

## АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ЗАШУМЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ

Чобану П.М., Лунин В.П.

Московский энергетический институт (ГУ)

### Введение

Контроль состояния металлических труб посредством внутритрубной электромагнитной дефектоскопии является одной из важнейших диагностических задач. Инспектированию подлежат многие километры газо- и нефтепроводов, а также теплообменные трубы парогенераторов атомных станций. Аварии, происходящие на подобных объектах, могут нанести значительный экономический и экологический ущерб. Одним из самых эффективных способов избежать аварий является периодическая проверка состояния металла труб электромагнитными методами внутритрубной дефектоскопии.

Данные, получаемые в процессе инспектирования, нередко бывают сильно зашумленными. Проблема выявления, классификации и оценки параметров дефектов на основе таких данных является чрезвычайно сложной задачей.

При инспектировании труб различные типы помех искажают получаемые данные. Помимо сигнала от дефектов, в данных нередко присутствуют компоненты, наводимые сторонними структурными объектами (например, дистанцирующими решетками в случае теплообменных труб), а также помехи (как правило, высокочастотные), обусловленные бортовой электроникой дефектоскопа. Также могут появляться компоненты в сигналах вследствие особенностей технологической структуры трубопровода (например, для горячекатаных труб периодическая спиральная структура материала проявляется в результате фрезерования труб). Низкочастотные компоненты в данных появляются вследствие медленно меняющихся электрофизических свойств металла трубы, изменяющегося зазора между датчиками и внутренней стенкой контролируемой трубы.

В статье описывается эффективный алгоритм, с помощью которого удастся осуществить первичную обработку данных дефектоскопии, при этом значительно повысить отношение сигнал/шум (ОСШ) при максимальном сохранении формы и амплитуды сигналов от дефектов. Основой подхода является описанный в [1] алгоритм адаптивной фильтрации, позволяющий значительно ослабить влияние мешающих факторов. Известный алгоритм дополнен операциями, основанными на полиномиальной аппроксимации и полосовой фильтрации (с использованием фильтра Баттерворта), а также, в случае необходимости, на использовании вейвлет-преобразования.

Применение алгоритма иллюстрируется на модельных данных, полученных с помощью специальной программы моделирования сигналов, учитывающей особенности влияния основных мешающих факторов в реальных сигналах, а также на экспериментальных сигналах, полученных в реальных условиях контроля.

### Описание программы моделирования сигналов

Этот программный модуль моделирует сигнал, близкий по спектральным характеристикам к реальным данным, в котором могут присутствовать составляющие гармонического вида, параметры которых задаются случайным образом, а также недетерминированные компоненты в виде «белого шума».

Параметры компонент  $p_i$  (частоты, амплитуды, сдвиги, дисперсии) задаются случайным образом с помощью средних значений  $a_i$  и отклонений  $\sigma_i$  таким образом, чтобы  $p_i$  имел равномерное распределение на отрезке  $[a_i - \sigma_i, a_i + \sigma_i]$ .

В модуль заложена возможность независимого задания пяти групп составляющих при формировании результирующего сигнала (в применении к задаче вихретокового контроля теплообменных труб):

- сигнал от дефекта, имеющий форму первой производной функции Гаусса, может располагаться произвольно на координатной оси;
- сигнал от дистанцирующей решетки, имеющий форму расположенных друг за другом положительной и отрицательной функций Гаусса  $\exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma}\right)$ , отстоящих друг от друга на фиксированном расстоянии, при этом сигналы от соседних дистанцирующих решеток равноотстоят друг от друга;
- ряд детерминированных помех в виде гармонических составляющих;
- медленно меняющийся тренд, аппроксимируемый полиномом невысокой степени;
- случайная помеха в виде «белого шума»

Для каждой составляющей параметры задаются отдельно.

Возможность генерации сигналов, близких по свойствам к реальным, с помощью описанной программы моделирования подтверждается рисунком 1, где изображены спектры реального и модельного сигналов. Как видно из рисунка, оба спектра имеют схожие всплески, которые отвечают определенным частотным составляющим помех.

Далее дано описание этапов предобработки вихретоковых сигналов.

1) Для устранения (низкочастотного) тренда используется прием, предусматривающий вычитание из исходного сигнала результата его грубой аппроксимации в виде полинома невысокой степени.

2) Подавление помех в форме квазигармонических составляющих осуществляется с помощью полосового фильтра Баттерворта, полоса пропускания которого определяется автоматически для фрагмента сигнала, свободного от дефектов.

Идея взвешенной адаптивной винеровской фильтрации [1] основана на локальном сравнении уровня энергии имеющихся помех и энергии сигнала. При его применении осуществляется оконная фильтрация с учетом значений оконных коэффициентов  $w$  (в работе были использованы гауссовские весовые коэффициенты).

3) Для оценки уровня помех обрабатывается фрагмент сигнала, для которого априорно известно, что дефекты на нем отсутствуют. Для этого фрагмента рассчитывается энергия помехи, обозначаемая  $\sigma_n$ .

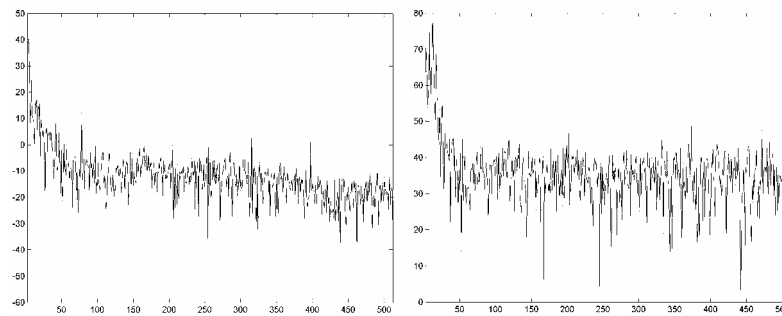


Рис. 1: Спектры экспериментального (слева) и смоделированного (справа) сигналов

4) Далее вычисляются выходные отсчеты фильтрованного сигнала  $y(k)$  по входным  $x(k)$ . Для этого сначала рассчитывается среднее отсчетов скользящего окна с учетом весовых коэффициентов  $w$ , обозначенное  $\mu(k)$ .

Сигнал на выходе определяется как: 
$$y(k) = \alpha x(k) + (1 - \alpha)\mu(k), \text{ где } \alpha = \max\left(0, \frac{[\sigma^2(k) - \sigma_n^2]}{\sigma^2(k)}\right)$$

5) На завершающем этапе в ряде случаев применяется дискретное вейвлет-преобразование с материнской вейвлет-функцией из семейства первой производной функции Гаусса. Находится максимальный коэффициент преобразования для ряда фиксированных масштабных коэффициентов. Таким образом, в сигнале выделяются участки, форма которых схожа с формой первой производной функции Гаусса и, наоборот, помеха подавляется.

Результаты применения разработанного алгоритма к модельным и экспериментальным данным приведены на рисунках 2 (модель) и 3, 4 (эксперимент).

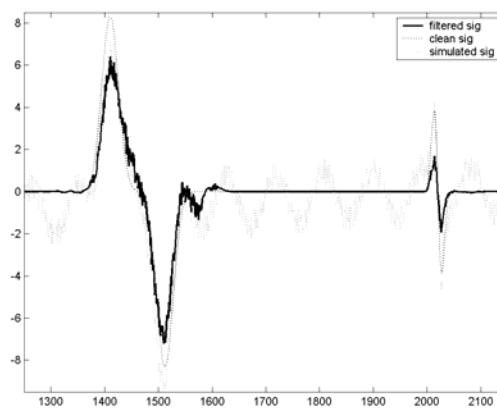


Рис. 2: Результат применения алгоритма к модельным данным. Достигнуто повышение ОСШ на 14.2 дБ

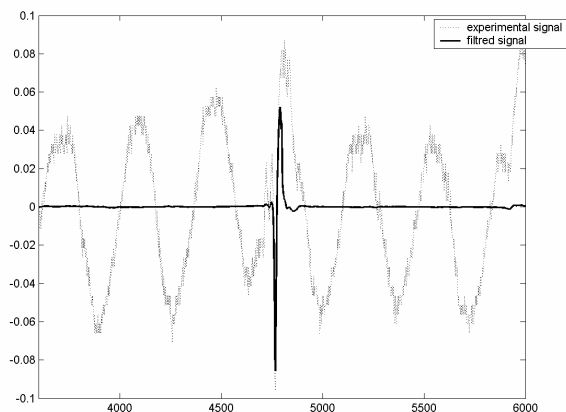


Рис. 3: Результат применения алгоритма к экспериментальным данным.  
Достигнуто повышение ОСШ на 7.7 дБ

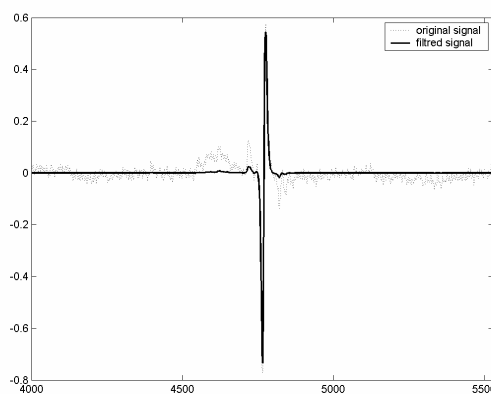


Рис. 4: Результат применения алгоритма к экспериментальным данным.  
Достигнуто повышение ОСШ на 1.1 дБ

### Результаты

Как видно из приведенных рисунков, предлагаемый алгоритм существенно повышает отношение сигнала к шуму, а также отчетливо выделяет сигнал от дефекта на уровне помех. Тем самым, задача выделения областей интереса для классификации дефектов и оценки их геометрических параметров значительно упрощается.

### Литература

1. M. Das, P. Ramuhalli, L. Udpa, and S. Udpa, "An Adaptive Wiener Filter Based Technique for Automated Detection of Defect Locations From Bobbin Coil Eddy Current Data", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Eds, Vol. 21, American Institute of Physics, pp. 639-646, 2002

