

ЛАЗЕРНОЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ СЛАБЫХ ДЕФЕКТОВ НА ОСНОВЕ ОСЦИЛЛЯТОРА ДУФФИНГА

© 2025 г. Пэн Хуэй¹, Цзэн Вэй^{1,*}

¹Университет Цзюцзян, Цзюцзян, Цзянси, Китай
E-mail: *270401671@qq.com

Поступила в редакцию 05.07.2024; после доработки 26.09.2024
Принята к публикации 11.10.2024

Рассматривается проблема традиционных лазерных ультразвуковых методов, когда обнаружению поверхностных дефектов в металлических материалах часто препятствует шум, и предлагается новый подход, сочетающий лазерный ультразвук с осцилляторами Дуффинга для достижения высокого соотношения сигнал/шум для слабых сигналов от дефектов на металлических поверхностях. Используя чувствительность хаотической системы осциллятора Дуффинга к начальным условиям и его помехоустойчивость, мы можем точно определить местоположение слабых дефектов. Результаты моделирования подтверждают эффективность и стабильность этого метода для обнаружения поверхностных дефектов в металлических листах.

Ключевые слова: обнаружение слабых сигналов, лазерный ультразвук, осциллятор Дуффинга, хаотическая система.

LASER ULTRASONIC WEAK DEFECT SIGNAL DETECTION BASED ON DUFFING OSCILLATOR

© 2025 Peng Hui¹, Zeng Wei^{1,*}

¹Jiujiang University, Jiujiang, Jiangxi, China
E-mail: *270401671@qq.com

This paper addresses the challenge in traditional laser ultrasonic methods, where the detection of surface defects in metal materials is often hindered by noise, and a novel approach that combines laser ultrasonics with Duffing oscillators to achieve a high signal-to-noise ratio for weak defect signals on metal surfaces is proposed. By leveraging the sensitivity of the Duffing oscillator's chaotic system to initial conditions and its noise immunity, we can accurately identify the location of weak defects. Simulation results confirm the effectiveness and stability of this method for detecting surface defects in metal sheets.

Keywords: weak signal detection, laser ultrasonic, Duffing oscillator, chaotic system.

DOI: 10.31857/S0130308225010039

1. ВВЕДЕНИЕ

При обнаружении дефектов материалов выявление слабых сигналов (ОСС) имеет решающее значение для идентификации сигналов, которые малы и часто заглушены шумом. Традиционные методы позволяют повысить соотношение сигнал/шум за счет улучшения источников сигнала, схем усиления и шумоподавления. Однако в практических применениях им часто мешает шум окружающей среды и трудно выявить сигналы от дефектов. Поэтому обнаружение слабых сигналов, заглушенных шумом, является актуальной проблемой. В данной работе применяется теория хаоса, использующая чувствительность и помехоустойчивость хаотических систем для обнаружения слабых сигналов дефектов [1, 2] на металлических поверхностях. Этот метод имеет перспективное применение в диагностике механических неисправностей, обнаружении дефектов материалов и биомедицине. Кроме того, для обнаружения слабых сигналов в шумной среде реализован массив осцилляторов Дуффинга, предназначенный для обнаружения слабых сигналов в онлайн-режиме [3]. Система осциллятора Дуффинга, как хорошо изученная хаотическая система, находится в центре внимания данного исследования. В данной работе осциллятор Дуффинга внедрен в лазерное ультразвуковое обнаружение дефектов микротрещин. Изменение фазовой диаграммы используется для определения наличия слабого лазерного ультразвукового сигнала, который должен быть обнаружен. Это имеет важное теоретическое значение и практическую ценность для лазерного ультразвукового обнаружения микротрещин на поверхности материалов.

В ответ на проблемы, связанные с традиционной системой Дуффинга, ученые предложили и обсудили несколько улучшений. К ним относятся: разработка системы обнаружения осциллятора Дуффинга с двойной связью [4, 12], усовершенствования, основанные на ансамблевом

эмпирическом разложении мод [6, 7], и использование гамильтонианов для построения статистики, выражающей изменения состояния системы Дуффинга [8]. Кроме того, были исследованы методы, объединяющие систему Дуффинга с системой Ван дер Поля [9], а также двумерная система Дуффинга со стохастическим резонансом и свойствами хаоса [13]. Кроме того, были исследованы усовершенствования, основанные на диаграммах фазовых траекторий и экспоненциальных диаграммах Ляпунова различных систем Дуффинга [14].

Традиционная система хаотических осцилляторов сталкивается с рядом проблем при обнаружении слабых сигналов на фоне сильного шума, включая нестабильные изменения фазы, пропуск обнаружения сигналов с ненулевой начальной фазой и плохую помехоустойчивость. Для решения этих проблем Гун Сюэфанг и др. [4] использовали производную первого порядка от связанного осциллятора Дуффинга, чтобы повысить стабильность и помехоустойчивость алгоритма. Этот метод позволил обнаруживать синусоидальные сигналы с любой начальной фазой через массив, тем самым снижая вычислительную нагрузку на систему. Результаты моделирования показывают, что данный подход может успешно обнаруживать синусоидальные сигналы с любой начальной фазой, значительно улучшая стабильность и помехоустойчивость системы. Панкоатль-Бортолотти и др. [16] представили систему, состоящую из нового осциллятора Синка—Дуффинга, который продемонстрировал более высокую чувствительность по сравнению с традиционными осцилляторами Дуффинга или Ван дер Поля—Дуффинга для обнаружения слабых сигналов с отношением сигнал/шум -70 дБ. Кроме того, Д.Л. Биркс и др. [17] представили нейронную сеть с комплексным отображением (CMFFN) для различения сигналов, скрытых в случайном гауссовском шуме с отношением сигнал/шум -12 дБ.

Чувствительность уравнения Дуффинга к начальным значениям делает выбор параметров системы критически важным для эффективности обнаружения. Чжао Бо и др. [5] проанализировали связь между параметрами уравнения Дуффинга и начальными значениями, а также влияние различных параметров на результаты обнаружения. Для решения проблемы обнаружения слабых сигналов на фоне сильного шума Ли Цзингуй и др. [6] предложили усовершенствованную систему осциллятора Дуффинга с двойной связью, основанную на множественной декомпозиции на эмпирические моды (МДЭМ). Эта система эффективно решает проблему наложения мод нескольких периодических компонентов в зашумленных сигналах. Кроме того, Син Хонгян и др. [7] объединили метод комплементарной множественной декомпозиции на эмпирические моды (СЕМД) с осциллятором Дуффинга с переменным масштабом для разложения сложных зашумленных сигналов на различные функции внутреннего режима (IMF). Используя бифуркационные диаграммы системы Дуффинга и изменения фазовых траекторий, этот метод позволяет обнаруживать зашумленные слабые сигналы. Он не только обладает высокой помехоустойчивостью, но и может эффективно обнаруживать многочастотные периодические сигналы с отношением сигнал/шум до -73 дБ.

Большинство методов обнаружения слабых сигналов на основе осцилляторов Дуффинга сосредоточены на качественном анализе фазовых диаграмм, однако некоторые инновационные подходы привлекли внимание ученых. Вэй Хэндун [8] применил гамильтонианы для построения статистики количественной дискриминации слабых сигналов, что позволило быстро обнаружить их даже при низком отношении сигнал/шум. Луо Вэньхуэй [9] добился обнаружения слабых сигналов, используя мутационные характеристики динамического состояния хаотической системы. Нин Айпин [10] использовал нейронные сети для создания модели хаотических систем, обеспечив теоретическую поддержку обнаружения слабых сигналов в хаотических средах. Цзэн Вэй [13] использовал двумерную систему Дуффинга со стохастическим резонансом и характеристиками хаоса, рассмотрев ограничения стохастического резонанса в обнаружении амплитуды слабого сигнала и проблемы теории хаоса в обнаружении частоты. Чен Юаньцзе и коллеги [14] предложили усовершенствованную систему осциллятора Дуффинга, которая эффективно устраняет пропуски и ошибки обнаружения при переходе из хаотического состояния в периодическое, обеспечивая более точные оценки амплитуды и превосходную помехоустойчивость. Дикс [15] разработал новый репликативный корреляционный детектор для обнаружения подводных акустических сигналов. При определенных условиях конфигурации переходный механизм Дуффинга демонстрирует превосходные характеристики обнаружения по сравнению с эталонным линейным детектором.

В настоящее время метод обнаружения слабых сигналов на основе системы осциллятора Дуффинга применяется для диагностики механических неисправностей и обнаружения дефектов материалов. Например, Цзэн Вэй [11] использовал метод стохастического резонанса для повышения энергии полезных сигналов при диагностике неисправностей подшипников качения, тем самым обнаруживая слабые сигналы. Сунь Янлун [15] предложил комбинацию осцилляторов Дуффинга с двойной связью и EMD-разложения, а также метод стохастическо-

го резонанса осцилляторов Дуффинга с двойной связью для успешного извлечения признаков слабых сигналов механических повреждений. При использовании ультразвуковых направленных волн для выявления небольших дефектов в длинных трубопроводах Ву Цзин [18, 19] выполнил оценку повреждений и локализацию дефектных трубопроводов с помощью максимального индекса Ляпунова уравнения Дуффинга. Чжан Вэйвэй с коллегами [20] использовали $(-x^3 + x^5)$ в качестве члена нелинейной восстанавливающей силы в уравнении Дуффинга для идентификации возникновения сигналов управляемых волн путем обнаружения значительных изменений на диаграмме фазовой орбиты системы. Сунь Янлун [21] предложил комбинацию осцилляторов Дуффинга с двойной связью и EMD-разложения, а также метод стохастического резонанса осцилляторов Дуффинга с двойной связью для успешного извлечения признаков слабых сигналов механических повреждений. Светлин Стоянов [22] использовал принудительный осциллятор Дуффинга для подтверждения наличия дефекта в механизмах в области вибродиагностики машин. В.Н. Патель и др. [23] оценили локальные дефекты на дорожках качения радиального шарикоподшипника при наличии внешних вибраций с помощью анализа огибающей и осциллятора Дуффинга.

В то время, как метод обнаружения слабых сигналов на основе осциллятора Дуффинга нашел применение в диагностике неисправностей трубопроводов, рельсов и механических устройств, его использование для обнаружения поверхностных дефектов в металлических листах было ограничено. В связи с этим в данной статье представлен новый подход, сочетающий лазерно-ультразвуковую и осцилляторную систему Дуффинга для выявления мизерных дефектов на поверхности алюминиевых листов. Более того, он точно определяет местоположение дефектов, наблюдая за изменениями в состоянии системы осциллятора Дуффинга. Такое объединение демонстрирует эффективность и стабильность метода.

2. МЕХАНИЗМ ОБНАРУЖЕНИЯ СЛАБОГО СИГНАЛА НА ОСНОВЕ ОСЦИЛЛЯТОРА ДУФФИНГА

Традиционные методы обнаружения во временной и частотной областях оказываются неэффективными, когда на слабые сигналы воздействуют шумы и помехи из окружающей среды. По мере развития исследований и применения теории хаоса методы обнаружения сигналов на основе хаоса постепенно внедряются в сферу обнаружения слабых сигналов, давая многообещающие результаты. Метод обнаружения сигналов на основе хаоса в первую очередь использует систему осциллятора Дуффинга для обнаружения слабых синусоидальных сигналов. Этот подход предполагает извлечение и обработку информации из неустойчивого и неравновесного состояния системы осциллятора Дуффинга, используя чувствительность хаотической системы к начальному состоянию и ее устойчивость к шуму. Наблюдение за переходом фазовой траектории осциллятора Дуффинга от хаотической к периодической или от периодической к хаотической позволяет успешно обнаруживать слабые сигналы на фоне сильного шума [24—26].

2.1. Модель обнаружения системы осциллятора Дуффинга типа Холмса

Установленная форма уравнения системы выглядит следующим образом:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + k \frac{dx}{dt} - x + x^3 = F \cos wt, \quad (1)$$

где F — движущая сила; w — угловая частота движущей силы; k — коэффициент демпфирования; $(-x + x^3)$ — нелинейная восстанавливающая сила. В практических применениях часто используется улучшенная версия уравнения (1), которая выражается следующим образом:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + k \frac{dx}{dt} + x^3 - x^5 = F \cos wt, \quad (2)$$

где $(x^3 - x^5)$ обозначает нелинейную восстанавливающую силу. Хотя динамические характеристики двух вышеупомянутых систем Дуффинга очень похожи, большое количество результатов моделирования показывает, что система, представленная в уравнении (2), лучше, чем уравнение (1), в обнаружении слабых сигналов.

2.2. Индекс Ляпунова

Из-за чувствительности хаотической системы к начальному состоянию две соседние траектории с разными начальными условиями в фазовом пространстве либо сходятся, либо расходятся с течением времени. Индекс Ляпунова служит показателем для количественной оценки степени сближения или расхождения между этими траекториями [20]. В многомерных системах существует несколько экспонент Ляпунова, и наличие хаоса можно определить, оценив наибольшую экспоненту Ляпунова. С учетом вышеизложенного объяснения, первый индекс Ляпунова системы определяется таким образом (где « l » означает длину главной оси эллипсоида):

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{l}{t} \log_2 \frac{\varepsilon_i(x(t))}{\varepsilon_i(x_0)}; \quad (3)$$

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{l}{t} \ln \frac{\varepsilon_i(x(t))}{\varepsilon_i(x_0)}. \quad (4)$$

Согласно определению, индекс Ляпунова, равный нулю, означает, что фазовая траектория не сходится и не расходится. Индекс Ляпунова меньше нуля означает, что фазовая траектория системы возвращается к хаотическому аттрактору с экспоненциальной скоростью и в конце концов стабилизируется. И наоборот, индекс Ляпунова больше нуля означает, что фазовые траектории усиливаются с экспоненциальной скоростью из-за меняющихся начальных условий, что приводит к быстрому разделению и указывает на локальную неустойчивость системы. Следовательно, когда максимальный индекс Ляпунова системы превышает ноль, это указывает на то, что система перешла в хаотическое состояние.

2.3. Метод обнаружения слабого сигнала

Используя чувствительность хаотической системы к начальным условиям и параметрам системы, введение слабого сигнала для обнаружения в чувствительную хаотическую систему изменяет динамическое поведение системы. Следовательно, использование подходящих методов обработки сигналов позволяет обнаруживать слабые сигналы путем мониторинга динамических изменений в хаотической системе.

Из-за типичного использования синусоидального или косинусоидального сигнала в качестве движущей силы в хаотической системе типа Холмса—Дуффинга, система Дуффинга демонстрирует высокую чувствительность к синусоидальным периодическим сигналам. Если предположить, что сигнал, который необходимо обнаружить, представлен через s , то система уравнений (2) может быть выражена следующим образом:

$$\frac{d^2x}{dt} + k \frac{dx}{dt} + x^3 - x^5 = F \cos wt + \gamma \sin w_0 t. \quad (5)$$

Когда $w = w_0$, т.е. когда частота слабого сигнала, подлежащего обнаружению, совпадает с частотой движущей силы, уравнение (5) может быть переписано как

$$\frac{d^2x}{dt} + k \frac{dx}{dt} + x^3 - x^5 = \sqrt{F^2 + \gamma^2} \cos(wt - \arctan \frac{F}{\gamma}). \quad (6)$$

Из уравнения (2) видно, что когда система Дуффинга не содержит детектируемого сигнала, она может находиться в критическом состоянии, переходя из хаотического состояния в периодическое или наоборот путем перестройки параметров. В таком состоянии введение в систему слабого синусоидального сигнала (т.е. в систему, описываемую уравнением (6)) приводит к существенным изменениям состояния системы Дуффинга, в результате чего она переходит в хаотическое или периодическое состояние, как показано на рис. 1. На рисунке показаны изменения фазовой траектории системы при изменении движущей силы от малой до большой. Левый сегмент изображает фазовую траекторию системы в периодическом состоянии, когда движущая сила равна 2,0. При постепенном увеличении движущей силы до 5,0 фазовая траектория системы переходит в хаотическое состояние, как показано в средней части рис. 1. Дальнейшее увеличение движущей силы до 8,0 приводит к возвращению фазовой траектории системы в периодическое состояние, как показано в правой части рис. 1.

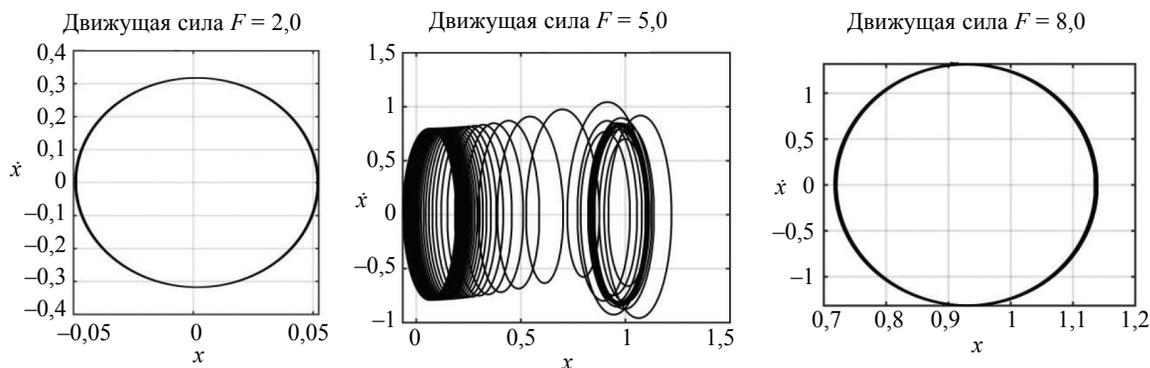


Рис. 1. Фазовая траектория системы Дуффинга под действием различных движущих сил.

Кроме того, для повышения точности распознавания изменений состояния в системе Дуффинга необходимо рассчитать индекс Ляпунова системы. Этот расчет помогает предотвратить возможные неверные интерпретации, основанные только на диаграмме фазовой траектории.

Таким образом, шаги для реализации обнаружения слабого сигнала с помощью системы осциллятора Дуффинга выглядят следующим образом:

1. Создание системы моделирования осциллятора Дуффинга в среде Matlab.
2. Определение параметров системы осциллятора Дуффинга, таких как коэффициент затухания и частота внешней движущей силы, которые определяют динамическое поведение системы;
3. Постепенная регулировка амплитуды внешней движущей силы, чтобы система находилась в критическом состоянии между хаотическим и периодическим состоянием.
4. Затем вводим в систему осциллятора Дуффинга слабый периодический сигнал и наблюдаем за изменением фазовой траектории системы, особенно за изменением поведения вблизи критического состояния.
5. Вычисление индекса Ляпунова до и после ввода слабого периодического сигнала и сравнение их изменений. Поскольку индекс Ляпунова может быть использован для измерения степени хаоса в системе, то он применяется для дальнейшего подтверждения состояния системы осциллятора Дуффинга. Если максимальное значение индекса Ляпунова меньше 1 после подачи слабого сигнала, это означает, что система находится в периодическом состоянии, в противном случае — в хаотическом.

3. ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ СЛАБЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ДУФФИНГА

В данном исследовании в качестве объекта исследования выбраны алюминиевые пластины, а лазерный ультразвук используется для обнаружения поверхностных дефектов различного размера в материалах из алюминиевых сплавов. Как указано в литературе [27, 28], для построения лазерно-ультразвуковой имитационной модели в данном исследовании использовалось программное обеспечение COMSOL 5.3. Конкретные параметры модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства алюминиевого материала, использованного в численном моделировании

E , МПа	Коэффициент Пуассона, ν	ρ , кг/м ³	Толщина d , мм
71	0,33	$2,7 \times 10^3$	10
Теплопроводность, Вт/м К ⁻¹	Температуропроводность, Вт/м К ⁻¹	Постоянная Лэмба, $\lambda/10^{10}$ Па	Постоянная Ламе, $\mu/10^{10}$ Па
249,5—0,08Г	$2,31 \times 10^{-5}$	5,81	2,61

Лазерное облучение поверхности алюминиевой пластины генерирует лазерные ультразвуковые сигналы внутри пластины за счет лазерного теплового механизма. Данное исследование посвящено лазерно-ультразвуковому обнаружению поверхностных дефектов различных размеров, расположенных перпендикулярно поверхности под углом 90°. Микротрещины на по-

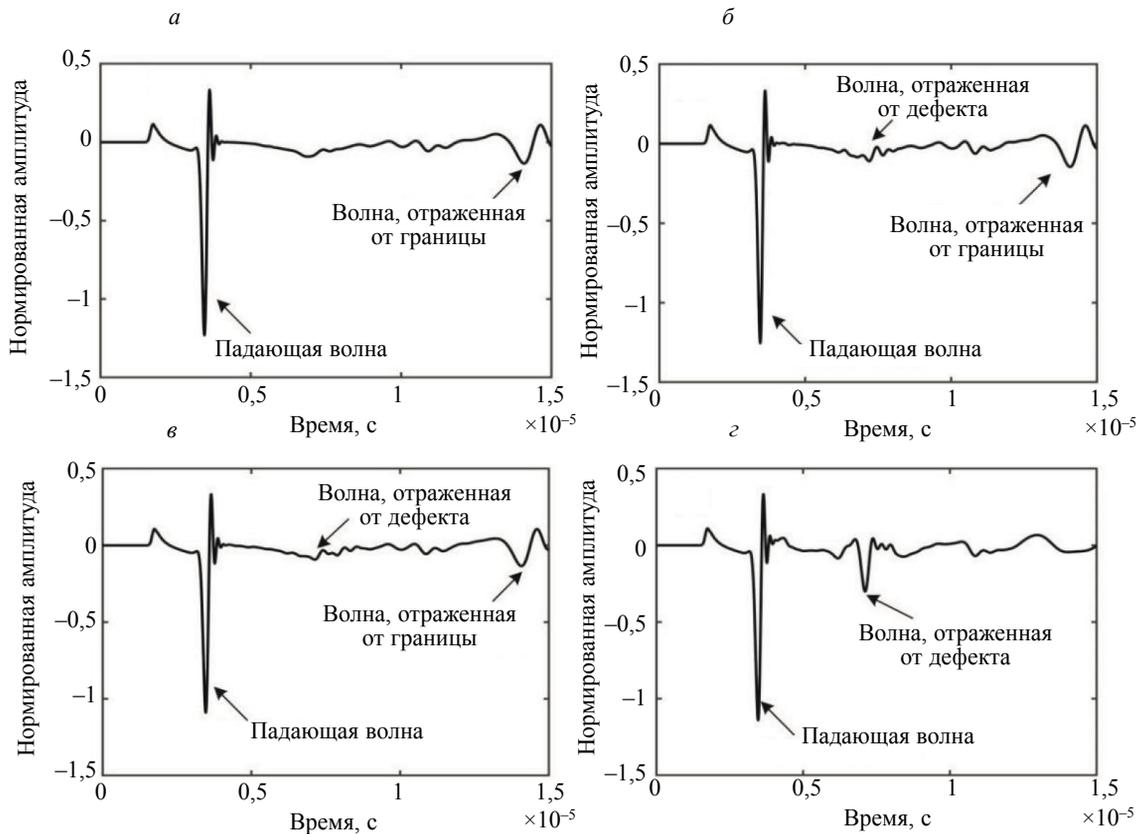


Рис. 2. Лазерные ультразвуковые сигналы, полученные при различных поверхностных дефектах: без поверхностных дефектов (а); $0,1 \times 0,1$ мм (б); $0,5 \times 0,1$ мм (в); $1,0 \times 0,1$ мм (г).

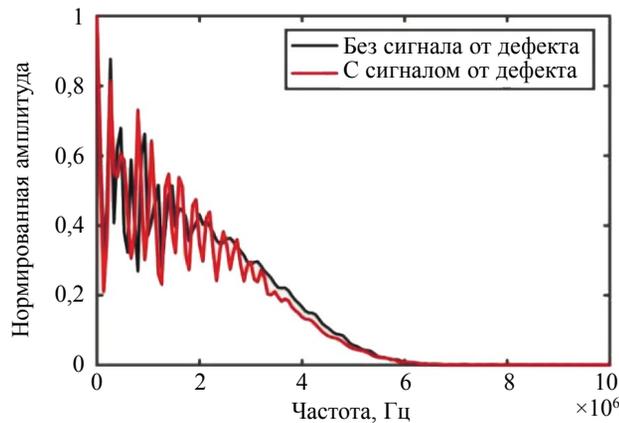


Рис.3. Спектр лазерного ультразвукового сигнала с поверхностными дефектами и без них.

верхности алюминиевой пластины имеют размеры $0,1 \times 0,1$ мм; $0,5 \times 0,1$ мм; $1,0 \times 0,1$ мм, а также бездефектные образцы. Наконец, анализ обработки сигналов выполнен с помощью MATLAB, версии 2021.

На рис. 2 представлен прием лазерных ультразвуковых сигналов при различных дефектах поверхности. На рис. 2а видно, что при отсутствии дефектов на поверхности алюминиевой пластины сигнал поверхностной акустической волны имеет наибольшую амплитуду среди принятых лазерных ультразвуковых сигналов. Кроме того, отчетливо проявляется сигнал волны граничного отражения. Напротив, на рис. 2г наличие дефекта размером $1,0 \times 0,1$ мм на поверхности алюминиевой пластины приводит к увеличению амплитуды сигнала волны отражения дефекта. Однако по мере уменьшения размера дефекта амплитуда сигнала волны, отраженной от дефекта, становится менее выраженной. Поэтому в данной работе предлагает-

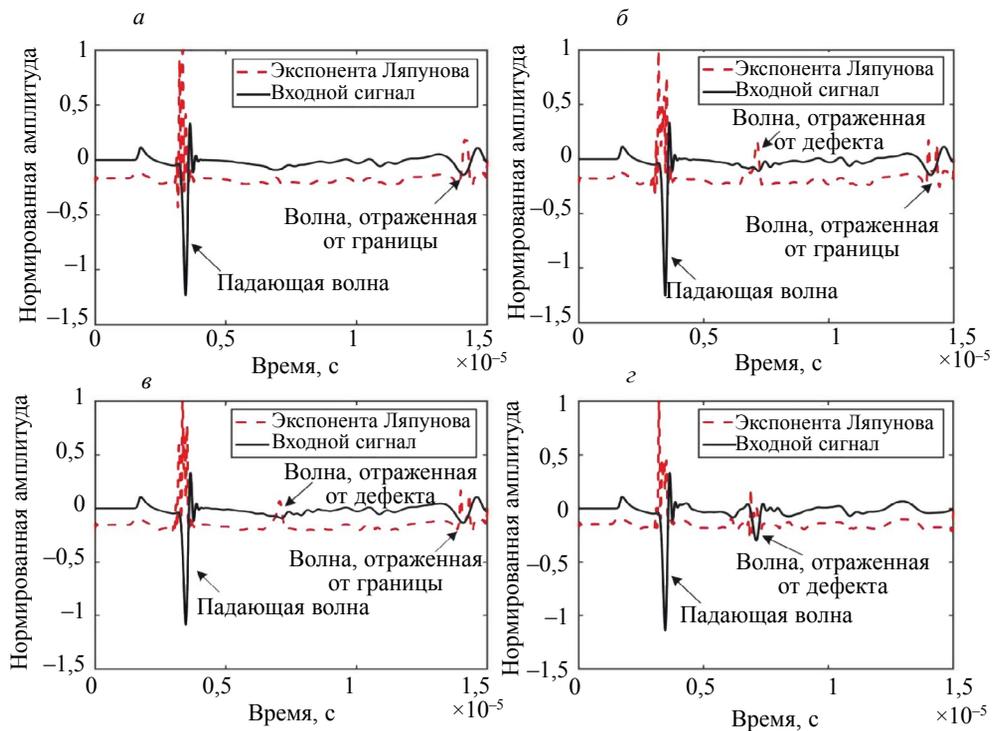


Рис. 4. Экспоненциальная кривая Ляпунова и лазерные ультразвуковые сигналы дефектов с различной амплитудой: волновой сигнал без дефектов (а); 0,1×0,1 мм (б); 0,5×0,1 мм (в); 1,0×0,1 мм (г).

ся метод, использующий лазерные ультразвуковые осцилляторы Дуффинга для обнаружения слабых сигналов дефектов. Цель состоит в том, чтобы повысить чувствительность и отношение сигнал/шум при обнаружении сигналов волн отражения дефектов.

Спектральная диаграмма лазерного ультразвукового сигнала, где в алюминиевой пластине присутствуют поверхностные дефекты, изображена на рис. 4. Как показано на рисунке, спектр принимаемого лазерного ультразвукового сигнала демонстрирует аналогичную картину при наличии поверхностных дефектов на алюминиевой пластине. Следовательно, в данном исследовании для лазерного ультразвукового сигнала выбрана частота обнаружения 1 МГц. Замечено, что различие в частотной области между сигналами направляемых волн с дефектами и сигналами без дефектов не очень хорошо различимо, и в результате дефектные сигналы не могут быть изолированы. Чтобы решить эту проблему, в статье в качестве переменных состояния системы выбраны смещение x и скорость v , а система обнаружения перестраивается в форму, показанную в уравнении (5):

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = -kv + x^3 - x^5 + F \cos \varphi. \\ \dot{\varphi} = w \end{cases} \quad (7)$$

Параметры моделирования системы следующие: движущая сила $F = 24$; центральная частота движущей силы $w = 1$ МГц; коэффициент демпфирования $k = 0,5$; начальное состояние — (0,0).

В данном исследовании для обнаружения слабых сигналов дефектов используется метод, использующий систему осциллятора Дуффинга. Для проведения сравнительного анализа система обрабатывает сигналы направленных волн как без сигналов от дефектов, так и с сигналами от дефектов различной амплитуды, как показано на рис. 3. Для уменьшения возможных ошибок, вызванных падающими волнами и эхом от границы, необходимо перехватить форму волны между падающей волной и эхом от границы и подать ее в систему обнаружения на осцилляторе Дуффинга. Затем состояние системы оценивается по соответствующему индексу Ляпунова для выявления наличия слабых сигналов дефектов. На рис. 5а, где в перехваченной форме сигнала нет сигнала от дефекта, экспоненциальная кривая Ляпунова не изменяется и остается ниже нуля, что указывает на периодическое состояние системы, как показано штриховой линией на рис. 4а. Вид в плане фазовой траектории в это время показан на рис. 5г, а на рис. 5д представлено трехмерное изображение фазовой траектории периодического состояния. Рис. 5е также под-

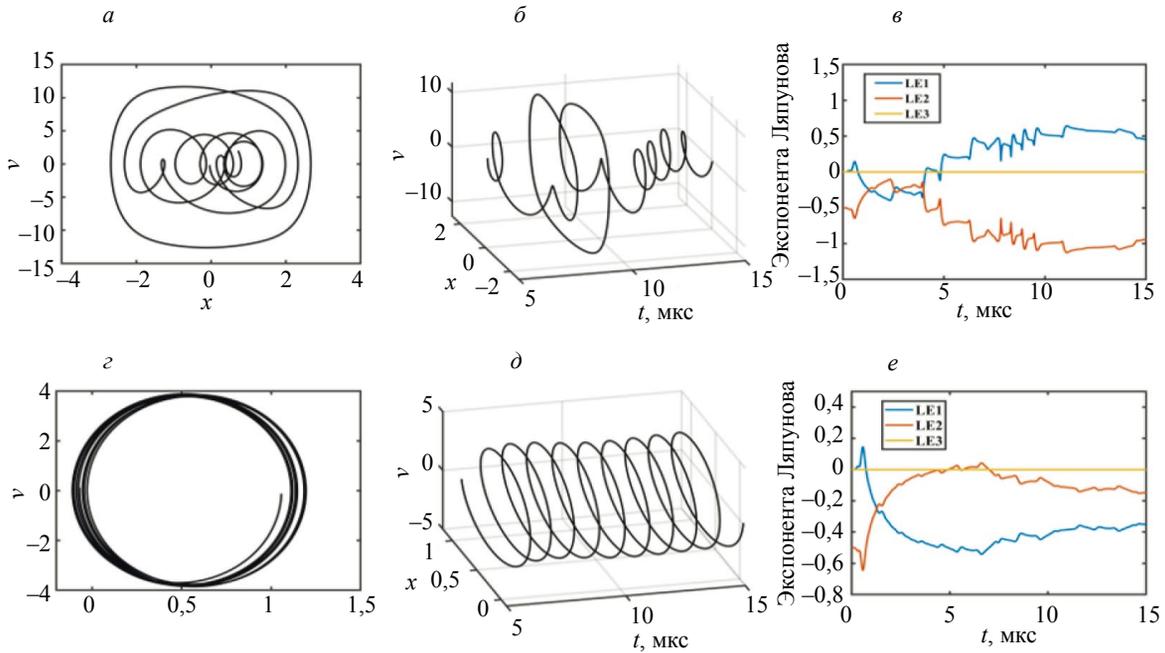


Рис. 5. Фазовая траектория системы и кривая экспоненты Ляпунова: хаотическое состояние-2D (а); хаотическое состояние-3D (б); экспонента Ляпунова хаотического состояния (в); периодическое состояние-2D (г); периодическое состояние-3D (д); экспонента Ляпунова периодического состояния (е).

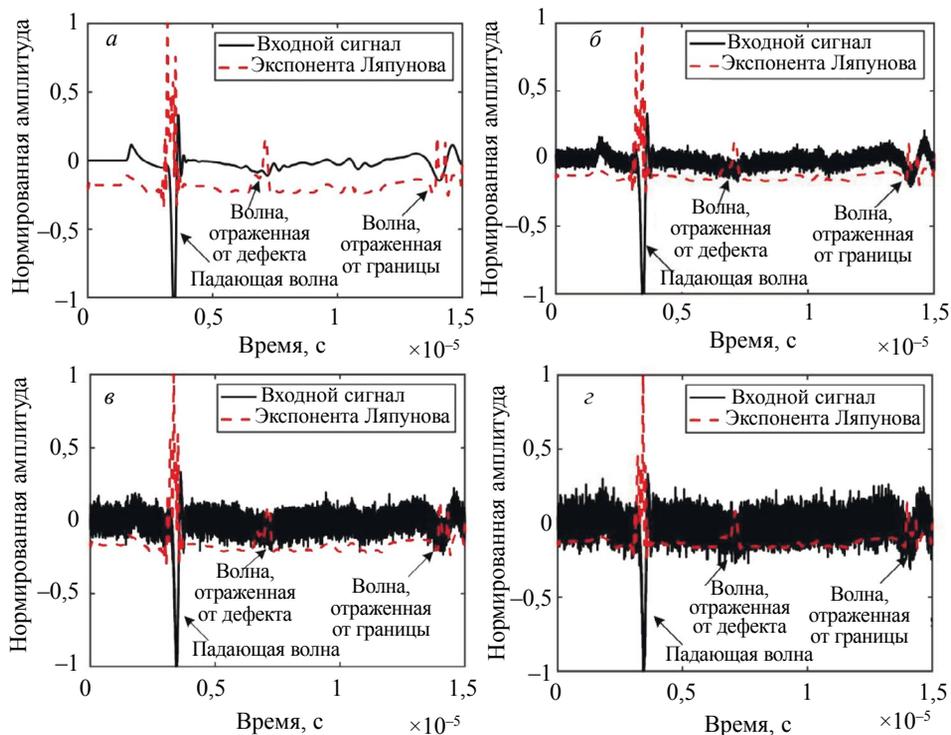


Рис. 6. Экспоненциальная кривая Ляпунова и лазерный ультразвуковой сигнал с шумовыми волнами различной интенсивности: без шума (а); интенсивность шума 0,1 (б); интенсивность шума 0,5 (в); интенсивность шума 1,0 (г).

тверждает периодическое состояние системы с помощью экспоненциальной кривой Ляпунова. Рис. 5б—г иллюстрируют подачу сигналов дефектов с возрастающей амплитудой. Соответствующая экспонента Ляпунова демонстрирует резкий восходящий импульс в положении волны дефекта, превышающий нулевую отметку, что означает переход системы из периодического в хаотическое состояние, как показано на рис. 4б—г. Как плоская диаграмма фазовой траектории

на рис. 5а, так и трехмерная диаграмма на рис. 5б свидетельствуют о переходе системы в хаотическое состояние. Диаграмма экспоненциальной кривой Ляпунова на рис. 5в дополнительно подтверждает это хаотическое состояние. Более того, этот метод обнаружения волн дефектов оказывается устойчивым к шуму, что подчеркивает одно из преимуществ методов обнаружения сигналов на основе хаоса. Как показано на рис. 6а, при отсутствии шумового сигнала в лазерном ультразвуковом сигнале кривая экспоненты Ляпунова отчетливо идентифицирует сигнал отраженной волны. Когда интенсивность шума, добавляемого к лазерному ультразвуковому сигналу, возрастает от 0,1 до 1,0, как показано на рис. 6б—г, сигнал отраженной волны, исходящий от дефекта, становится неразличимым от исходного лазерного ультразвукового сигнала. Тем не менее кривая экспоненты Ляпунова, представленная в данной работе, продолжает эффективно обнаруживать сигнал отраженной волны. Таким образом, метод лазерного ультразвукового обнаружения слабых сигналов дефектов на основе осциллятора Дуффинга, предложенный в данном исследовании, демонстрирует надежную помехоустойчивость.

5. ВЫВОДЫ

В статье предлагается метод обнаружения с использованием хаотической системы Дуффинга для идентификации синусоидальных слабых сигналов дефектов, а его эффективность демонстрируется с помощью моделирования в Matlab. Моделирование, проведенное в шумной среде, показало высокую способность распознавания и точную локализацию дефектов на алюминиевых пластинах. Этот метод представляет собой практическую ценность, превосходящую традиционные подходы.

Однако важно отметить, что сделанные выводы основаны исключительно на данных моделирования. В будущих исследованиях планируется подтвердить эти выводы путем проведения экспериментальных испытаний на реальных сигналах от дефектов материалов. Эта экспериментальная проверка позволит оценить реальную эффективность метода в практических приложениях. В данной работе количественный анализ, касающийся этого метода, еще не проводился, что будет рассмотрено в последующих работах.

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (62061021), при поддержке Фонда естественных наук провинции Цзянси (20202BABL201024), а также при поддержке проекта Цзюцзян Double Hundred and Double Thousand Talent и Научно-технического проекта Департамента образования провинции Цзянси (GJJ170959).

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jalilvand A., Fotoohabadi H. The Application of Duffing Oscillator in Weak Signal Detection // ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics and Communications. 2011. V. 9 (1). P. 1—6. <https://doi.org/10.37936/ecti-ec.201191.172249>
2. Martynyuk V., Fedula M., Balov O. Periodic Signal Detection with Using Duffing System Poincare Map Analysis // Advances in Science and Technology Research Journal. 2014. V. 8. (22). P. 26—30. <https://doi.org/10.12913/22998624.1105158>
3. Rashtchi Vahid, Nourazar Mohsen. A Multiprocessor Nios II Implementation of Duffing Oscillator Array for Weak Signal Detection // Journal of Circuits Systems and Computers. 2014. V. 23 (4). P. 1450054. <https://doi.org/10.1142/S0218126614500546>
4. Gong Xuefang, Xu Wude, Ma Fanglan et al. Weak signal detection method based on improved double-coupled Duffing oscillator // Automation and Instrumentation. 2022. V. 10. P. 42—45+50. <https://doi.org/10.14016/j.cnki.1001-9227.2022.10.042>
5. Zhao Bo, Yang Shaopu, Zhao Zhihong. Influence and analysis of Duffing equation parameters on weak signal detection // Journal of Shijiazhuang Railway University (Natural Science Edition). 2017. V. 30 (03). P. 39—42. <https://doi.org/10.13319/j.cnki.sjztdxzbzrb>
6. Li Jinggui, Jin Wuyin. Weak signal detection method based on improved double-coupled Duffing oscillator // Instrument Technology and Sensor. 2021. V. 11. P. 21—125.
7. Xing Hongyan, Wu Hui, Liu Gang. Variable-scale Duffing oscillator method for weak signal detection // Journal of Electronics. 2020. V. 48 (04). P. 734—742.
8. Wei Hengdong, Gan Lu, Li Liping. Weak signal detection of Duffing oscillator based on Hamiltonian // Journal of University of Electronic Science and Technology of China. 2012. V. 41 (02). P. 203—207.
9. Luo Wenhui. Research on weak signal detection method based on coupled chaotic system. Hunan University of Science and Technology, 2023. <https://doi.org/10.27738/d.cnki.ghnkd.2021.000019>
10. Ning Aiping. Research on weak signal detection methods under chaotic background. Taiyuan University of Technology, 2006.
11. Zeng Weiye. High-speed railway axlebox bearing fault diagnosis method based on Duffen stochastic resonance system. Chongqing University, 2022. <https://doi.org/10.27670/d.cnki.gcqdu.2021.000738>

12. *Li Jinggui*. Weak mechanical fault signal detection based on double-coupled Duffing oscillator. Lanzhou University of Technology, 2021.
13. *Jiang Wei*. Research on weak signal detection method and application based on two-dimensional Duffing stochastic resonance. Xi'an University of Technology, 2020.
14. *Chen Yuanjie, Huang Guoyong*. Weak signal detection method based on improved Duffing oscillator // Journal of Electronic Measurement and Instrumentation. 2019. V. 33 (11). P. 1—6. <https://doi.org/10.13382/j.jemi.B1902327>
15. *Deeks Julian Leslie*. Nonlinear signal processing techniques for signal detection. University of Southampton, Doctoral Thesis, 2018.
16. *Pancoatl-Bortolotti P., Enriquez-Caldera R.A., Costa A.H.* et al. Liénard chaotic system based on Duffing and the Sinc function for weak signals detection // IEEE Latin America Transactions. 2022. V. 20 (8). P. 2114—2121. <https://doi.org/10.1109/TLA.2022.9853234>
17. *Birx D.L., Pipenberg S.J.* Chaotic oscillators and complex mapping feed forward networks (CMFFNs) for signal detection in noisy environments / In Proc. International Joint Conference on Neural Networks (USA, 1992). V. 2. P. 881—888. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.1992.226876>
18. *Wu Jing, Zhang Weiwei, Nie Zhenhua* et al. Experimental study on positioning of small defects by ultrasonic guided waves in pipelines based on Lyapunov index // Vibration and Impact. 2016. V. 35 (01). P. 40—45+53. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2016.01.008>
19. *Wu Jing*. Research on ultrasonic guided wave detection method based on Duffen equation. Taiyuan University of Science and Technology, 2014.
20. *Zhang Weiwei, Ma Hongwei*. Simulation research on using chaotic oscillator system to identify ultrasonic guided wave signals // Vibration and Impact. 2012. V. 31 (19). P. 15—20. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2012.19.008>
21. *Sun Yanlong*. Weak mechanical fault signal detection and feature extraction method based on Duffen oscillator. Yanshan University, 2017.
22. *Stoyanov Svetlin*. Analytical and Numerical Investigation on the Duffing Oscillator Subjected to a Polyharmonic Force Excitation // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2015. V. 45 (1). P. 3—16. <https://doi.org/10.1515/jtam-2015-0001>
23. *Patel V.N., Tandon N., Pandey R.K.* Defect detection in deep groove ball bearing in presence of external vibration using envelope analysis and Duffing oscillator // Measurement. 2012. V. 45 (5). P. 960—970. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.01.047>
24. *Nie Chunyan*. Chaotic Systems and Weak Signal Detection. Beijing: Tsinghua university press, 2009.
25. *Zhang Weiwei*. Pipeline ultrasonic guided wave and its chaos detection technology. Beijing: Electronic Industry Press, 2019.
26. *Gao Jinzhan*. Detection of weak signals. Beijing: Tsinghua university press, 2004.
27. *Wei Zeng, Shikai Qi, Li Liu, Feiyan Yao*. An quantitative inspection method for internal defects based on laser ultrasonic technology // Optik. 2020. V. 216 (6). P. 164873. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164873>
28. *Zuo Ou-Yang, Wu Mei-Ping, Tang You-Hong*. Numerical simulation of crack position determined by laser ultrasound based on COMSOL // Laser & Infrared. 2020. V. 50 (10). P. 1164—1171.