозного отверстия объекта сложной структуры, закрытого введенным в отверстие винтом (aI-II), открытого (bI-II) и прикрытого пластиковой пластиной толщиной 2 мм (cI-II). Отрезки прямых под кривыми на aI и bI соответствуют диаметру большого сквозного отверстия (10 мм). Пояснения в тексте.

что в диэлектрической среде поглощение энергии имеет непрерывный характер, поскольку до тех пор, пока остаточная энергия поля SFCO-зонда достаточна для переориентации диполей, всё большее количество диполей диэлектрика вовлекается в этот процесс, поглощая новые и новые порции энергии. Поскольку в этом эксперименте скорость сканирования по треку составляла 5 мм/сек, при частоте дискретизации 1000 Гц, каждый миллиметр трека сканирования обеспечивал 200 измерений, то есть, пространственное разрешение по направлению трека сканирования составляло 5 мкм. Диаметр большого сквозного отверстия объекта сложной структуры равен 10 мм, который при использованных в этом эксперименте скорости сканирования и частоты оценивания должен проявляться на кривых длиной в 2000 измерений (сэмплов). Действительно, на треках сканирования наблюдаются два наиболее выраженных пика перепадов величины поглощения энергии поля как в случае открытого большого отверстия (Рис.7bI), так и закрытого введенным в отверстие винтом (Рис.7aI). Причём расстояние между пиками (отрезки прямых под кривыми сканирования на графиках Рис.7aI,bI) составляет 10 мм (2000 измерений $\times$ 5 мкм). Такие параметры измерения позволяют утверждать что сканирование SFCO «магнитно-полевым» зондом способно прецизионно описывать размеры участков неоднородности.

4. Заключение

Новый тип SFCO-сенсора на базе маломощного, стабильного автогенератора с плоской однослойной приёмной катушкой (РЧ «магнитно-полевой» зонд), использован в качестве высокочувствительного сенсора для сканирования различных структур и сред, включая биологические структуры и среды. Продемонстрированы уникальные возможности нового метода визуализации: высокое пространственное разрешение, практическое отсутствие частотных ограничений чувствительности, возможность неинвазивной дистантной регистрации изменения параметров среды, недеструктивный характер сканирования. Показано, что на измеряемые параметры зонда влияют как эффекты поглощения энергии измерительного электромагнитного поля (характерного для диэлектрических структур и сред), так и эффекты экранирования этого же поля в присутствии структур со свойствами проводника. Фактически, РЧ «магнитно-полевые» SFCO-зонды позволяют отслеживать динамику изменений как диэлектрических, так и магнитных (втягивающих) и проводящих (вытесняющих, экранирующих измерительное поле) свойств изучаемой среды. Беспрепятственное проникновение измерительного магнитного поля таких зондов в ткани и среды организма и крайне малый уровень мощности поля обуславливают перспективность применения усовершенствованных модификаций этого типа SFCO-сенсоров в качестве

чувствительного элемента будущих мобильных портативных неdestructивных систем визуализации и дефектоскопии.

Авторы выражают благодарность руководству фирмы PSI (Precision Sensors & Instruments, LLC., Армения – www.psi.am) в связи с безвозмездным предоставлением РЧ «магнитно-полевых» зондов, а также блока счёта и обработки информации с соответствующим программным обеспечением для проведения представленных в настоящей работе экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. S.G. Gevorgyan, A.A. Movsisyan, G.D. Movsesyan, V.A. Shindyan, H.G. Shirinyan. Modern Physics Letters B, **11**, 1123 (1997).
2. S.G. Gevorgyan, T. Kiss, A.A. Movsisyan, H.G. Shirinyan, Y. Hanayama, H. Katsube, T. Ohyama, M. Takeo, T. Matsushita, K. Funaki. Review of Scientific Instruments, **71**, 1488 (2000).
3. S.G. Gevorgyan, T. Kiss, T. Ohyama, A.A. Movsisyan, H.G. Shirinyan, V.S. Gevorgyan, T. Matsushita, M. Takeo, K. Funaki. Physica C, **366**, 6 (2001).
4. S.G. Gevorgyan, T. Kiss, T. Ohyama, M. Inoue, A.A. Movsisyan, H.G. Shirinyan, V.S. Gevorgyan, T. Matsushita, M. Takeo. Superconductor Science & Technology, **14**, 1009, (2001).
5. S.G. Gevorgyan, T. Kiss, H.G. Shirinyan, A.A. Movsisyan, T. Ohyama, M. Inoue, T. Matsushita, M. Takeo. Physica C, **363**, 113 (2001).
6. S.G. Gevorgyan, T. Kiss, M. Inoue, A.A. Movsisyan, H.G. Shirinyan, T. Harayama, T. Matsushita, T. Nishizaki, N. Kobayashi, M. Takeo. Physica C, **378**, 531 (2002).
7. S.G. Gevorgyan, H.G. Shirinyan, V.S. Gevorgyan, S.T. Muradyan, G.S. Gevorgyan, B.K. Kurghinyan, A.A. Polyanskii. J. Physics: Conference Series, **350**, 012026 (2012).
8. S.G. Gevorgyan, V.S. Gevorgyan, H.G. Shirinyan, G.H. Karapetyan, A.G. Sarkisyan. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **17**, 629 (2007).
9. S. Gevorgyan, V. Gevorgyan, G. Karapetyan. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A, **589**, 487 (2008).
10. S.G. Gevorgyan. Earthquake Research & Analysis – Statistical Studies, Observations & Planning, InTech, Rijeka, Croatia, 275 (2012).
11. A.S. Khachunts, S.G. Gevorgyan, S.T. Muradyan, V.S. Gevorgyan. Third Jubilee Inter. Conf. on Neuroscience and Biological Psychiatry, Yerevan, Gitutyun, 22, (2013).
12. A.S. Khachunts, S.G. Gevorgyan, I.G. Tadevosyan, E.G. Kostanyan, S.T. Muradyan, V.S. Gevorgyan, N.E. Tadevosyan, S.A. Khachunts. J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **52**, 286 (2017).
13. A.S. Khachunts, S.G. Gevorgyan, N.E. Tadevosyan, A.A. Tumanyan, E.G. Kostanyan, I.G. Tadevosyan, B.K. Kurghinyan, S.A. Khachunts, V.S. Gevorgyan. J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **54**, 386 (2019).
14. S.G. Gevorgyan, M.G. Azaryan. Proc. of the Fifth International Conference on Semiconductor Micro- & Nano-Electronics, Aghveran, Armenia, 82 (2005).
15. R.M. Rangayyan. Biomedical Signal Analysis. Hoboken, Wiley-IEEE Press, 2015.

16. Hilbert–Huang Transform and Its Applications. N.E. Huang, S.S.P. Shen (Eds.), Singapore, World Scientific Publishing, 16 (2014).
17. **M.E. Torres, M.A. Colominas, G. Schlotthauer, P. Flandrin.** Proc. IEEE Inter. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, Prague, 4144 (2011).

ՌԱԴԻՈՀԱՃԱԽԱԿԱՆԱՅԻՆ «ՄԱԳՆԻՍԱ-ԴԱՇՏԱՅԻՆ» SFCO ԶՈՆԴԻ ՄԻՋՈՑՈՎ
ՏԱՐԲԵՐ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՈՒ ՄԻՋԱՎԱՅՐԵՐԻ ԱՆՀՊՈՒՄ, ՀԵՌԱՀԱՐ,
ՉՔԱՅՔԱՅՈՂ ՏԵՍԱԾՐՈՒՄ. ՏԵՍԱՆԵԼԻԱՑՄԱՆ ՆՈՐ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱ

Ա.Ա. ԽԱՉՈՒՆՏ, Ա.Գ. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Գ.Ս. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Ս.Ա. ԽԱՉՈՒՆՏ

Քննարկվում է նոր դասի SFCO տվիչների (ռադիոհաճախականային «մագնիսա-
դաշտային» զոնդերի) միջոցով տարբեր կառուցվածքների և միջավայրերի անհայտ,
հեռահար, չքայքայող տեսածրման հնարավորությունը: Ցույց է տրված դրանց կիրառման
հեռանկարն ինչպես տեսածրվող առարկաների կառուցվածքային արատների բացա-
հայտման, այնպես էլ օրգանիզմի հյուսվածքների և միջավայրի «in vivo» ուսումնա-
սիրման համար:

NON-CONTACT, FAR-FIELD, NON-DESTRUCTIVE SCANNING OF VARIOUS
STRUCTURES AND MEDIA BY RADIO-FREQUENCY ‘MAGNETIC FIELD’
SFCO-PROBE – NEW TYPE OF VISUALIZATION TECHNOLOGY

A.S. KHACHUNTS, S.G. GEVORGYAN, G.S. GEVORGYAN, S.A. KHACHUNTS

The possibility of the use of a new class of SFCO sensors (radiofrequency ‘magnetic-
field’ probes) for non-contact, far-field, nondestructive scanning of various structures and media
is discussed. The perspective of their use both for detection of structural defects of the scanned
objects and ‘in-vivo’ investigation of organism tissues and medium is demonstrated.