

ПРИМЕНЕНИЕ ФУРЬЕ-АНАЛИЗА И МЕТОДА АНАЛИЗА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИНАМИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

В.П. Вавилов, Д.А. Нестерук, В.В. Ширяев, W. Swiderski*
г. Томск, Россия, * Zielonka, Poland

Рассмотрены принципы и особенности применения одномерного преобразования Фурье и статистического метода анализа главных компонент (МАГК) в активном тепловом контроле. Выполнено сравнение указанных алгоритмов при обнаружении дефектов в композиционных материалах, коррозии в стальных и алюминиевых изделиях, а также воды в титановых сотах.

1. Введение

Наш опыт применения алгоритмов развитой обработки изображений в тепловом контроле (ТК) показывает, что существует два основных метода анализа экспериментальных результатов, не требующих выбора эталонной (бездефектной) точки и применяемых независимо от физики контролируемого процесса: одномерный Фурье-анализ и метод анализа главных компонент (МАГК). Сущность обоих методов состоит в выявлении тонких особенностей изменения пиксельных температур во времени в дефектных и бездефектных зонах. В силу независимости от физики контролируемого процесса, оба метода рекомендуются без ограничений для предварительной обработки динамических данных, причем предполагается, что они обеспечивают максимальное (во многих, но не во всех случаях) отношение сигнал/шум.

Преобразование Фурье применяется ко всей последовательности N изображений. Если $T(i, j, k)$ есть временное развитие в пикселе $[i, j]$, то в результате Фурье-обработки получают величины магнитуды и фазы согласно:

$$\begin{aligned} \text{Magnitude} &= \sqrt{[\text{Re}(T)]^2 + [\text{Im}(T)]^2}; \\ \text{Phase} &= \text{ArcTan}\left[\frac{\text{Re}(T)}{\text{Im}(T)}\right], \end{aligned} \quad (1)$$

где $\text{Re}(T)$ и $\text{Im}(T)$ представляет реальную и мнимую части преобразования Фурье, примененного к функции $T(i, j, k)$.

Важно, что результаты преобразования Фурье на отдельных частотах зависят от числа изображений в последовательности, а также от того, было ли первое изображение вычтено из последовательности или нет (эта операция позволяет ввести в рассмотрение *избыточные* температуры нагрева). Изображения Фурье обычно интерпретируют *качественно*. Во многих случаях, *отличная от нуля первая частота* преобразования Фурье обеспечивает оптимальные результаты, потому что на более высоких частотах возрастают шумы.

Преобразование Фурье, примененное к временным функциям в ТК, часто называют импульсно-фазовой термографией (Pulse Phase Thermography). Обычно, преобразование Фурье выполняют ради получения изображений фаз – *фазограмм*. Некоторые эксперты в области ТК полагают, что *фазограммы*, учитывающие весьма тонкие различия временных функций, гарантируют наилучшее обнаружение подповерхностных дефектов. Для изображений магнитуды (модуля мощности) Фурье недавно было предложено название «амплиграмма».

МАГК (английский термин: PCA – Principal Component Analysis) нашел применение в статистике при обработке многомерных (multi-dimensional) данных, в криминалистике при распознавании человеческих лиц (face recognition), сжатии изображений и т. п. [1–4]. Метод применяется и в инфракрасной (ИК) термографии, например,

для разделения оптических и тепловых эффектов [5, 6]. В частности, таким способом устраняют ложные дефекты при термографировании неоднородных поверхностей. Имеются сведения об использовании МАГК при обнаружении скрытой коррозии в металлах методом ТК; при этом установлена связь толщины материала с определенными главными компонентами.

Многие переменные в многомерных наборах данных связаны друг с другом, приводя к некоторой избыточности «полезной» информации. Размерность исходных данных M можно уменьшить, вводя $K \leq M$ новых ортогональных осей, на которые проецируют исходные данные (требование ортогональности осей характерно именно для МАГК).

Принцип вычисления главных компонент состоит в том, что для исходной матрицы X определяют ковариационную (рассеивающую) матрицу в виде $C = 1/(N-1) * (X - M) * (X - M)^T$, где M – матрица состоящая из разнормированного N раз вектора-столбца средних значений по каждой переменной x_i . Элементы ковариационной матрицы, лежащие на диагонали, отражают дисперсию i -й переменной, а элементы лежащие вне главной диагонали отражают взаимную ковариацию между переменными i и j . Ковариационная матрица является квадратной (размерностью $M * M$) и симметричной относительно главной диагонали.

Для вычисления дисперсии используется стандартная формула:

$$D = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m)^2, \quad (2)$$

а ковариацию двух переменных x_1 и x_2 находят по выражению:

$$cv = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_{1i} - m_1) * (x_{2i} - m_2), \quad (3)$$

где $m_{1,2}$ – средние значения соответствующих переменных.

Малые значения дисперсии переменной говорят о возможном шумоподобном сигнале, что отражается в соответствующей переменной; соответственно, большие значения ковариации (по модулю) говорят о связи переменных (положительной или отрицательной). Нулевая корреляция означает, что переменные не зависят друг от друга. В качестве рассеивающей может применяться также и корреляционная матрица.

Результатом активного ТК является последовательность ИК термограмм размерностью $nr * nc * nt$, где nr – число рядов в термограмме, nc – число столбцов, nt – число термограмм. Реализуя МАГК, можно анализировать как *временные*, так и *пространственные* компоненты.

В первом случае анализируют nt переменных (размерность исходных данных совпадает с числом термограмм nt), для каждой из которых было проведено $nr * nc$ измерений. Вектор-столбец средних значений, из которого строится матрица M , в этом случае представляет собой средний профиль изменения температуры во времени. Размерность ковариационной матрицы в этом случае равна $nt * nt$. После применения МАГК и уменьшения размерности остаются несколько переменных, отражающих связь исходных переменных между собой во времени. В этом случае при проецировании исходной переменной X на полученные временные компоненты размер термограммы $nr * nc$ остается неизменной, в то время как число переменных (число термограмм и размерность исходных данных) уменьшается. Процедура преобразования трехмерной матрицы в двухмерную показана на рис. 1; при этом каждая строка содержит все пиксельные значения каждой отдельной термограммы, а число строк соответствует числу зарегистрированных термограмм nt , или числу временных отсчетов. В результате декомпозиции полученной двухмерной матрицы получают результирующую трехмерную матрицу, ко-

торая может быть представлена в виде последовательности изображений, содержащих так называемые *эмпирические ортогональные функции*, или главные компоненты.

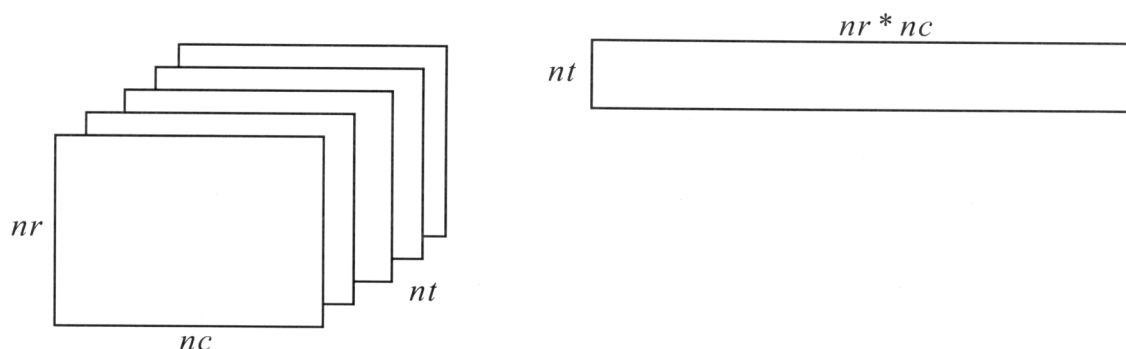


Рис. 1. Преобразование ИК термографических данных из трехмерной матрицы в двухмерную

В случае пространственных компонент анализируют $nr * nc$ переменных, для каждой из которых проводится nt измерений. Вектор-столбец средних значений, из которого строится матрица M , представляет собой усредненное изображение. Размерность ковариационной матрицы в этом случае определяется как $ne * ne$, где $ne = nr * nc$. После применения МАГК и уменьшения размерности остается несколько переменных, отражающих особенности развития температуры в пространстве. Характерно, что при проецировании исходной переменной X на уменьшенное число главных компонент изменяются геометрические параметры термограммы (величины nr и nc), что приводит к искажению ее размеров, и, следовательно, к затруднениям при интерпретации полученных результатов. Следует заметить, что анализ пространственных компонент трудновыполним и с вычислительной точки зрения. Например, типичными параметрами активного ТК являются: $nr = 240$, $nc = 320$ и $nt = 150$, то есть анализу подлежит последовательность из 150 термограмм стандартного формата 320×240 . Тогда размер ковариационной матрицы временных и пространственных компонент составляет соответственно 150×150 и 76800×76800 элементов.

2. Примеры использования развитой обработки данных в ТК

2.1. ТК композиционных материалов

Активный ТК зарекомендовал как один из наиболее эффективных методов неразрушающего контроля композиционных материалов.

В результате ТК стандартного образца углепластикового композита толщиной 5 мм, содержавшего 5 искусственных дефектов, с помощью тепловизора AGEMA 900 было зарегистрировано 25 термограмм, отражающих как процесс нагрева изделия в течение 4,4 с, так и его последующего охлаждения. В «оптимальной» термограмме (рис. 2, а, слева) отчетливо видны зоны неравномерного нагрева двумя лампами в левой и правой частях термограмм, что ухудшает обнаружение наиболее глубоких дефектов.

Следует отметить, что в исходной последовательности были усечены границы исходных термограмм, поскольку в них имелись области, не относящиеся к объекту контроля. Усечение границ позволило значительно повысить так называемую «видность» дефектов, поскольку вид рассеивающей матрицы зависит также от размера выбранной зоны.

К данной последовательности ИК термограмм были применены МАГК и Фурье-анализ и для каждого дефекта было определено отношение сигнал/шум SNR (см. табл. 1), причем принималось во внимание, что различные дефекты создавали максимальные значения SNR в различных изображениях исходной последовательно-

сти, а также в изображениях главных компонент или фаз Фурье. Принято стандартное определение SNR :

$$SNR = \frac{\bar{T}_d - \bar{T}_{nd}}{\sigma_{nd}}, \quad (4)$$

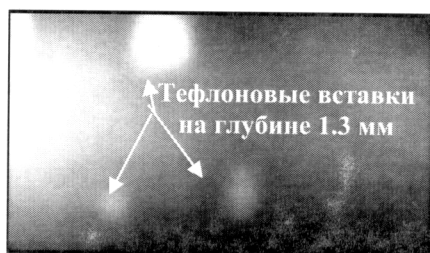
где $\bar{T}_d, \bar{T}_{nd}$ – средние температуры в областях, выбранных оператором в качестве дефектной и бездефектной;

σ_{nd} – стандартное отклонение температуры в бездефектной области. В качестве бездефектных выбирались зоны вблизи каждого дефекта площадью, приблизительно равной площади соответствующего дефекта, поэтому значения SNR велики даже в исходных изображениях. Во всяком случае, из табл. 1 следует, что компьютерная обработка данных значительно повышает исходные значения SNR (максимальное значение $SNR=15.0$ в фазограмме, рис. 2, а, справа). Оба метода – МАГК и Фурье анализ – принимают во внимание тотальные особенности поведения температуры во времени и поэтому обеспечивают близкие значения SNR [7, 8].

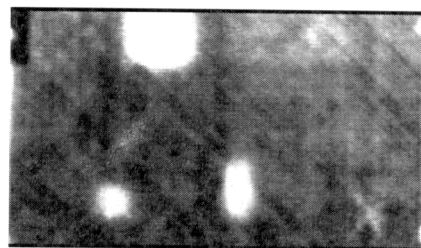
Таблица 1

Статистический анализ эффективности развитой обработки изображений в ТК

Изображение	Отношение сигнал/шум
<i>Стандартный образец из углепластика (вставки из Тефлона)</i>	
Оптимальная исходная термограмма	1.7
Фазограмма	15.0
Амплиграмма	1.0
МАГК (3-я компонента)	9.0
<i>Коррозия стального листа толщиной 10 мм (стандартный образец)</i>	
Оптимальная исходная термограмма	4.1
Фазограмма	1.1
Амплиграмма	13.9
МАГК (2-я компонента)	10.5
<i>Естественная коррозия алюминиевого листа толщиной 2 мм</i>	
Оптимальная исходная термограмма	6.0
Амплиграмма	0.27
Фазограмма	4.8
МАГК (1-я компонента)	4.6
МАГК (2-я компонента)	1.5
<i>Вода (5 г) в титановых сотах</i>	
Оптимальная исходная термограмма	13.6
Амплиграмма	15.2
Фазограмма	2.0
МАГК (1-я компонента)	9.4
МАГК (2-я компонента)	7.4

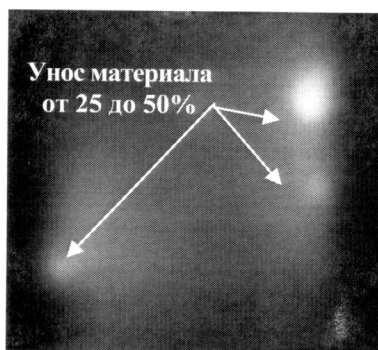


Оптимальное исходное изображение ($S=1.7$)

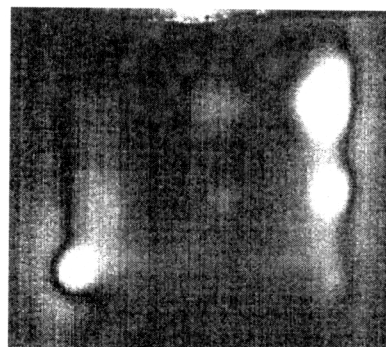


Фазограмма ($S=15$)

а

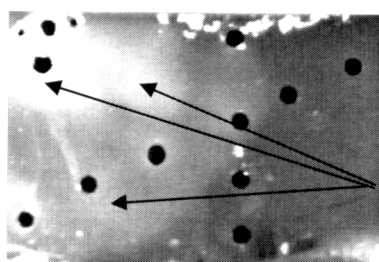


Оптимальное исходное изображение ($S=4.1$)

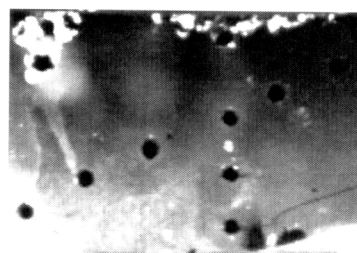


Амплиграмма ($S=13.9$)

б

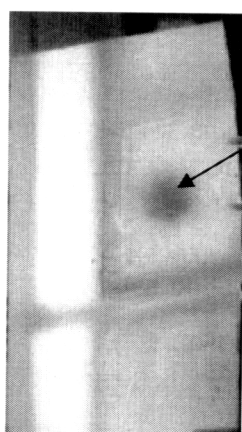


Оптимальное исходное изображение ($S=12.5$)

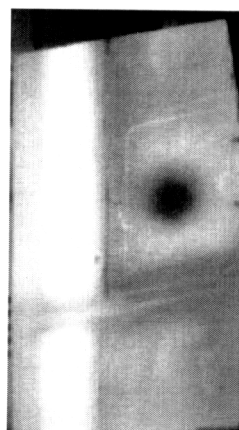


Амплиграмма ($S=0.13$)

в



Оптимальное исходное изображение ($S=15.2$)



Амплиграмма ($S=13.6$)

г

Рис. 2. Развита́я обработка последовательностей ИК изображений в тепловом контроле:
а – тефлоновые вставки в углепластике; б – коррозия стального листа толщиной 10 мм;
в – коррозия алюминиевого листа толщиной 2 мм; г – вода в титановых соцах

2.2. Обнаружение коррозии в стали

Классический ТК оперирует с дифференциальными температурными сигналами $\Delta T(\tau)$, которые в общем случае возрастают от нуля до максимального значения $\Delta T_m(\tau_m)$, после чего спадают до малых (нулевых) значений. В этом случае применение МАГК представляется эффективным. При обнаружении коррозии в металлах, как правило, отсутствует ярко выраженный максимум ΔT_m и применение развитой обработки ИК изображений не всегда улучшает отношение сигнал/шум. Перспективной областью применения ТК могло бы стать обнаружение коррозии толстостенных резервуаров из стали, широко применяемых в нефтехимической промышленности. Такая процедура разрабатывается в Томском НИИ интроскопии. Пример полученных результатов приведен на рис. 2, б для случая контроля эталонного образца из стали толщиной 10 мм, содержащего зоны уноса материала от 25 до 75 % диаметром от 10 до 50 мм. После нагрева в течение 10–20 с, оптимальная в зарегистрированной последовательности термограмма характеризовалась $SNR=4.1$ (рис. 2, б, слева). Из алгоритмов обработки изображений оптимальным оказался Фурье-анализ, причем максимальное значение $SNR=13.9$ было отмечено не в фазограмме, как это ожидалось, а в амплиграмме (рис. 2, б, справа).

2.3. Обнаружение коррозии в алюминии

Достаточно неожиданными в смысле эффективности обработки данных оказались результаты контроля авиационной панели из алюминия толщиной 2 мм (нагрев двумя импульсными лампами с энергией 3 кДж, регистрация – тепловизором ThermoCAM A20). Наибольшее отношение сигнал/шум ($SNR=12.5$) было зафиксировано в оптимальной исходной термограмме (рис. 2, в, слева), тогда как в амплиграмме зона обширной слабой коррозии (около 7 %) не обнаруживалась (рис. 2, в, справа). Изображения фазы и амплитуды Фурье, равно как и главных компонент, плохо коррелировали с визуальной картиной корродированной зоны на противоположной стороне образца, поэтому в данном случае нельзя говорить о большей информативности изображений после примененной компьютерной обработки.

2.4. Обнаружение скрытой влаги в металлических сотах

Из теории ТК известно, что максимальные температурные контрасты возникают над дефектами конечных размеров в материалах со «средней» теплопроводностью (от 2 до 20 Вт/(м·К)). Это положение подтвердилось в экспериментах с титановыми сотами, в нескольких ячейках которых находилась вода в объеме нескольких грамм. Аналогично предыдущему случаю наиболее эффективной оказалась исходная оптимальная термограмма, в которой 5 г воды произвели $SNR=15.2$ (рис. 2, г, слева). Практически такое же качество изображения имело место в результате Фурье-анализа, тогда как МАГК вопреки ожиданиям привел к худшим результатам обнаружения.

3. Заключение

- Рассмотрены принципы и особенности использования метода одномерного преобразования Фурье и статистического МАГК для обработки последовательностей ИК термограмм, получаемых в результате активного ТК.
- Установлено, что МАГК не обеспечивает полного разделения информации о дефектах и помехах, обусловленных неравномерным нагревом, изменениями излучательно-поглощательных свойств и анизотропией материала, однако способен значительно улучшить визуальное восприятие ИК термограмм, в частности, повысить отношение сигнал/шум при ТК композитов.
- Качество изображений главных компонент близко к фазограммам, получаемым при одномерной Фурье-обработке ИК изображений, поэтому оба указанных метода ре-

комендуются для предварительной обработки результатов ТК. При этом во многих случаях, по крайней мере, не худшие результаты обеспечиваются исходными термограммами, зарегистрированными в момент максимальных температурных сигналов.

- Иллюстрации результатов развитой обработки сигналов приведены для ТК коррозии в толстостенных стальных и тонкостенных алюминиевых изделиях, а также композитах и титановых сотах.
- «Неприятной» особенностью применения метода Фурье и МАГК в ТК является непредсказуемость результатов в смысле максимизации отношения сигнал/шум, что требует проведения исследований в каждой конкретной задаче испытаний.

Список литературы

1. I.T. Jolliffe. Principal component analysis. – U.S.A., New York: Springer, 1986. – 168 p.
2. T. Will. Introduction to the Singular Value Decomposition. – U.S.A., Davidson College, 1999, www.davidson.edu/academic/math/will/svd/index.html.
3. «Factor Analysis». – http://www.stat.psu.edu/~jglenn/stat505/16_factor/05_factor_princomp.html.
4. D. Larose D. Data mining methods and models. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006. – 236.
5. A. Ciliberto, G. Cavaccini, O. Salvetti. Porosity detection in composite aeronautical structures // Infrared Physics & Technology. – 2002. – Vol. 43. – P. 139–143.
6. S. Hermosilla-Lara, P.-I. Joubert, D. Placko. Enhancement of open-cracks detection using a principal component analysis/wavelet technique in photothermal nondestructive testing. – Proc. Intern. Conf. Quant. Infrared Thermography QIRT'02, Dubrovnik, Croatia, Sept. 24–27, 2002. – P. 41–46.
7. В.П. Вавилов, С. Маринетти. Импульсная фазовая термография и тепловая томография на базе преобразования Фурье // Дефектоскопия. – 1999. – № 2. – С. 58–71.
8. J. Lahiri, K. Srinivas, T. Siddiqui, V. Vavilov. IR thermographic inspection of filament wound CFRP shell samples // Proc. SPIE «Thermosense XXIX». – Vol. 6541. – P. 234–242.

УДК 621.384.3

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЕЧАХ ОБЖИГА МАТЕРИАЛОВ: ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ КОРПУСА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ОБЖИГОВОЙ ПЕЧИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССАХ

*В.Г. Торгунаков, М.С. Суханов, С.Т. Чигарев, М.С. Яманаев
НИИ Интроскопии при Томском политехническом университете*

Идентификация дефектов внутренней поверхности вращающейся печи (см. рис. 1.а) в настоящее время производится путем решения стационарной обратной задачи теплопереноса в одномерной геометрии [1–4]. Стационарность тепловых процессов является важным условием адекватности применяемой модели, однако, редко достижимым в промышленной практике. Во время перехода из одного стационарного состояния в другое погрешность идентификации глубины дефектов внутренней поверхности печи превышает допустимый уровень, они могут обнаруживаться со значительным опозданием после их возникновения.

К числу возмущений, вызывающих динамику тепловых процессов следует отнести следующие:

- изменение формы факела;