

УДК 669.01:530.1:539.4

О. І. Михальов, д. т. н., проф.;

Ю. О. Водолазький

ВЕЙВЛЕТ-МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Досліджено зображення поверхонь матеріалів, уражених корозією, за допомогою методу максимумів модулів вейвлет-перетворення.

Постановка задачі

Провести дослідження зображень поверхонь матеріалів, що уражені корозією, за допомогою методу максимумів модулів вейвлет-перетворення.

Аналіз останніх досліджень

У наш час аналізуючи поверхні матеріалів, широко використовується апарат фрактальної геометрії [1, 2]. При цьому числовою характеристикою об'єкта виступає, зазвичай, величина його фрактальної розмірності. Використання цього показника для опису поверхні матеріалу припускає, що неоднорідність, іррегулярність або просто шорсткість поверхні є константою для будь-якої її ділянки. Однак сама неоднорідність реальної поверхні, у свою чергу, може мати просторові флуктуації. Реєстрацію й вивчення таких поверхонь можна проводити з використанням класичного мультифрактального аналізу [3, 4, 5]. Одночасно просторові особливості шорсткості поверхні матеріалу можна вивчати й за допомогою вейвлет-аналізу. Основи мультифрактального аналізу, що базується на безперервному вейвлет-перетворенні дані в роботі [6].

Опис методу дослідження

Вейвлети часто геометрично інтерпретують як узагальнення класичних алгоритмів покриття множини сферами, кубиками й т. п. З іншого боку, базисні функції вейвлет-перетворення є добре локалізованими (солітоноподібними), вони являють собою ефективний математичний апарат для аналізу нестационарних процесів [7]. Сигнали, що описують дані процеси, як правило, мають мультифрактальні властивості, тобто їх скейлінгові характеристики змінюються при зміні масштабу [8].

Класичний мультифрактальний аналіз полягає в отриманні спектра сингулярностей $f(\alpha)$. Для цього попередньо обчислюють спектр скейлінгових експонент $\tau(q)$ і потім за допомогою перетворення Лежандра обчислюють саме спектр сингулярностей $f(\alpha)$ [9].

Поряд із традиційним методами мультифрактального аналізу свою ефективність показав метод «максимумів модулів вейвлет-перетворення» ММВП [10], що на проміжних етапах обчислень використовує вейвлет-перетворення, і являє собою сполучення вейвлет і мультифрактального аналізів. Ідея методу полягає у розкладанні сигналу по базису, сконструйованому з солітоноподібної функції (вейвлету) за допомогою масштабних змін і переносів. Кожна з функцій цього базису характеризує як певну просторову або часову частоту, так й її локалізацію у фізичному просторі або в часі. Безперервне вейвлет-перетворення мультифрактальної функції $g(x)$ визначається формулою:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \psi \left(\frac{x-b}{a} \right) dx, \quad (1)$$

де a — параметр масштабу, b — просторова координата або момент часу, ψ — вейвлет.

Вибір вейвлета є досить важливим, тому що правильність вибору цієї функції дозволяє виділити необхідну інформацію, яка власне й повинна визначати вид вейвлету. Необхідною умовою при цьому є те, щоб обраний вейвлет був не менш гладким, ніж сигнал, що аналізується.

Результат вейвлет-перетворення інтерпретується як поверхня у тривимірному просторі. При цьому найважливіша інформація міститься в скелетоні, або лініях локальних екстремумів поверхні вейвлет-коефіцієнтів $W(a, x)$, пошук яких проводиться на кожному масштабі a . Після того, як лінії локальних екстремумів або локальних максимумів модулів вейвлет-перетворення виділені, проводиться їх аналіз. В результаті аналізу можна визначити гельдеровські експоненти (3) досліджуваної функції, які аналогічні за змістом експонентам сингулярностей α , що розраховують за допомогою перетворення Лежандра в рамках класичного підходу [3]. Для цього на другому етапі необхідно знайти часткові функції відповідно до формули

$$Z(q, a) = \sum_{l \in L(a)} |W(a, x_l(a))|^q, \tag{2}$$

де $L(a)$ – множина всіх ліній l - локальних максимумів модулів вейвлет-коефіцієнтів $W(a, x)$, що існують на масштабі a ; $x_l(a)$ характеризує положення на цьому масштабі максимуму, що відноситься до лінії l .

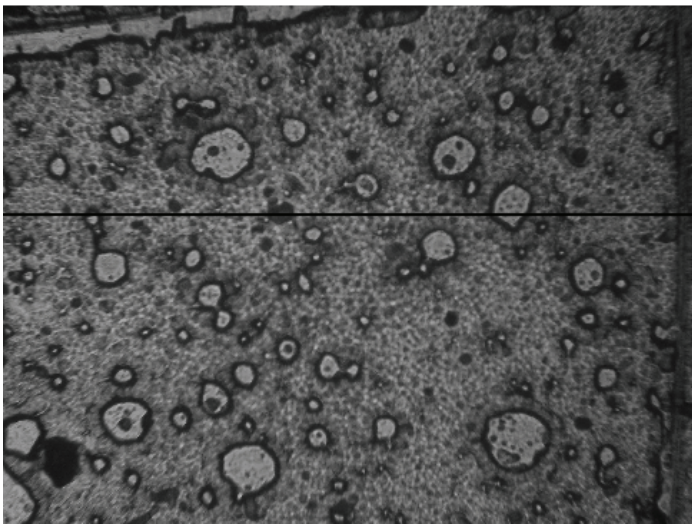
Скейлінгові експоненти можна отримати зі співвідношення

$$Z(q, a) \sim a^{\tau(q)} \tag{3}$$

шляхом визначення нахилу залежності $\ln Z(q, a) (\ln a)$.

Спектр розмірностей Рен'ї можна одержати, використовуючи співвідношення:

$$\begin{cases} h = \frac{d\tau}{dq}; \\ D(h) = qh - \tau(q). \end{cases} \tag{4}$$



а

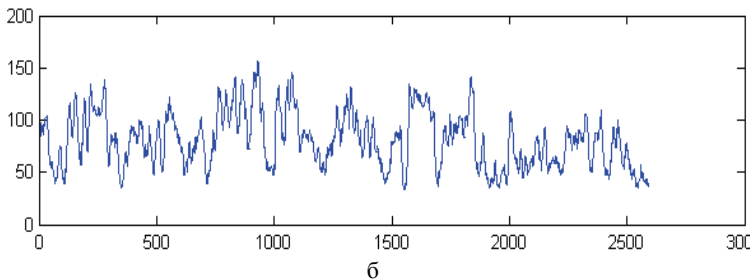


Рис. 1. Отримання сигналу із двовимірного зображення металеві поверхні з антикорозійним покриттям:
а) зображення металеві поверхні;
б) профіль поверхні в області горизонтальної лінії

Перевага мультифрактального формалізму на базі вейвлет-перетворень полягає в можливості проводити оцінку спектрально-кореляційних властивостей випадкових процесів за порівняно короткими сигналами.

У роботі пропонується знижувати розмірність зображення до одномірного сигналу (рис. 1б), за допомогою перетину поверхні зображення (рис. 1а) і довільно обраної площини.

Проведемо аналіз отриманого сигналу згідно зі схемою, що описана вище. Як вже зазначалось, вибір базисного вейвлету є дуже важливим для коректного аналізу даних. У роботі розглянуті такі 3 вейвлети: Гауса, Морлета та «мексиканський капелюх».

На рис. 2 показані різні поверхні безперервного вейвлет-перетворення одного і того ж сигналу (рис. 1б), що отримані у результаті застосування різних базисних функцій.

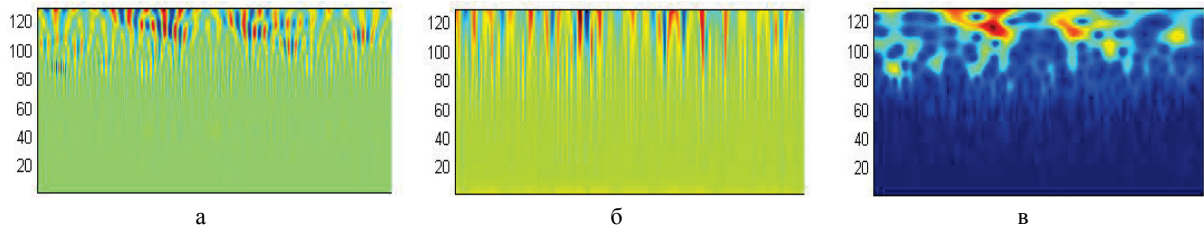


Рис. 2. Безперервне вейвлет-перетворення: а) вейвлет Гауса; б) «мексиканський капелюх»; в) вейвлет Морлета

Мультифрактальний аналіз сигналу проводиться з використанням FracLab 2. Відповідно кожному базисному вейвлету розраховані мультифрактальні спектри, що показані на рис. 3.

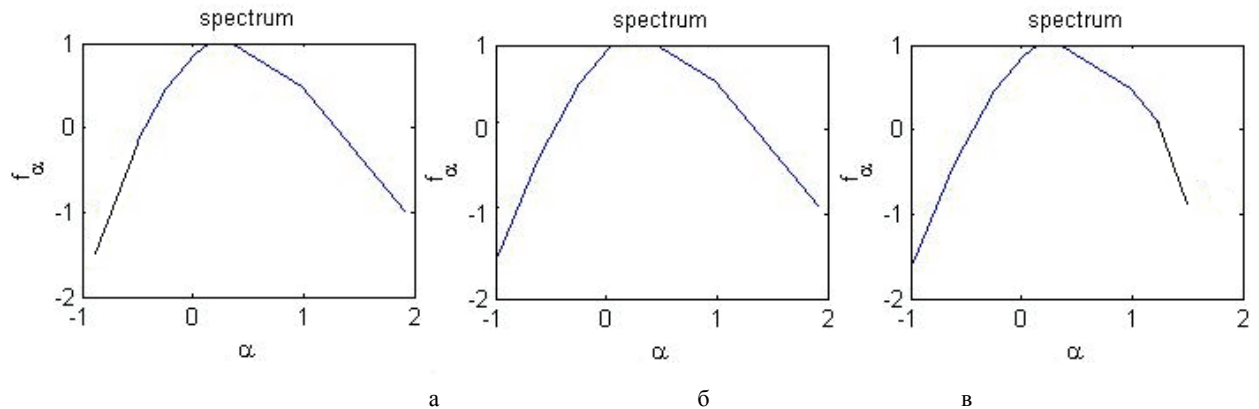


Рис. 3 – Мультифрактальний спектр із застосуванням вейвлетів: а) Гауса, б) «мексиканська шляпа», в) Морлета

Тестове зображення (рис. 1а) було також проаналізоване за класичною схемою мультифрактального аналізу, що описаного у роботах [3, 4, 5]. Нагадаємо, що даний підхід відрізняється тим, що замість покриття досліджуваного сигналу вейвлетами, використовується окремий випадок – покриття кубами. Таким чином, співвідношення (2) у рамках даного підходу виглядає так:

$$Z(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon), \quad (5)$$

де p_i — міра об'єкта в i -й клітині при розбивці поверхні з масштабом ε .

Міра p_i генерується, як відношення частини площі поверхні в i -й клітині до всієї площі поверхні. Мультифрактальний спектр обчислюється як описано вище. Результат обчислення даних функцій з використанням авторського програмного забезпечення *MFSR Steel* [4]

показав, що числові значення мультифрактальних характеристик мають незначні відхилення (відносна похибка 5...7%) від значень, що отримані за допомогою методу ММВП.

Таким чином, мультифрактальний аналіз поверхні матеріалу можна проводити по її профілю, розглядаючи його як одномірний сигнал, з використанням апарата ММВП.

Висновки

Мультифрактальний формалізм, що базується на вейвлет-аналізі, у порівнянні із традиційними методами дослідження структури сигналів (наприклад кореляційним аналізом) дає можливість вивчати більш тонкі характеристики. Даний метод проявляє чутливість до динаміки на різних масштабах — від слабких сингулярностей (малі флуктуації) до сильних сингулярностей (великі флуктуації). Основа аналізу — вейвлет-перетворення є інструментом, що дуже добре пристосований для вивчення властивостей самоподібності (у термінах вейвлет-коефіцієнтів це означає ступеневе

поводження їхніх вищих моментів при зміні масштабу). Метод добре підходить для рішення фізичних завдань, оскільки він оперує інтуїтивно-зрозумілими характеристиками. Зокрема, спектр сингулярностей містить інформацію, з одного боку, про кореляційні властивості аналізованого процесу (які відносяться до числа базових характеристик у теорії випадкових процесів), а з іншого боку, про ступінь однорідності сигналу, кількісною мірою якої є ширина функції узагальненої фрактальної розмірності D_q .

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Помулев В. В. Разработка моделей фрактальных структур металлических материалов: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 01.05.02 / В. В. Помулев. Нац. мет. акад. України. — Днепропетровск, 2005. — 23 с.
2. Иванова В. С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов / В. С. Иванова. — М. : Наука, 1992.
3. Встовский Г. В. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов : [монография] / Г. В. Встовский, А. Г. Колмаков, И. Ж. Бунин. — М. : Ижевск, 2001.
4. Михалев А. И. Оценка параметров мультифрактальных моделей металлографических изображений / А. И. Михалев, А. И. Дервянко, Ю. А. Водолазский, В. В. Помулев. — Современные проблемы металлургии. — 2004. — Том 7.
5. Михалев А. И. Мультифрактальный анализ в задачах оценивания качества медных покрытий / А. И. Михалев, Ю. А. Водолазский // Нові Технології. — Кременчук : КУЕІТУ, 2006. — 2(12). — С. 184—188.
6. Павлов А. Н. Мультифрактальный анализ сложных сигналов / А. Н. Павлов, В. В. Анищенко // УФН 177(8), 2007. — С. 859-876.
7. Короновский А. А. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения / А. А. Короновский, А. Е. Храмов // М.Ж Физматлит, 2003.
8. Harte D. Multifractals: theory and applications / D. Harte. — Boca Raton, Florida: Chapman & Hall/CRC, 2001.
9. Божокин С. В. Фракталы и мультифракталы / С. В. Божокин, Д. А. Паршин — М. : Ижевск, 2001.
10. Muzy J. F., Vayns E., Arneodo A. — Phys. Rev. Lett. 67 3515 (1991).

Рекомендована кафедрою автоматичної та інформаційно-вимірювальної техніки

Надійшла до редакції 21.10.08
Рекомендована до друку 20.11.08

Михальов Олександр Ілліч — завідувач кафедри, **Водолазкий Юрій Олександрович** — асистент.

Кафедра інформаційних технологій та систем Національної металургійної академії України