

01

Применение вейвлет-преобразования для обработки изображений в атомно-силовом микроскопе

© С.Ш. Рехвиашвили

Институт прикладной математики и автоматизации КБНЦ РАН,
Нальчик

Поступило в Редакцию 19 октября 2001 г.

Предлагается использовать вейвлет-преобразование для обработки изображений в сканирующем атомно-силовом микроскопе (АСМ). С помощью численного моделирования изображений показана эффективность предлагаемого метода. Отмечено, что вейвлет-преобразование может использоваться для обработки изображений в ближнепольной, туннельной и магнитной силовой микроскопии.

Одной из основных задач в практической зондовой микроскопии является разработка новых эффективных методов формирования и обработки сигналов. В современных сканирующих зондовых микроскопах, как правило, применяется цифровая обработка сигналов, предусматривающая наличие ЭВМ с соответствующим программным обеспечением. Это обеспечивает эффективное управление прибором и оперативную обработку результатов измерений [1].

В настоящей работе предлагается исследовать вейвлет-преобразование для обработки изображений и анализа физических процессов, происходящих в системе зонд-образец АСМ. Вейвлет-преобразование произвольного сигнала $u(t)$ заключается в его разложении в ряд по солитоноподобным функциям (базовым вейвлетам) $\psi(t)$, что обеспечивает двумерную развертку соответствующего спектра по координате и частоте [2–4]. Для покрытия всего сигнала короткими вейвлетами используются процедуры сдвига и масштабного преобразования. В итоге сигнал представляется совокупностью параметрических ”вейвлетных волн”, зависящих от частоты (масштаба) и координаты (сдвига). Ма-

тематически это выражается следующим образом:

$$u(t) = \frac{1}{a_0 C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} db \int_0^{\infty} W\left(\frac{a}{a_0}, \frac{b-b_0}{a_0}\right) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{da}{a^2}, \quad (1)$$

$$W(a, b) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{\psi}(\omega)|^2 \frac{d\omega}{|\omega|},$$

где $W(a, b)$ — функция, определяющая вейвлет-спектр; переменные a и b задают расширение и сдвиг для покрытия сигнала вейвлетом; a_0, b_0 — управляющие параметры, позволяющие изменять масштаб и перемещать изображения; C_ψ — нормализующий коэффициент; $\hat{\psi}(\omega)$ — Фурье-образ базового вейвлета. Фильтрация искаженного шумом сигнала осуществляется пороговым обрезанием спектра

$$W'(a, b) = W(a, b) \Phi(|W(a, b)| - f), \quad (2)$$

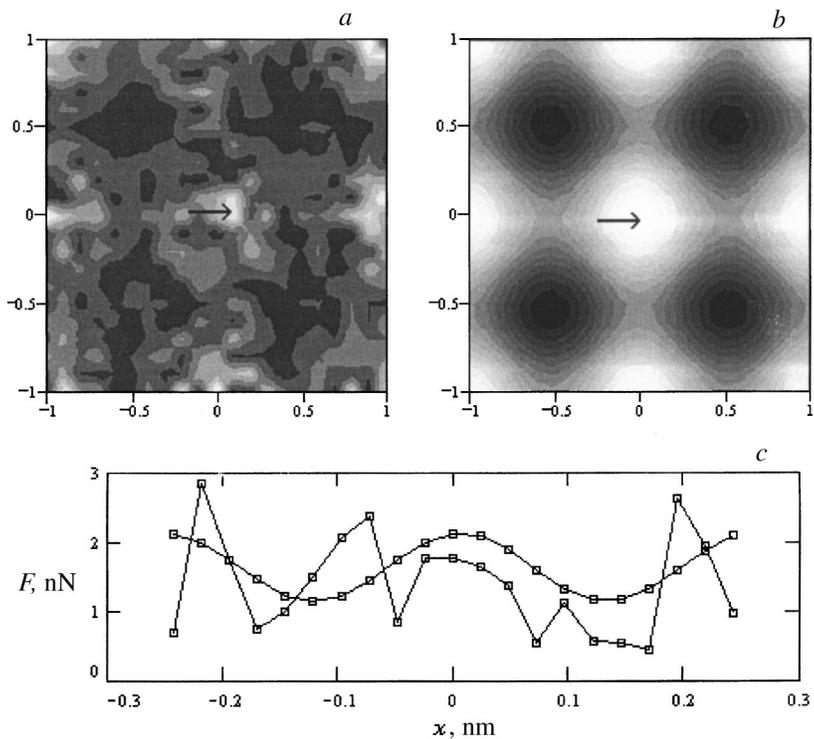
$$\Phi(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases},$$

где $\Phi(x)$ — функция Хевисайда, f — уровень подавления шума. После замены $W(a, b)$ на $W'(a, b)$ в (1) получается отфильтрованный сигнал.

Формулы (1), (2) представляют основу математической модели вейвлет-фильтрации. Для ее реализации в работе проводился расчет силовых изображений различных модельных поверхностей в приближении одноатомного острия [5]. В расчетах использовались процедура быстрого вейвлет-преобразования [3,4], МНАТ-вейвлет (МНАТ от англ. Mexican Hat — мексиканская шляпа), представляющий собой вторую производную от функции Гаусса [2–4], и потенциал Леннарда–Джонса. Параметры потенциала (глубина потенциальной ямы и равновесное расстояние) для системы углерод–углерод рассчитывались в приближении электронного газа [6]. Шум, вызванный флуктуациями и дрейфом в АСМ, моделировался следующим соотношением:

$$F = F_0(1 + \xi \Delta),$$

где F_0 — номинальное значение силы; ξ — центрированная случайная величина, принимающая значения на интервале $(-1, 1)$; Δ — относительный разброс силы, обусловленный наличием шума.



Результаты численного эксперимента: a , b — изображения модельной атомной решетки (размер кадров 0.5×0.5 nm); c — силовые сигналы.

На рисунке, a , b представлены изображения условной квадратной решетки атомов углерода с периодом 0.246 nm: a — искаженное шумом изображение ($\Delta = 0.8$), максимальный перепад по силе $\Delta F = 4.5$ nN; b — изображение, полученное после построчной вейвлет-фильтрации (уровень подавления шума $f = 0.1$ nN), $\Delta F = 2.5$ nN. Расстояние от атома острия до поверхности составляло 0.25 nm. На рисунке, c приведены силовые сигналы вдоль отдельных линий сканирования: ломаная кривая представляет собой исходный, а гладкая — отфильтрованный сигнал. Выбранные линии сканирования показаны на рисунке, a , b стрел-

ками. Из приведенных рисунков видно, что метод вейвлет-фильтрации АСМ-изображений обеспечивает глубокое подавление шума при сохранении исходной структуры сигнала. В целом же численный эксперимент выявил высокую эффективность вейвлет-фильтрации при обработке сигналов сложной формы, что объясняется основными свойствами самих базовых вейвлетов, а именно их ограниченностью и автономностью. С его помощью, например, удалось успешно обработать искаженное шумом изображение модельной атомной решетки со случайным расположением дефектов (вакансий). Фурье-фильтрация в данном случае оказалась малоэффективной.

Вейвлет-преобразование может применяться для анализа ближне-полных оптических изображений. Известно, что в энергетическом спектре таких изображений содержатся детали, отвечающие различным масштабам (ближнему и дальнему полям), а сам сигнал имеет фрактальную структуру. Для решения задачи о сверхразрешении в спектре коэффициентов $W(a, b)$ необходимо выделить эванесцентную область, а затем с помощью обратного вейвлет-преобразования восстановить изображение. Аналогично обстоит дело и с туннельным микроскопом. Здесь вейвлет-преобразование можно использовать для изучения неупругого туннелирования и спиновой поляризации. В магнитной силовой микроскопии вейвлет-преобразование может быть применено для анализа процесса намагничивания.

В заключение отметим, что задачу о подавлении шума можно также решать с помощью редукции $[A, \Sigma]$ -модели [7], а также методом схемотехнического моделирования, например с помощью программы PSpice [8]. Эти вопросы предполагается рассмотреть в последующих работах.

Список литературы

- [1] *Быков В.А.* и др. // Зондовая микроскопия 99. Материалы Всероссийского совещания. Н. Новгород: ИФМ РАН, 1999. С. 327.
- [2] *Астафьева Н.М.* // УФН. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145.
- [3] *Петухов А.П.* Введение в теорию базисов и всплесков. С.-Петербург: Изд. СПбГТУ, 1999.
- [4] *Переберин А.В.* // Выч. методы и программирование. 2001. Т. 2. С. 15.
- [5] *Gould S.A.C., Buke K., Hansma P.K.* // Phys. Rev. B. 1989. V. 40. N 8. P. 5363.

- [6] *Дедков Г.В.* // УФН. 1995. Т. 165. № 8. С. 919.
- [7] *Пытьев Ю.П.* Математические методы интерпретации эксперимента. М.: Высш. шк., 1989.
- [8] *Разевиг В.Д.* Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ: В 4 вып. Вып. 2, 3. М.: Радио и связь, 1992.