

УДК 534.8.081.7+537.867

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АКУСТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В МЕТОДАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И В МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

*А. М. Сутин**, *Х. Саллоум*

Stevens Institute of Technology, Hoboken, USA

Методы нелинейного акустического неразрушающего контроля (НАНК) обладают более высокой чувствительностью к обнаружению дефектов, чем стандартные методы. В них используются различные виды взаимодействия акустических волн. В данной статье мы предлагаем расширить рамки акустического рассмотрения и использовать взаимодействие между акустическими и электромагнитными волнами. Представлен краткий обзор методов НАНК и медицинской нелинейной акустической визуализации. Обсуждаются медицинские методы, основанные на модуляции электромагнитной волны акустической радиационной силой, и предлагается их усовершенствование с помощью ультразвуковых контрастных веществ. Оценка модуляции радиолокационного сигнала, отражённого от образца с колеблющейся трещиной, проведена на основе стандартных статических измерений. Кратко рассмотрены эффекты модуляции акустической волны электромагнитным полем в методе обнаружения трещин в металлических материалах. Эффекты, рассмотренные в статье, могут быть использованы в новых методах НАНК и медицинской диагностики.

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних двух десятилетий растёт интерес к исследованиям нелинейных акустических эффектов для применения в области медицинской нелинейной акустической визуализации и методах нелинейного акустического неразрушающего контроля (НАНК). Многочисленные наблюдения нелинейных статических и динамических процессов показали, что макроскопическая нелинейность материала сильно зависит от количества содержащихся в нём микронеоднородных дефектов, которые приводят к высокой изменчивости его нелинейных свойств при наличии дефекта. Высокая чувствительность методов НАНК привлекла внимание многих исследователей, которыми было изучено более 20 различных таких методов. Нелинейные акустические методы, основанные на различных взаимодействиях акустических волн, нашли широкое применение в медицинской диагностике. Мы рассматриваем расширение рамок акустического взаимодействия и используем взаимодействие между акустическими и электромагнитными волнами.

В работе дан краткий обзор методов НАНК и показан большой объём исследований в области НАНК и нелинейной акустической медицинской визуализации. Однако взаимодействие между акустическими и электромагнитными волнами изучено не столь полно. Нам известна только одна серия работ, в которой было исследовано влияние акустически индуцированного движения тканей на микроволновую модуляцию для выявления рака молочной железы. Мы предлагаем усовершенствовать этот метод путём применения микропузырьков для усиления микроволновой модуляции акустически индуцированными колебаниями среды. Микропузырьки могут приводить к значительному увеличению смещения ткани под действием ультразвуковых волн благодаря недиссипативному механизму радиационной силы. Этот новый эффект вместе с усилением электромагнитного контраста в присутствии микропузырьков может привести к значительному увеличению чувствительности метода микроволновой доплеровской визуализации гармонического движения.

* asutin@stevens.edu

Другой рассматриваемый новый эффект — модуляция радиолокационного сигнала акустическими колебаниями в присутствии трещины. Нам неизвестны какие-либо публикации по этому вопросу. Мы провели оценку реализуемости этого эффекта на основе известных экспериментальных статических данных, которые связывают амплитуду радиолокационного сигнала, рассеянного трещиной, с её размером.

1. НЕЛИНЕЙНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

1.1. Краткий обзор нелинейных акустических методов неразрушающего контроля

Нелинейные акустические методы были широко исследованы для применения в медицинской нелинейной визуализации и НАНК. Эти методы основаны на различных формах взаимодействия акустических волн в среде с мягкими включениями. Последними могут быть микронеоднородные изъяны (дефекты и трещины) в твёрдых материалах и микропузырьки в биологических тканях. Исследование сред с мягкими включениями, проведённое в лаборатории Л. А. Островского в ИПФ РАН [1], продемонстрировало значительное увеличение нелинейности сред при наличии трещин и микропузырьков.

Исторически в первых работах с применением нелинейных акустических методов для характеристики материалов использовались измерения второй и высших гармоник, генерируемых при нелинейных искажениях изначально синусоидальной акустической волны, распространяющейся в среде с дефектами. Первая апробация этого метода была проведена ещё в 1979 году в экспериментах по распространению волн [2, 3]. Этот простейший нелинейный метод имеет серьёзный недостаток — генерацию высших гармоник усилителями мощности, что может маскировать нелинейность, вызванную самим материалом. Это, вероятно, и есть причина, по которой нелинейные акустические методы, основанные на генерации второй гармоники и применяемые для проверки клеевых соединений в самолётах [4], характеризуются высоким уровнем ложных гармоник даже при хорошем качестве соединений.

Тот же эффект генерации второй гармоники был применён для нелинейной визуализации ультразвуковых контрастных веществ [5–8]. Последние представляют собой небольшие микропузырьки с диаметром менее 10 мкм, покрытые полимерной плёнкой. Эти микропузырьки вводятся в кровотоки, и их колебания под действием ультразвуковых волн значительно превышают ультразвуковые колебания самой ткани. Это означает, что ультразвуковое рассеяние на микропузырьках может превышать рассеяние на тканях и крови. Такое сильное рассеяние значительно увеличивает контрастность ультразвуковых диагностических систем. Нелинейное рассеяние на микропузырьках с частотой второй гармоники обеспечивало ещё более высокий контраст, т. к. другие ткани и кровь имеют гораздо более низкие нелинейные свойства.

Впоследствии стало понятно, что анализ генерации гармоник не единственный и не всегда лучший способ реализации эффективного НАНК. В 1992 году НАНК был реализован с использованием квазистатического акустоупругого метода для измерения акустоупругих параметров второго порядка в пластиковых брусках [9]. Один из наиболее широко используемых методов НАНК, основанный на модуляции высокочастотных акустических волн низкочастотной вибрацией, был предложен и продемонстрирован для обнаружения небольших трещин в стали в 1994 году в лаборатории Л. А. Островского [10, 11].

Существует очень большой спектр нелинейных акустических эффектов, которые могут быть использованы в различных методах НАНК и медицинской нелинейной визуализации. Этому вопросу было посвящено несколько тысяч статей. Монография [12] и обзоры [8, 13–23] описывают

современное состояние нелинейно-акустических методов НАНК.

В научной литературе методы НАНК были разделены на две группы [12, 14, 19, 20].

Методы первой группы основаны на классической теории нелинейной упругости. В этом случае нелинейности связаны с нелинейным механическим напряжённо-деформированным поведением (третий порядок упругости) материала для статического и динамического нагружения или атомной ангармоничности (например, квадратичная и кубическая нелинейности). Нелинейности выделяются в спектрах отклика в виде высших гармоник или квадратичных сдвигов частоты (резонансная частота квадратично уменьшается с ростом амплитуды возбуждения).

В нелинейных методах второй группы используются неклассические нелинейности, которые в основном обусловлены диссипативным поведением материала, порождаемым, среди прочего, микроскопическими дефектами. В этом случае спектры отклика содержат дополнительные компоненты, такие как высшие гармоники и субгармоники. Эти нелинейности также характеризуются различными нелинейными эффектами (см. табл. 1), такими как смешение частот и линейные резонансные сдвиги частоты с зависящей от амплитуды добротностью. В различных методах используются такие нелинейные эффекты, как контактная акустическая нелинейность, виброакустическая модуляция волн, передача модуляции (известная как акустический аналог Люксембург-Горьковского эффекта), эффект памяти, а также спектроскопия нелинейных упругих волн, которая часто сочетается с использованием акустического обращения времени для локализации дефектов, а в последнее время — с методом локального резонанса дефектов.

С практической точки зрения более целесообразно разделить методы НАНК на две группы. В первую группу входят методы, в которых используются акустические резонансы всей конструкции или её части. Эти методы позволяют обнаруживать дефекты во всей конструкции без их локализации. Вторая группа представляет методы, в которых используется нелинейное взаимодействие в ограниченных областях тестируемой части и которые позволяют локализовать повреждения и дефекты.

Нелинейные акустические методы, представленные в табл. 1, основаны на взаимодействии акустических волн. Нелинейные взаимодействия между акустическими и электромагнитными волнами также начали исследовать для создания систем неразрушающего контроля и медицинской диагностики, но уровень этих исследований намного ниже, чем для НАНК. В данной статье представлено современное состояние исследований применения электромагнитно-акустического взаимодействия для неразрушающего контроля и предложено несколько новых типов взаимодействий между акустическими и электромагнитными волнами для применения в методах НАНК и нелинейной медицинской визуализации.

1.2 Нелинейная акустика в медицине

Ультразвук широко используется в медицине, и в биологических тканях имеют место многочисленные нелинейные акустические эффекты. Некоторые из них ограничивают возможности обычных медицинских ультразвуковых систем. В других системах нелинейные эффекты применялись для диагностики и лечения. Одной из первых работ, демонстрирующих нелинейные акустические эффекты в медицине, была статья [53]. Подробный обзор биомедицинских приложений для нелинейных акустических волн представлен в работах [8, 54].

Исследование нелинейных акустических эффектов в медицине началось с анализа акустического поля, созданного с помощью сфокусированного ультразвука высокой интенсивности [55], который широко используется для лечения. Нелинейные эффекты в сфокусированных волнах могут привести к уменьшению сфокусированного поля или даже его увеличению за счёт более высокой концентрации нелинейно генерируемых высоких гармоник. Этот эффект был исследо-

Таблица 1. Обзор методов НАНК

Резонансы всей конструкции; нелинейная спектроскопия с использованием упругих волн	Нелинейная визуализация, локализация повреждений
1) генерация высоких гармоник [2, 3]	1) нелинейная акустика с обращением времени или нелинейная спектроскопия упругих волн с обращением времени [16, 39, 40]
2) вычитание с масштабированием, инверсия фазы [24]	2) метод нелинейных локальных резонансов [41, 42]
3) нелинейная резонансная ультразвуковая спектроскопия [15, 25, 26]	3) медицинская нелинейная визуализация гармоник [8, 43, 44]
4) амплитудно-зависимое внутреннее трение [27, 28]	4) нелинейная акустическая томография [45–48]
5) модуляционная нелинейная спектроскопия или виброакустическая модуляция [16, 29, 30]	5) импульсная модификация метода виброакустической модуляции [49]
6) перенос модуляции (акустический аналог Люксембург-Горьковского эффекта) [31]	6) нелинейная волноводная визуализация и томография [50]
7) диагностика, основанная на медленной динамике [32]	7) субгармоническая и ультрагармоническая визуализация [35, 36]
8) нелинейная реверберационная спектроскопия или нелинейная ударно-резонансная акустическая спектроскопия [33]	8) нелинейная структурная интенсивность [51, 52]
9) биспектральный статистический анализ высокого порядка [34]	
10) субгармонические и ультрагармонические методы [35, 36]	
11) акустоупругий эффект [37, 38]	

ван в работах [56, 57] (см. также [58]) и подтверждён численным решением уравнения Хохлова—Заболотской—Кузнецова [59]. Подробный анализ этого нелинейного эффекта в современной терапевтической многоэлементной фокусирующей системе представлен в работах [60, 61].

В настоящее время наиболее известным применением нелинейных акустических методов в медицине является нелинейная визуализация ультразвуковых контрастных веществ. Микропузырьки представляют собой небольшие сильно нелинейные включения для биологических тканей, и их поведение очень похоже на поведение трещин в твёрдых телах. Нелинейные явления на трещине и микропузырьке очень близки, и методы нелинейной визуализации ультразвуковых контрастных веществ практически аналогичны методам обнаружения трещин. Одна из первых публикаций по этому вопросу — это работа [62]. Тот же метод генерации второй гармоники был использован в [63] для измерений характеристик микропузырьков в море. В монографии [5] и обзорах [6, 7] представлен широкий круг различных акустических эффектов, наблюдаемых при рассеянии ультразвука на контрастных веществах.

Нелинейные акустические методы были использованы для оценки состояния костей, в част-

ности для раннего выявления остеопороза, более 10 лет назад [64], когда применялся метод нелинейной резонансной спектроскопии. Был разработан ряд различных нелинейных методов, три из которых представлены в статье [65]: метод, основанный на генерации второй гармоники, метод генерации разностной частоты и метод фазовой модуляции высокочастотного сигнала низкочастотной волной. В статье [66] применён метод нелинейной спектроскопии волновой модуляции для обнаружения микроповреждений в кости человека.

Проведённые исследования показали, что остеопоротические изменения (особенно в губчатой кости), проявляемые при высоком уровне микроповреждений или увеличении концентрации микротрещин, должны привести к значительному увеличению нелинейных параметров ультразвука в кости. Другими словами, остеопороз проявляется в повышенной концентрации микротрещин, что, в свою очередь, приводит к большему уровню нелинейности в кости.

1.3 Нелинейный виброакустический мониторинг структурной целостности

Мониторинг структурной целостности (МСЦ) считается разновидностью неразрушающего контроля, которая обеспечивает непрерывный мониторинг различных структур в режиме реального времени с использованием встроенных или постоянно установленных датчиков. В монографии [67] сказано, что «основная цель МСЦ — иметь возможность заменить существующие методы неразрушающего контроля системой постоянного мониторинга или иметь интегрированную встроенную систему контроля». Основные области применения МСЦ включают контроль объектов инфраструктуры, таких как мосты, туннели, здания, плотины и электростанции, и описаны в тысячах публикаций (см., например, [68–72]). Вторая большая область применения МСЦ — аэрокосмическая индустрия. Указанный метод широко внедряется НАСА [73, 74].

Один из основных методов МСЦ основан на измерении колебаний конструкций. Нелинейные виброакустические эффекты в этих колебаниях содержат важную информацию о повреждении конструкции. Естественные колебания конструкций обычно имеют случайную структуру и широкий спектр, поэтому нелинейные виброакустические методы МСЦ требуют выделения нелинейных особенностей из гораздо более сложных сигналов, чем гармонические, используемые в большинстве методов НАНК. В работе [75] дан обзор различных нелинейных эффектов в динамическом поведении нелинейных колебаний конструкций, включая хаотические колебания и локальные аттракторы. В статье [76] описано применение бикогерентности для обнаружения нелинейных компонентов в спектрах колебаний морской платформы при воздействии океанской волны.

Стандартные нелинейные эффекты в методах НАНК, основанные на модуляции высокочастотного ультразвука низкочастотной вибрацией, были рассмотрены в работах [71, 77] для приложений МСЦ. Основное отличие от того же метода, который используется в НАНК, заключается в том, что датчики и излучатели встроены в контролируемую структуру, а волноводные моды используются в качестве высокочастотных зондирующих волн. В статье [78] рассмотрено применение модуляционного метода для мониторинга структурной целостности соединений в спутниках.

1.4. Нелинейная ударно-резонансная акустическая спектроскопия

Среди большого числа методов НАНК мы хотим уделить больше внимания нелинейной ударно-резонансной акустической спектроскопии, которая является самой простой среди них, т. к. её можно реализовать с помощью одного только смартфона. Постукивание является одним из самых

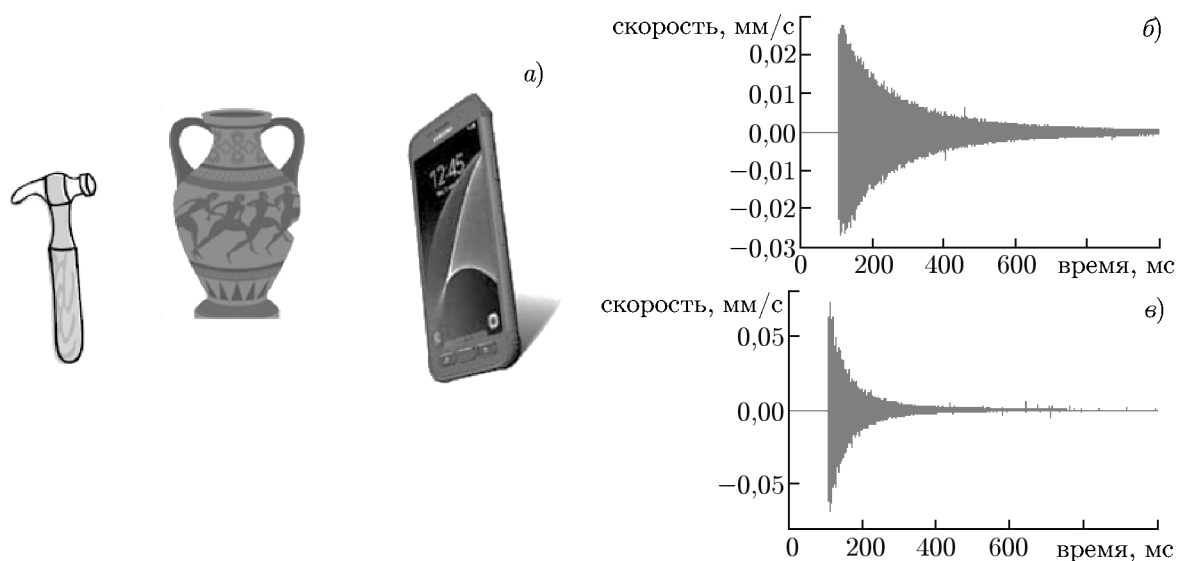


Рис. 1. Простейшая установка для тестирования с помощью ударно-резонансной акустической спектроскопии (а) и регистрируемые сигналы для неповреждённых образцов (б) и образцов с трещиной (в)

старых методов неразрушающего контроля. Современная реализация этого метода представлена на рис. 1а. При постукивании тестируемого предмета (например, вазы, показанной на рис. 1) возбуждаются его колебания, которые улавливаются микрофоном или другими датчиками (акселерометром, лазерным доплеровским виброметром и так далее). На рис. 1 показан простейший случай, когда смартфон может записывать и обрабатывать акустический сигнал, возбуждаемый постукиванием. Возбуждённые колебания имеют разные частоты и длительность (время затухания) для неповреждённых образцов и образцов с трещиной. Наличие трещины приводит к сдвигу резонансной частоты и большему затуханию звукового излучения (более сильному ослаблению вибрации).

Метод ударно-резонансной акустической спектроскопии был применён в различных областях неразрушающего контроля. Наиболее известные области использования тестирования постукиванием включают в себя обнаружение дефектов в железнодорожных колёсах [79], определение динамических свойств железнодорожного пути [80], оценку состояния проезжей части моста [81] и измерения динамических свойств композиционных материалов [82]. Метод ударно-резонансной акустической спектроскопии, который называется тест-постукиванием, широко используется для оперативной оценки любой доступной поверхности самолёта с целью обнаружения расслоения или отслоения [83]. Опираясь на свой слух, оператор делает вывод о наличии дефектов.

В простейшем варианте этого метода, показанном на рис. 1а, смартфон обеспечивает запись отклика свободного колебания после удара. Спектр свободного колебания даёт резонансные частоты тестируемых предметов, а время затухания в различных полосах частот позволяет определить добротность Q для данной полосы частот.

Зарегистрированный вибрационный сигнал после удара состоит из затухающих сигналов с несколькими резонансными частотами:

$$U(t) = \sum_{n=1}^N A_n \exp(-\alpha_n t) \sin(2\pi f_n t + \varphi_n), \quad (1)$$

где t — время, n — номер возбуждённой резонансной моды, f_n — резонансная частота для моды

с номером n , A_n , и φ_n — амплитуда и фаза колебания для моды с номером n соответственно.

Обычно свойства затухания колебаний в материале характеризуют параметром Q (добротностью), который связан с коэффициентом затухания α_n соотношением

$$Q_n = f_n \pi / \alpha_n. \quad (2)$$

Этот параметр зависит от частоты моды резонансных колебаний.

Для инструментальных измерений резонансных частот и добротности мы разработали программное обеспечение для последующей обработки зарегистрированного после удара сигнала. Вначале спектры принятого сигнала рассчитываются с помощью преобразования Фурье, измеряются резонансные частоты тестируемого образца. Резонансные частоты являются локальными максимумами регистрируемого спектра. Полученный сигнал фильтруется в узких полосах вблизи резонансных частот. После этого шага мы получаем несколько затухающих сигналов. Число этих сигналов равно числу резонансных частот.

На следующем шаге вычисляется огибающая функция принятого отфильтрованного сигнала и натуральный логарифм этой функции. Предполагается, что для любой резонансной частоты огибающая функция является линией с постоянным наклоном. Как видно из (1), огибающая функция сигнала с частотой f_n имеет вид

$$U_n = A_n \exp(-\alpha_n t). \quad (3)$$

Логарифм от $U_n(t)$ должен быть линейной функцией, а наклон этой функции — коэффициентом затухания. Значения огибающей функции могут быть измерены в моменты времени t_1 и t_2 , а добротность Q выражается следующим образом:

$$Q = \frac{\pi(t_2 - t_1)f_n}{\ln[U_n(t_2)] - \ln[U_n(t_1)]}. \quad (4)$$

Нелинейный метод ударно-резонансной акустической спектроскопии включает в себя измерение зависимости резонансной частоты и добротности от амплитуды возбуждённого колебания. Поскольку амплитуды колебаний со временем затухают, измерения частоты и затухания сигнала в разных временных окнах дают информацию об амплитудных зависимостях резонансной частоты и добротности. Первая апробация этого метода в применении к автомобильным тормозным барабанам была проведена А. Сутиным и группой из Лос-Аламоса [84]. Различные модификации нелинейного метода ударно-резонансной акустической спектроскопии представлены в ряде работ [85–87]. Этот метод может быть использован для относительно крупных конструкций. В диссертации [88] проведён тест на длинных бетонных балках и продемонстрирована сильная амплитудная зависимость резонансной частоты и затухания для повреждённой балки.

2. МОДУЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН АКУСТИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ И КОЛЕБАНИЯМИ

2.1 Краткий обзор

Модуляция электромагнитных волн акустическими волнами и колебаниями имеет долгую историю и применяется в лазерных доплеровских виброметрах, где доплеровский сдвиг оптических волн используется для измерения поверхностных колебаний. Подобный доплеровский сдвиг в электромагнитных волнах, отражённых от колеблющейся поверхности, приводит к модуляции электромагнитной волны поверхностными колебаниями. Обзор радиолокационных систем для

бесконтактных измерений колебаний представлен в работах [89, 90]. Метод применяется во многих областях, в том числе:

- 1) для бесконтактных измерений колебаний конструкции в целях мониторинга её структурной целостности [91, 92];
- 2) для обнаружения наземных мин, когда поверхностные колебания возбуждаются динамиком и измеряются микроволновым доплеровским виброметром [93].

Одной из наиболее интересных областей для измерения механических колебаний с помощью радаров является бесконтактный мониторинг дыхания и сердцебиения [94]. Эти измерения используются для постоянного мониторинга здоровья. Высокая чувствительность данных методов позволяет применять их для обнаружения людей, находящихся за стеной [95], и даже для обнаружения лиц, погребённых под завалами [96].

Эти методы основаны на модуляции сверхвысокочастотного сигнала, отражённого от поверхности исследуемых объектов. Недавно они были распространены на измерение модуляции электромагнитной волны при акустически индуцированном движении для выявления рака [97, 98]. Этот метод был назван авторами методом микроволновой доплеровской визуализации гармонического движения. Его принцип работы показан на рис. 2. Локальные колебания в исследуемых тканях создаются сфокусированными модулированными ультразвуковыми волнами. Радиационная сила модулированного ультразвука была подробно исследована для медицинского диагностического метода ультразвуковой стимулированной виброакустографии на основе визуализации гармонического движения для сфокусированного ультразвука [99–101].

Метод реконструкции акустически индуцированного движения тканей с помощью микроволн рассматривался в статье [102] и назывался акустоэлектромагнитной томографией. В указанной статье рассматривались классические акустические волны, которые вызывают гораздо меньшие смещения, чем сдвиговые движения среды, обусловленные радиационной силой и используемые в ультразвуковой виброакустографии. В работе [102] представлены математические алгоритмы реконструкции движения акустической волны, но неясно, могут ли эти алгоритмы использоваться в реальных медицинских системах, т. к. нет экспериментов, показывающих реализуемость этих методов.

2.2. Усиление микроволновой чувствительности к акустически индуцированному движению

Мы предлагаем значительно усилить микроволновую чувствительность к акустически индуцированному движению за счёт применения ультразвуковых контрастных веществ, которые позволяют заметно увеличить радиационную силу, создаваемую нелинейностью среды [103, 104]. Обычная радиационная сила связана с затуханием или отражением звука, в то время как новый

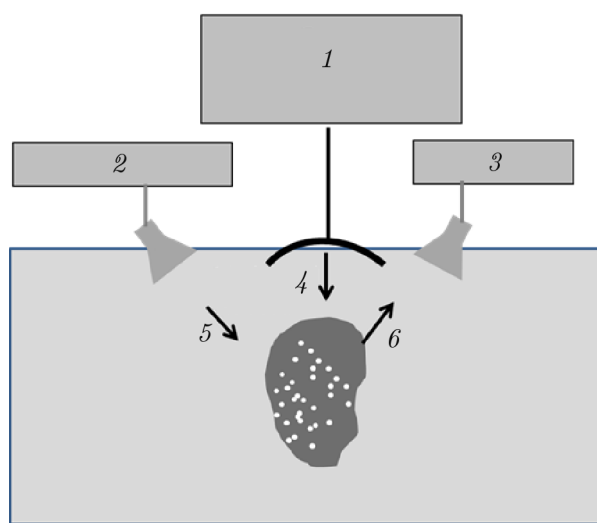


Рис. 2. Схема микроволновой доплеровской визуализации гармонического движения: 1 — высокочастотный модулированный ультразвук, 2 и 3 — электромагнитные передатчик и приёмник, 4 — модулированный ультразвук, 5 — гармоническая электромагнитная волна, 6 — модулированная электромагнитная волна

недиссипативный механизм радиационной силы связан с нелинейностью среды и может эффективно работать даже в среде без затухания. Нелинейность среды может быть значительно увеличена путём введения даже небольшого количества микропузырьков. Радиационная сила в средах с микропузырьками может существенно превышать радиационную силу в средах без микропузырьков из-за высокой нелинейности среды. Численное моделирование [104] продемонстрировало большое увеличение радиационной силы из-за нелинейности среды.

Увеличение нелинейности среды за счёт микропузырьков — хорошо известный факт, который стал понятен после публикации классической статьи [105]. Обзор этих исследований представлен, например, в [106], где было продемонстрировано увеличение нелинейности среды до 600 раз. Значительное увеличение нелинейности воды за счёт пузырьков наблюдалось в море, где имело место сильное возрастание сигнала гидролокатора на разностной частоте [107]. Аналогичный эффект также наблюдался для пузырьков в морских осадках [108].

Большое увеличение радиационной силы в присутствии ультразвуковых контрастных веществ приведёт к усилению движения тестируемых тканей и повышению чувствительности методов медицинской диагностики, основанных на этой силе.

Дополнительное повышение микроволновой чувствительности за счёт микропузырьков связано с изменениями диэлектрических свойств среды. Ультразвуковые контрастные вещества обладают диэлектрическими свойствами, сильно отличающимися от свойств окружающих тканей. Этот эффект был исследован с целью улучшения микроволновой визуализации для выявления рака [109, 110], и было показано, что применение таких веществ увеличивает контраст электромагнитного сигнала между раковыми и здоровыми тканями. Это усиление контраста облегчает измерение модуляции электромагнитных волн модулированной акустической волной.

2.3 Возможность модуляции электромагнитной волны колебанием трещины



Рис. 3. Схема тестирования модуляции электромагнитной волны колебаниями: 1 — вибратор, 2 — тестируемый предмет с трещинами, 3 — микроволновый радар

колебанием трещины, может иметь вид, показанный на рис. 3. Аналогичная установка была исследована в работе [111].

В работе [111] использовался радар с частотой 24,125 ГГц. Стальной образец с длиной 914,4 мм и поперечным сечением $152,4 \times 12,4$ мм имел усталостную трещину, размер которой менялся под воздействием внешней силы. Раскрытие трещины привело к увеличению радиолокационного сигнала. На рис. 7 статьи [111] показано изменение сигнала радара с раскрытием трещины. По этому рисунку мы можем оценить раскрытие трещины, которое составило от 0 до 10 мкм и привело к слабому изменению уровня радиолокационного сигнала в $m = 5,5 \cdot 10^{-3}$ раз. Это означает, что низкочастотное колебание трещины с амплитудой 10 мкм создаст такой же уровень модуляции радиолокационного сигнала. Данный результат позволяет установить связь между приложенным усилием и раскрытием трещины. Согласно рис. 5 статьи [111] сила $F = 50$ кН

Модуляция отражения электромагнитного сигнала от колеблющейся трещины — это достаточно простой эффект, который может быть использован для неразрушающего контроля. Однако мы не нашли никакого экспериментального подтверждения этого эффекта и поэтому проведём оценку его реализуемости на основе результатов известных экспериментов по микроволновому рассеянию на материале с трещиной.

Система для обнаружения трещин, в которой используется модуляция электромагнитных волн

приводит к образованию трещины в 10 мкм. Оценка приложенного давления $P = F/S$, где S — поперечное сечение образца, даёт уровень давления 26,5 МПа. Таким образом, по нашим оценкам на основе этого статического эксперимента, приложение динамической силы с амплитудой давления 26,5 МПа может привести к амплитудной модуляции радиолокационного сигнала с индексом модуляции $m = 5,5 \cdot 10^{-3}$.

Для оценки возможности измерения такой модуляции мы должны сравнить изменения в спектре электромагнитного сигнала, созданном колебанием трещины, с изменением за счёт доплеровского эффекта, связанного с отражением электромагнитной волны от колеблющейся поверхности.

Радиолокационный сигнал амплитудно-модулированной волны описывается выражением

$$A(t) = A_0 \cos(\omega t)[1 + m \cos(\Omega t)], \quad (5)$$

где ω — угловая частота радара и Ω — угловая частота. Для частотно-модулированной волны

$$A(t) = A_0 \cos[\omega t + \beta \cos(\Omega t)], \quad (6)$$

где индекс модуляции β определяется доплеровским сдвигом при отражении радиолокационного сигнала от колеблющейся поверхности со скоростью V :

$$\beta = \frac{V\omega}{c\Omega} = \frac{2\pi\xi}{\lambda}, \quad (7)$$

где c — скорость света, λ — длина электромагнитной волны, ξ — смещение колеблющейся поверхности.

Амплитуду боковых компонентов с частотами $\omega \pm \Omega$ можно найти из уравнений (5) и (6) для случая малой модуляции ($\{m, \beta\} \ll 1$): $A_{\pm} = mA_0/2$ для амплитудно-модулированной волны и $A_{\pm} = \beta A_0/2$ для частотно-модулированной волны.

Для оценки поперечного смещения исследуемого образца ξ мы будем использовать простую модель прямоугольной пластины, на которую воздействует продольное давление P . В этом простом примере отношение деформации переноса к продольной деформации в направлении нагрузки есть коэффициент Пуассона ν . Поперечное смещение определяется формулой

$$\xi = \frac{\nu P d}{2E}, \quad (8)$$

где E — модуль Юнга, а d — толщина пластины.

Оценки для тестируемой стальной пластины [111] по формулам (7) и (8) дают индекс частотной модуляции $1,3 \cdot 10^{-4}$, что примерно в 40 раз меньше, чем индекс амплитудной модуляции для радиолокационной волны, рассеянной на трещине.

Проведённые оценки показывают возможность наблюдения модуляции радиолокационного сигнала колебаниями трещины.

3. МОДУЛЯЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

В предыдущем разделе мы рассмотрели модуляцию электромагнитных волн акустическими. Противоположный эффект модуляции акустических волн электромагнитным полем практически не исследовался. Влияние электромагнитного поля на акустические волны было изучено для случаев, когда электромагнитное поле изменяет температуру материалов и тканей. Повышение температуры приводит к изменению скорости звука и термоакустической генерации звука. Эффекты изменения скорости звука используются в акустической температурной томографии [112–114], а электромагнитное возбуждение акустических волн применяется в термоакустической визуализации с помощью микроволнового излучения [115].

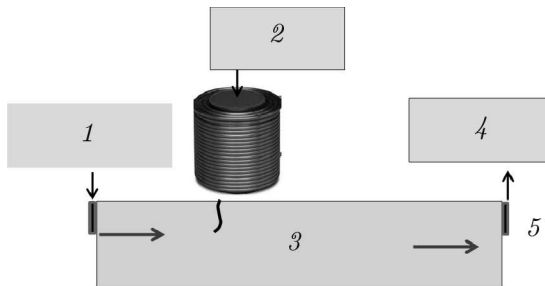


Рис. 4. Схема модуляции акустических волн вихревыми токами или в электромагнитном акустическом преобразователе: 1 — генератор акустической волны, 2 — генератор электромагнитного поля, 3 — металлический образец, 4 — анализатор сигналов, 5 — акустический приёмник

чительно больше, чем колебания трещины, создаваемые внешней силой (на вибростенде или в аналогичной системе).

ВЫВОДЫ

В работе представлен краткий обзор методов НАНК и медицинской нелинейной акустической визуализации. Обсуждаются медицинские методы, основанные на модуляции электромагнитной волны акустической радиационной силой и предлагается их совершенствование с помощью ультразвуковых контрастных веществ. Проведена оценка модуляции радиолокационного сигнала, отражённого от образца с трещиной, колебанием трещины. Кратко рассмотрены эффекты модуляции акустической волны электромагнитным полем применительно к методам обнаружения трещин в металлических материалах.

Рассмотренные эффекты могут быть использованы в новых нелинейных акустических методах неразрушающего контроля и медицинской диагностики, и их развитие потребует существенных экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nazarov V. E., Ostrovsky L. A., Soustova I. A., Sutin A. M. // *Phys. Earth Planet. Int.* 1988. V. 50, No. 1. P. 65–73. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(88\)90094-5](https://doi.org/10.1016/0031-9201(88)90094-5)
2. Buck O., Morris W. L., Richardson J. N. // *Appl. Phys. Lett.* 1978. V. 33, No. 5. P. 371–373. <https://doi.org/10.1063/1.90399>
3. Morris W. L., Buck O., Inman R. V. // *J. Appl. Phys.* 1979. V. 50, No. 11, P. 6737–6741. <https://doi.org/10.1063/1.325917>
4. Roach D. // *Commercial Aircraft Composite Repair Committee Meeting*. 12–16 November 2007, Wichita, USA. P. 12–16.
5. Hoff L. *Acoustic Characterization of Contrast Agents for Medical Ultrasound Imaging*. Berlin : Springer Science & Business Media, 2001. 230 p.
6. Correas J. M., Bridal L., Lesavre A., et al. // *Eur. Radiol.* 2001. V. 11, No. 8. P. 1316–1328. <https://doi.org/10.1007/s003300100940>
7. Cosgrove D. // *Eur. J. Radiol.* 2006. V. 60, No. 3. P. 324–330. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2006.06.022>

8. Руденко О. В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177. С. 374–383. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200704e.0374>
9. Nagy P. B., Adler L. // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 1992. V. 11B. P. 2025–2032.
10. Коротков А. С., Славинский М. М., Сутин А. М. // Акуст. журн. 1994. Т. 40, № 1. С. 84–87.
11. Korotkov A. S., Sutin A. M. // Acoust. Lett. 1994. V. 18, No. 4. P. 59–62.
12. Guyer R. A., Johnson P. A. Nonlinear Mesoscopic Elasticity: The Complex Behaviour of Rocks, Soil, Concrete. Weinheim : John Wiley & Sons, 2009. 410 p.
13. Сутин А. М., Назаров В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1995. Т. 38, № 3–4. С. 169–187.
14. Ostrovsky L. A., Johnson P. A. // Rivista del Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica. 2001. V. 24, No. 7. P. 1–46.
15. Johnson P. A., Sutin A. // AIP Conf. Proc. 2005. V. 760, No. 1. P. 377–384. <https://doi.org/10.1063/1.1916701>
16. Sutin A. M., Johnson P. A. // AIP Conf. Proc. 2005. V. 760, No. 1. P. 385–392. <https://doi.org/10.1063/1.1916702>
17. Zheng Y., Maev R. G., Solodov I. // Canadian J. Phys. 2000. V. 77, No. 12. P. 927–967. <https://doi.org/10.1139/p99-059>
18. Broda D., Staszewski W. J., Martowicz A., Uhl T., Silberschmidt V. V. // J. Sound Vibration. 2014. V. 333, No. 4. P. 1097–1118. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.09.033>
19. Руденко О. В. // Успехи физ. наук. 2006. Т. 176. С. 77–95. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0176.200601e.0077>
20. Gurbatov S. N., Rudenko O. V., Saichev A. I. // Waves and Structures in Nonlinear Nondispersive Media. Berlin : Springer, 2011. P. 271–307. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23617-4_8
21. Solodov I. // Proc. NDT in Progress. 5th International Workshop of NDT Experts. 12–14 Oct. 2009, Prague. Art. no. 8633.
22. Зайцев В. Ю., Назаров В. Е., Таланов В. И. // Успехи физ. наук. 2006. Т. 176, № 97. С. 97–102. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0176.200601g.0097>
23. Zaitsev V. Y. // MRS Bull. 2019. V. 44, No. 5. P. 350–360. <https://doi.org/10.1557/mrs.2019.109>
24. Scalerandi M., Gliozzi A. S., Bruno C. L. E., et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92, No. 10. Art. no. 101912. <https://doi.org/10.1063/1.2890031>
25. Van Den Abeele K. A., Johnson P. A., Sutin A. // J. Res. Nondestructive Evaluation. 2000. V. 12, No. 1. P. 17–30. <https://doi.org/10.1080/09349840009409646>
26. Лебедев А. В., Островский Л. А., Сутин А. М. // Акуст. журн. 2005. Т. 51, № 7 (приложение). С. 103–117.
27. Nowick A. S. // Progr. Metal Phys. 1953. V. 4. P. 1–70.
28. Назаров В. Е., Кияшко С. Б. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 10. С. 762–773.
29. Sutin A. M., Donskoy D. M. // Proc. SPIE. 1998. V. 3397. P. 226–238. <https://doi.org/10.1117/12.305057>
30. Johnson P. A., Sutin A., Van Den Abeele K. E. A. Application of nonlinear wave modulation spectroscopy to discern material damage : techn. rep. LA-UR-99-753. Los Alamos : Los Alamos National Lab., 1999. 11 p.
31. Zaitsev V. Y., Gusev V., Castagnede B. // Ultrasonics. 2002. V. 40, No. 1–8. P. 627–631. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(02\)00187-7](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(02)00187-7)
32. Johnson P., Sutin A. // J. Acoust. Soc. America. 2005. V. 117, No. 1. P. 124–130. <https://doi.org/10.1121/1.1823351>
33. Leśnicki K. J., Kim J. Y., Kurtis K. E., Jacobs L. J. // NDT & E International. 2011. V. 44, No. 8. P. 721–727. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.07.010>

34. Hillis A. J., Neild S. A., Drinkwater B. W., Wilcox P. D. // Proc. R. Soc. Lond. A. 2006. V. 462, No. 2069. P. 1515–1530. <https://doi.org/10.1098/rspa.2005.1620>
35. Chomas J., Dayton P., May D., Ferrara K. // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2002. V. 49, No. 7. P. 883–892. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2002.1020158>
36. Solodov I., Wackerl J., Pfeleiderer K., Busse G. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84, No. 26. P. 5386–5388. <https://doi.org/10.1063/1.1767283>
37. Cantrell J. H., Salama K. // Int. Materials Rev. 1991. V. 36, No. 1. P. 125–145. <https://doi.org/10.1179/imr.1991.36.1.125>
38. Курашкин К. В. // Акуст. журн. 2019. Т. 65, № 3. С. 382–388. <https://doi.org/10.1134/S0320791919030055>
39. Zumpano G., Meo M. // Int. J. Solids Struct. 2007. V. 44, No. 11–12. P. 3666–3684. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.10.010>
40. Ulrich T. J., Johnson P. A., Sutin A. // J. Acoust. Soc. America. 2006. V. 119, No. 3. P. 1514–1518. <https://doi.org/10.1121/1.2168413>
41. Solodov I. // J. Nondestructive Evaluation. 2014. V. 33, No. 2. P. 252–262. <https://doi.org/10.1007/s10921-014-0229-9>
42. Solodov I., Bai J., Begulyan S., Busse G. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99, No. 21. Art. no. 211911. <https://doi.org/10.1063/1.3663872>
43. Burns P. N., Simpson D. H., Averkiou M. A. // Ultrasound in Medicine & Biology. 2000. V. 26. P. S19–S22. [https://doi.org/10.1016/S0301-5629\(01\)00463-X](https://doi.org/10.1016/S0301-5629(01)00463-X)
44. Tranquart F., Grenier N., Eder V., Pourcelot L. // Ultrasound in Medicine & Biology. 1999. V. 25, No. 6. P. 889–894. [https://doi.org/10.1016/S0301-5629\(99\)00060-5](https://doi.org/10.1016/S0301-5629(99)00060-5)
45. Monk P. // Nonlinear Processes in Physics / ed. by A. S. Fokas, D. Kaup, A. C. Newell, V. E. Zakharov. Berlin : Springer, 1993. P. 334–338.
46. Maurer H. R., Schubert S., Bächle F., et al. // Proc. 14th Int. Symp. Nondestructive Testing of Wood. May 2005, Eberswalde. P. 337–350.
47. Burov V. A., Gurinovich I. E., Rudenko O. V., Tagunov E. Y. // Acoustical Imaging / ed. by P. Tortoli, L. Masotti. Boston : Springer, 1996. P. 125–130. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8772-3_20
48. Буров В. А., Шмелёв А. А., Зотов Д. И. // Акуст. журн. 2013. Т. 59, № 1. С. 31–51. <https://doi.org/10.7868/S0320791913010061>
49. Kazakov V. V., Sutin A., Johnson P. A. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81, No. 4. P. 646–648. <https://doi.org/10.1063/1.1495081>
50. Li W., Cho Y. // Ultrasonics. 2016. V. 65. P. 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.10.016>
51. Semperlotti F., Conlon S. C. // J. Acoust. Soc. America. 2010. V. 127, No. 2. P. EL48–EL53. <https://doi.org/10.1121/1.3290175>
52. Lamberti A., Semperlotti F. // Smart Materials and Structures. 2013. V. 22, No. 12. Art. no. 125006. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/12/125006>
53. Carstensen E. L., Law W. K., McKay N. D., Muir T. G. // Ultrasound Med. Biol. 1980. V. 6, No. 4. P. 359–368. [https://doi.org/10.1016/0301-5629\(80\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0301-5629(80)90005-8)
54. Rudenko O. V., Sarvazyan A. P. // Crit. Rev. Biomed. Eng. 2000. No. 3. P. 6–19. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22536-4>
55. Therapeutic ultrasound / ed. by J. M. Escoffre, A. Bouakaz. V. 880. New York : Springer International Publishing, 2015. 179 p.
56. Островский Л. А., Сутин А. М. // Докл. АН СССР. 1975. Т. 221, № 6. С. 1300–1303.
57. Сутин А. М. // Акуст. журн. 1978. Т. 24, № 4. С. 593–601.
58. Naugolnykh K. A., Ostrovsky L. A. Nonlinear wave processes in acoustics. New York : Cambridge

- University Press, 1998. 310 p.
59. Бахвалов Н. С., Жилейкин Я. М., Заболотская Е. А., Хохлов Р. В. // Акуст. журн. 1978. Т. 24, № 1. С. 21–28.
 60. Бессонова О. В., Хохлова В. А., Бэйли М. Р. и др. // Акуст. журн. 2009. Т. 55, № 4–5. С. 445–456.
 61. Rosnitskiy P. B., Yuldashev P. V., Sapozhnikov O. A., et al. // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2016. V. 64, No. 2. P. 374–390. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2016.2619913>
 62. Schrope B., Newhouse V., Uhlendorf V. // J. Acoust. Soc. America. 1991. V. 90, No. 4. P. 2358. [https://doi.org/10.1016/0161-7346\(92\)90004-F](https://doi.org/10.1016/0161-7346(92)90004-F)
 63. Ostrovsky L., Sutin A. // Abst. 12th Int. Acoust. Congr. Assoc. Symp. Underwater Acoust. 16–18 July 1986, Halifax. P. 39.
 64. Muller M., Sutin A., Guyer R., et al. // J. Acoust. Soc. America. 2005. V. 118, No. 6. P. 3946–3952. <https://doi.org/10.1121/1.2126917>
 65. Renaud G., Callé S., Remenieras J. P., Defontaine M. // Int. J. Nonlin. Mech. 2008. V. 43, No. 3. P. 194–200. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2007.12.007>
 66. Zacharias K., Balabanidou E., Hatzokos I., et al. // J. Biomech. 2009. V. 42, No. 5. P. 581–586. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.12.018>
 67. Mustapha F. Innovation in Smart Materials and Structural Health Monitoring for Composite Applications. Millersville : Materials Research Forum, 2017. 184 p.
 68. Structural health monitoring of civil infrastructure systems / ed by. V. M. Karbhari, F. Ansari. 2009. Amsterdam : Elsevier, 2009. 552 p.
 69. Farrar C. R., Worden K. Structural health monitoring: a machine learning perspective. Hoboken : John Wiley & Sons, 2012. 654 p.
 70. Yan R., Chen X., Mukhopadhyay S. C. Structural health monitoring. Berlin : Springer, 2017. 386 p.
 71. Mitra M., Gopalakrishnan S. // Smart Mater. Struct. 2016. V. 25, No. 5. Art. no. 053001. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/5/053001>
 72. Identification Methods for Structural Health Monitoring / ed. by E. N. Chatzi, C. Papadimitriou. New York : Springer International Publishing, 2016. 179 p.
 73. Structural health monitoring (SHM) in aerospace structures / ed. by F. G. Yuan. Sawston : Woodhead Publishing, 2016. 514 p.
 74. Richards W. L., Madaras E. I., Prosser W. H., Studor G. // 9th Int. Workshop Structural Health Monitoring. 10 September 2013, Stanford. Art. no. 20140011091.
 75. Worden K., Farrar C. R., Haywood J., Todd M. // Struct. Control. Health Monit. 2008. V. 15, No. 4. P. 540–567. <https://doi.org/10.1002/stc.215>
 76. Hillis A. J., Courtney C. R. P. // J. Sound Vib. 2011. V. 330, No. 6. P. 1141–1152. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.09.019>
 77. Jiao J. P., Drinkwater B. W., Neild S. A., Wilcox P. D. // Smart Mater. Struct. 2009. V. 18, No. 6. Art. no. 065006. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/6/065006>
 78. Zagrai A., Doyle D., Arritt B. // Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2008. V. 6935. Art. no. 693505. <https://doi.org/10.1117/12.775766>
 79. Nagy K., Dousis D. A., Finch R. D. // J. Eng. Ind. 1978. V. 100, No. 4. P. 459–465. <https://doi.org/10.1115/1.3439461>
 80. Markine V. L., De Man A. P., Esveld C. // IUTAM Symposium on Field Analyses for Determination of Material Parameters — Experimental and Numerical Aspects / ed. by P. Stähle, K. G. Sundin. New York : Springer, 2003. P. 27–36. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0109-0>
 81. Gucunski N., Yan M., Wang Z., et al. // J. Infrastruct. Syst. 2011. V. 18, No. 1. P. 12–24.

- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000060](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000060)
82. Suarez S. A., Gibson R. F. // *J. Test. Eval.* 1987. V. 15, No. 2. P. 114–121. <https://doi.org/10.1520/JTE10991J>
 83. Aircraft Inspection and Repair / Federal Aviation Administration. New York : Skyhorse Publishing Inc., 2013. 824 p.
 84. Sutin A. M., Guyer R. A., Johnson P. A. // *J. Acoust. Soc. America.* 2000. V. 107, No. 5. P. 2846–2846. <https://doi.org/10.1121/1.429198>
 85. Kin Y., Zhou C., Parsons B., et al. // *AISTech — Iron and Steel Technology Conf. Proc.* 2004. V. 2. P. 895–901.
 86. Van Den Abeele K., Le Bas P. Y., Van Damme B., Katkowski T. // *J. Acoust. Soc. America.* 2009. V. 126, No. 3. P. 963–972. <https://doi.org/10.1121/1.3184583>
 87. Zhu X., Hao H. // *Int. J. Struct. Stab. Dyn.* 2009. V. 9, No. 4. P. 687–709. <https://doi.org/10.1142/S0219455409003247>
 88. Neild S. A. Using non-linear vibration techniques to detect damage in concrete bridges : PhD Thesis. University of Bristol, 2001. 249 p.
 89. Li C., Lubecke V. M., Boric-Lubecke O., Lin J. // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2013. V. 61, No. 5. P. 2046–2060. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2013.2256924>
 90. Li C., Peng Z., Huang T. Y., et al. // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2017. V. 65, No. 5. P. 1692–1706. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2650911>
 91. Moll J., Bechtel K., Hils B., Krozer V. // 7th European Workshop on Structural Health Monitoring. 8–11 July, 2014, Nantes. P. 1802–1808.
 92. Moll J., Krozer V. // 8th European Workshop on Structural Health Monitoring. 5–8 July 2016, Bilbao. P. 1–6.
 93. Scott Jr W. R., Larson G. D., Martin J. S. // *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets.* 2000. V. 4038. P. 667–678. <https://doi.org/10.1117/12.396295>
 94. Qiu L., Jin T., Lu B., Zhou Z. // *IET Int. Radar Conf.* 14–16 Oct. 2015, Hangzhou. Art. no. 1115. <https://doi.org/10.1049/cp.2015.1115>
 95. Lubecke V. M., Boric-Lubecke O., Host-Madsen A., Fathy A. E. // 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. 3–8 Jun. 2007, Honolulu. P. 769–772. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2007.380053>
 96. Crocco L., Ferrara V. // *Int. Conf. Collaboration Technologies and Systems.* 19–23 May 2014, Minneapolis. P. 535–540. <https://doi.org/10.1109/CTS.2014.6867620>
 97. Top C. B., Tafreshi A. K., Gençer N. G. // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2016. V. 64, No. 11. P. 3974–3986. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2607713>
 98. Tafreshi A. K., Top C. B., Gençer N. G. // *Phys. Med. Biol.* 2017. V. 62, No. 12. P. 4852–4869. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa5de1>
 99. Fatemi M., Greenleaf J. F. // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 1999. V. 96, No. 12. P. 6603–6608. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.12.6603>
 100. Nightingale K. R., Palmeri M. L., Nightingale R. W., Trahey G. E. // *J. Acoust. Soc. America.* 2001. V. 110, No. 1. P. 625–634. <https://doi.org/10.1121/1.1378344>
 101. Konofagou E. E., Hynynen K. // *Ultrasound Med. Biol.* 2003. V. 29, No. 10. P. 1405–1413. [https://doi.org/10.1016/S0301-5629\(03\)00953-0](https://doi.org/10.1016/S0301-5629(03)00953-0)
 102. Ammari H., Bossy E., Garnier J., Seppecher L. // *SIAM J. Appl. Math.* 2012. V. 72, No. 5. P. 1592–1617. <https://doi.org/10.1137/120863654>
 103. Ostrovsky L., Sutin A., Il'inskii Y., et al. // *J. Acoust. Soc. America.* 2007. V. 121, No. 3. P. 1324–1331. <https://doi.org/10.1121/1.2532113>
 104. Ostrovsky L. A. // *J. Acoust. Soc. America.* 2008. V. 124, No. 3. P. 1404–1407.

- <https://doi.org/10.1121/1.2956473>
105. Заболотская Е. А., Солюян С. И. // Акуст. журн. 1972. Т. 18, № 3. С. 472–474.
 106. Tang M. X., Eckersley R. J. // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2006 V. 53, No. 12. P. 2406–2415. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2006.189>
 107. Ostrovsky L. A., Sutin A. M., Soustova I. A., et al. // J. Acoust. Soc. America. 2003. V. 113, No. 2. P. 741–749. <https://doi.org/10.1121/1.1526497>
 108. Карпов С. В., Клусек Э., Матвеев А. Л. и др. // Акуст. журн. 1996. Т. 42, № 4. С. 527–533.
 109. Chen Y., Kosmas P. // IEEE. Trans. Biomed. Eng. 2011. V. 59, No. 3. P. 766–776. <https://doi.org/10.1109/TBME.2011.2179035>
 110. Gao F., Van Veen B. D. Hagness S. C. // 2013 IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. 7–13 Jul. 2013, Orlando. P. 2030–2031. <https://doi.org/10.1109/APS.2013.6711673>
 111. Qaddoumi N., Ranu E., McColskey J. D., et al. // J. Res. Nondestruct. Eval. 2000. V. 12, No. 2. P. 87–103. <https://doi.org/10.1080/09349840009409652>
 112. Johnson S. A., Christensen D. A., Johnson C. C., et al. // Ultrason. Symp. Proc. 26–28 Oct. 1977, Phoenix. P. 977–982. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1977.196983>
 113. Chu Z., Pinter S. Z., Yuan J., et al. // AIP Conf. Proc. 2017. V. 1816, No. 1. Art. no. 050003. <https://doi.org/10.1063/1.4976601>
 114. Yang C., Wu S., Bai Y., Gao H. // Frontiers of Biology in China. 2009. V. 4, No. 3. P. 254–259. <https://doi.org/10.1007/s11515-009-0022-9>
 115. Mashal A., Booske J. H., Hagness S. C. // Phys. Med. Biol. 2009. V. 54, No. 3. P. 641–650. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/54/3/011>
 116. Rueter D., Morgenstern T. // Ultrasonics. 2014. V. 54, No. 8. P. 2141–2150. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.06.012>
 117. Jian X., Dixon S., Edwards R. S. // Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2004. V. 46, No. 11. P. 671–673. <https://doi.org/10.1784/insi.46.11.671.52289>
 118. Wincheski B. A., Simpson J. W., Koshti A. Development of Eddy Current Techniques for the Detection of Cracking In Space Shuttle Primary Reaction Control Thrusters : techn. rep. NASA/TP-2007-214878, L-19338. Houston : NASA Johnson Space Center, 2007. 8 p.
 119. Hansen J. // Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2004. V. 46, No. 5. P. 279–281. <https://doi.org/10.1784/insi.46.5.279.55563>

Поступила в редакцию 29 ноября 2019 г.; принята в печать 29 января 2020 г.

INTERACTION OF ACOUSTIC AND ELECTROMAGNETIC WAVES IN NONDESTRUCTIVE EVALUATION AND MEDICAL APPLICATIONS

A. M. Sutin and H. Salloum

Nonlinear acoustic nondestructive evaluation (NA NDE) methods have a higher sensitivity for defect detection than standard methods. These methods use various kinds of acoustic wave interactions. In this paper, we suggest augmenting the acoustic framework and use the interaction between acoustic and electromagnetic waves. A brief review of NA NDE and medical nonlinear acoustic imaging methods is presented. Medical methods based on electromagnetic wave modulation by an acoustic radiation force are discussed where improvements using ultrasound contrast agents are suggested. The estimation of the modulation of a radar signal by a crack vibration were made based on standard static measurements. The effects of modulation of an acoustic wave by an electromagnetic field are briefly considered for the method of crack detection in metal materials. The effects considered in this paper may be used in the new methods of NDE and medical diagnostics.

A. M. Сутин, Х. Саллоум