

УДК 621.396.96

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ СИГНАЛОВ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

И.Н.Перепелкин, В.К.Топорков, М.Г.Травин*

Белгородский государственный университет, 308007,
г. Белгород, ул.Студенческая, 14

Предложен подход к решению задачи распознавания сигналов с целью устранения неоднозначности результатов измерений в угломерных системах пассивной локации. Подход основан на использовании результатов анализа частотно-временной структуры сигналов источников радиоизлучения с применением вейвлет-преобразований.

Проведенный анализ методов устранения неоднозначностей измерений в угломерных системах пассивной радиолокации показал, что для отождествления результатов измерений необходимо использовать признаковую информацию об источниках радиоизлучения. Среди таких признаков заслуживают внимания траекторные признаки и оценки параметров сигналов источников радиоизлучения, получаемые в станциях радиотехнической разведки. Дальнейшим развитием методов отождествления результатов измерений может служить предложенный метод, основанный на получении обобщенных признаков характеристик сигналов источников радиоизлучения. При этом устранение неоднозначностей измерений сводится к решению задачи распознавания-отождествления.

Основным предлагаемым математическим аппаратом распознавания сигналов является вейвлет-преобразование, которое является высокоэффективным при анализе случайных сигналов.

Поскольку новый математический аппарат получил толчок к широкому использованию сравнительно недавно (с начала 90-х годов прошлого века), стоит привести основные формальные соотношения вейвлет-преобразования. За базис принимается $\psi_{a,b}(t) = \sqrt{|a|}\psi(a(t-b))$, ($a, b \in \mathbb{R}$). Тогда непрерывное прямое вейвлет-преобразование выражается формулой

$$F(a,b) = \frac{1}{\sqrt{C_\psi}} \int_{\mathbb{R}} \overline{\psi_{a,b}(t)} f(t) dt, \quad (1)$$

а обратное вейвлет-преобразование — соотношением

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{C_\psi}} \iint_{\mathbb{R}^2} F(a,b) \psi_{a,b}(t) da db. \quad (2)$$

В обоих преобразованиях полагается, что постоянная

$$C_\psi = 2\pi \int_{\mathbb{R}} |\Psi(\omega)|^2 \frac{d\omega}{|\omega|} \quad (3)$$

конечна ($\Psi(\omega)$ — преобразование Фурье от $\psi(t)$). Говоря нестрогим языком, b соответствует «время», а a — «масштаб». Таким образом, непрерывное вейвлет-преобразование сигнала определено в пространстве «время-масштаб».

При цифровой обработке сигналов используют дискретное вейвлет-преобразование, получаемое из непрерывного заданием отсчетов a и b , например,

*travin@bsu.edu.ru

$a = 2^n$ и $b = 2^{-n}k$ дает $\psi_{nk}(t) = 2^{n/2}\psi(2^n t - k)$. Тогда прямое вейвлет-преобразование выражается двойной последовательностью

$$w = (w_{n,k})_{n,k \in \mathbb{Z}^2} \in \ell^2(\mathbb{Z}^2), \tag{4}$$

а обратное — двойной суммой

$$\sum_{n,k} w_{nk} \psi_{nk}(t). \tag{5}$$

Приведенные соотношения соответствуют вейвлет-преобразованию Хаара [2].

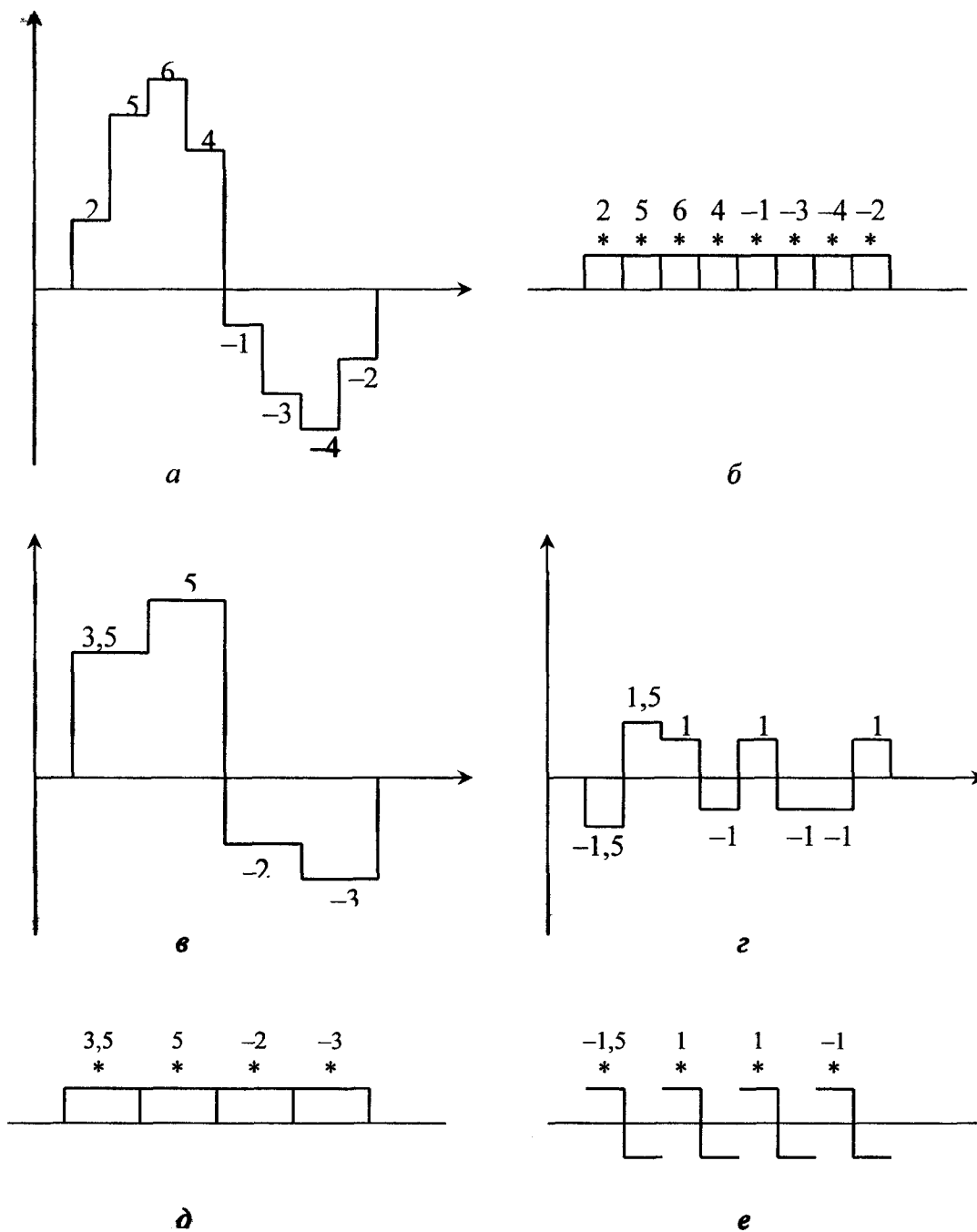


Рис.1. Иллюстрация идеи вейвлет-преобразования Хаара

Идею вейвлет-преобразования Хаара проиллюстрируем на примере. Пусть имеется 8 выборок сигнала $x = (2, 5, 6, 4, -1, -3, -4, -2)$ (см. рис. 1,а). Его можно представить как 2 блока 1×1 №1 + 5 блоков 1×1 №2 + 6 блоков 1×1 №3 + ... (см. рис. 1,б). 8 блоков 1×1 представляют собой базисные функции, а сигнал — линейную комбинацию этих восьми функций. Далее заменим каждую пару отсчетов сигнала их средними значениями (рис. 1,в). Для восстановления исходного сигнала необходимо сохранить ошибку, т.е. разницу между исходными отсчетами сигнала и их средними значениями (рис. 1,г). Усредненный сигнал обозначается $x^{(-1)}$, а разностный — $y^{(-1)}$. Таким образом, $x = x^{(-1)} + y^{(-1)}$. Усредненный сигнал $x^{(-1)}$ может быть представлен в виде линейной комбинации блоков 2×1 (рис. 1,д), а разностный сигнал $y^{(-1)}$ в виде линейной комбинации 4 базисных функций, изображенных на рис. 1,е. Таким образом, исходный сигнал может быть представлен линейной комбинацией $4 + 4$ базисных функций.

Опишем алгоритм формирования вейвлет-преобразования формально. Возьмем сигнал из восьми отсчетов, как в приведенном выше примере,

$$x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8). \quad (6)$$

Все пространство V_0 таких сигналов представляет собой пространство \square^8 . Заметим, что это Евклидово пространство с метрикой $\langle X, Y \rangle = X^T Y$. Это пространство описывается натуральным базисом $\{\varphi_{0k}\}_{k=1}^8$, где $\varphi_{0k} = e_k$ — k -ый столбец матрицы $\mathbf{E}^{(0)} = \mathbf{I}_8$. Положим $\mathbf{H}^{(0)} = \mathbf{I}_8$, $x = x^{(0)} = [\mathbf{H}^{(0)}]^T \mathbf{X}^{(0)}$. Заметим, что базис ортонормированный, т.е.

$$\varphi_{0p}^T \varphi_{0q} = \delta_{p-q}, \quad p, q = 1, \dots, 8. \quad (7)$$

Определим теперь подпространство V_{-1} , образованное базисными функциями

$$\varphi_{-1,k} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\varphi_{0,2k-1} + \varphi_{0,2k}), \quad k = 1, \dots, 4, \quad (8)$$

и определяемое матрицей

$$\mathbf{H}^{(-1)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & & & & & & \\ & & 1 & 1 & & & & \\ & & & & 1 & 1 & & \\ & & & & & & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Очевидно, что базисный вектор $\varphi_{-1,k}$ представляет собой k -ый столбец матрицы $[\mathbf{H}^{(-1)}]^T$. Как и ранее, полученные базисные функции ортонормированные: $\mathbf{H}^{(-1)} [\mathbf{H}^{(-1)}]^T = \mathbf{I}_4$. Проекция $x^{(-1)}$ вектора x на пространство V_{-1} — $x^{(-1)} = [\mathbf{H}^{(-1)}]^T \mathbf{X}^{(-1)}$, где $\mathbf{X}^{(-1)} = \mathbf{H}^{(-1)} \mathbf{X}^{(0)}$. Таким образом,

$$\mathbf{X}^{(-1)} = \frac{1}{\sqrt{2}} [x_1 + x_2, x_3 + x_4, x_5 + x_6, x_7 + x_8]^T. \quad (10)$$

Эта проекция дает представление исходного сигнала с худшим в два раза разрешением. Утраченная информация заключена в дополнении V_{-1} к V_0 . Обозначим это пространство как $W_{-1} = V_0 \square V_{-1}$. Это пространство W_{-1} также размерности 4 и определяется базисными векторами

$$\psi_{-1,k} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\varphi_{0,2k-1} - \varphi_{0,2k}), \quad k = 1, \dots, 4. \quad (11)$$

Эти векторы представляют собой столбцы матрицы $[\mathbf{G}^{(-1)}]^T$:

$$\mathbf{G}^{(-1)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & & \\ & & 1 & -1 & & \\ & & & & 1 & -1 \\ & & & & & & 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Образованный базис также ортонормированный — $\mathbf{G}^{(-1)}[\mathbf{G}^{(-1)}]^T = \mathbf{I}_4$. Таким образом, исходный сигнал x разложен в ортогональную сумму $x = x^{(-1)} + y^{(-1)}$, где $x^{(-1)}$ — проекция x в V_{-1} , а $y^{(-1)}$ — проекция x в W_{-1} , определяемая как $y^{(-1)} = [\mathbf{H}^{(-1)}]^T \mathbf{Y}^{(-1)}$, где $\mathbf{Y}^{(-1)} = \mathbf{G}^{(-1)}\mathbf{X}^{(0)}$.

С математической точки зрения новый сигнал представлен в новом базисе, образуемом столбцами матрицы $\mathbf{E}^{(-1)} = \mathbf{I}_8[\mathbf{T}^{(-1)}]^T$, где матрица преобразования $[\mathbf{T}^{(-1)}]^T = [\mathbf{H}^{(-1)}]^T[\mathbf{G}^{(-1)}]^T$. Новые координаты в этом базисе выражаются как

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(-1)} \\ \mathbf{Y}^{(-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{(-1)} \\ \mathbf{G}^{(-1)} \end{bmatrix} \mathbf{X}^{(0)} = \mathbf{T}^{(-1)}\mathbf{X}^{(0)}. \quad (13)$$

Рекурсивно повторим описанные выше операции, определив подпространство V_{-2} в V_{-1} , образуемое ортонормированными базисными векторами

$$\varphi_{-2,k} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\varphi_{-1,2k-1} + \varphi_{-1,2k}), \quad k = 1, 2, \quad (14)$$

и проекцию $x^{(-1)}$ на V_{-2} . Это дает

$$x^{(-2)} = [\varphi_{-2,1} \quad \varphi_{-2,2}] \mathbf{X}^{(-2)}, \quad (15)$$

где $\mathbf{X}^{(-2)} = \mathbf{H}^{(-2)}\mathbf{X}^{(-1)}$ и

$$\mathbf{H}^{(-2)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & & \\ & & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Если $W_{-2} = V_{-1} \square V_{-2}$, то ортогональное дополнение образуется векторами, являющимися столбцами матрицы $[\mathbf{G}^{(-2)}\mathbf{H}^{(-1)}]^T$, где

$$\mathbf{G}^{(-2)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & & \\ & & 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

а проекция $x^{(-1)}$ на W_{-2} дает $y^{(-2)} = [\mathbf{G}^{(-2)}\mathbf{H}^{(-1)}]^T \mathbf{Y}^{(-2)}$, где $\mathbf{Y}^{(-2)} = \mathbf{G}^{(-2)}\mathbf{X}^{(-1)}$.

Этот процесс повторяется рекурсивно до предельного случая, когда дальнейшие преобразования становятся невозможными из-за одномерности подпространства преобразований. В нашем примере с сигналом из 8 выборок это следующий шаг.

Пространство V_{-3} одномерное, и $\varphi_{-3,1} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\varphi_{-2,1} + \varphi_{-2,2})$ — его базисный вектор, где все слагаемые равны $2^{-\frac{3}{2}}$. Координата $\mathbf{X}^{(-3)} = \mathbf{H}^{(-3)}\mathbf{X}^{(-2)}$, где $\mathbf{H}^{(-3)} = \frac{1}{\sqrt{2}}[1 \quad 1]$. Таким образом, $\mathbf{X}^{(-3)}$ пропорционально среднему сигнала, т.к. равно $2^{-\frac{3}{2}}(x_1 + x_2 + \dots + x_8)$. Аналогично $W_{-3} = V_{-2} \square V_{-3}$ одномерно и образуется базисным вектором

$\psi_{-3,1} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\varphi_{-2,1} - \varphi_{-2,2})$. Координата проекции $y^{(-3)}$ равна $Y^{(-3)} = \mathbf{H}^{(-3)}\mathbf{X}^{(-2)}$, где

$$\mathbf{G}^{(-3)} = \frac{1}{\sqrt{2}}[1 \quad -1].$$

Окончательно сигнал разложен в виде

$$x = x^{(-3)} + y^{(-3)} + y^{(-2)} + y^{(-1)} = x^{(-2)} + y^{(-2)} + y^{(-1)} = x^{(-1)} + y^{(-1)}. \quad (18)$$

С увеличением k , $x^{(k)}$ дает все лучшую аппроксимацию исходного сигнала, т.е. возрастает разрешение. Декомпрессия сигнала из вейвлет-преобразования производится также путем преобразований базиса. Базисы, используемые в V_0 представляются как

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{(0)} &= [\varphi_{0,1}, \varphi_{0,2}, \varphi_{0,3}, \varphi_{0,4}, \varphi_{0,5}, \varphi_{0,6}, \varphi_{0,7}, \varphi_{0,8}]; \\ \mathbf{E}^{(-1)} &= [\varphi_{-1,1}, \varphi_{-1,2}, \varphi_{-1,3}, \varphi_{-1,4} \mid \psi_{-1,1}, \psi_{-1,2}, \psi_{-1,3}, \psi_{-1,4}]; \\ \mathbf{E}^{(-2)} &= [\varphi_{-2,1}, \varphi_{-2,2} \mid \psi_{-2,1}, \psi_{-2,2} \mid \psi_{-1,1}, \psi_{-1,2}, \psi_{-1,3}, \psi_{-1,4}]; \\ \mathbf{E}^{(-3)} &= [\varphi_{-3,1} \mid \psi_{-3,1} \mid \psi_{-2,1}, \psi_{-2,2} \mid \psi_{-1,1}, \psi_{-1,2}, \psi_{-1,3}, \psi_{-1,4}], \end{aligned} \quad (19)$$

или в матричном виде,

$$\mathbf{E}^{(0)} = \mathbf{I}_8, \quad (20 \text{ а})$$

$$\mathbf{E}^{(-1)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (20 \text{ б})$$

$$\mathbf{E}^{(-2)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -\sqrt{2} \end{bmatrix}, \quad (20 \text{ в})$$

$$\mathbf{E}^{(-3)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & -2 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 1 & -1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & -2 \end{bmatrix}. \quad (20 \text{ г})$$

Соответствующие координаты определяются соотношениями:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}^{(0)}, \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(-1)} \\ \mathbf{Y}^{(-1)} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(-2)} \\ \mathbf{Y}^{(-2)} \\ \mathbf{Y}^{(-1)} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(-3)} \\ \mathbf{Y}^{(-3)} \\ \mathbf{Y}^{(-2)} \\ \mathbf{Y}^{(-1)} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Умножение матриц преобразования на соответствующие векторы координат даст исходный сигнал. Таким образом, для сжатия и декомпрессии сигнала используются одни и те же матрицы преобразования:

$$F(\mathbf{X}) = [\mathbf{E}^{(-k)}]^T \mathbf{X}^{(0)} \text{ и } \mathbf{X} = \mathbf{E}^{(-k)} F(\mathbf{X}), \quad (22)$$

где k — степень сжатия.

Приведем примеры использования предлагаемого метода распознавания на сигналах простой формы. Пусть все сигналы представлены 16 выборками. В таком случае матрица преобразования $\mathbf{E}^{(-4)}$ для всех сигналов общая:

$$\mathbf{E}^{(-4)} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & -2\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \sqrt{2} & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{2} & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\sqrt{2} & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{2} & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\sqrt{2} & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{2} \\ 1 & -1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\sqrt{2} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

В табл. 1 приведены форма сигнала, значения выборок и вектора вейвлет-преобразования.

1. Обратимся сразу к самому простому признаку сходства. Элементы $\mathbf{X}^{(-4)}$ сигналов 1 и 2 не равны нулю, в то время, как сигнал 3 имеет нулевое значение. Поэтому

без декомпрессии сигналов можно сделать вывод, что сигнал 3 не похож на сигналы 1 и 2 по признаку условного среднего.

2. Далее необходим анализ сигналов 1 и 2. Для этого следует произвести первый шаг декомпрессии сигналов, т.е. найти их проекции $\mathbf{X}^{(-3)}$:

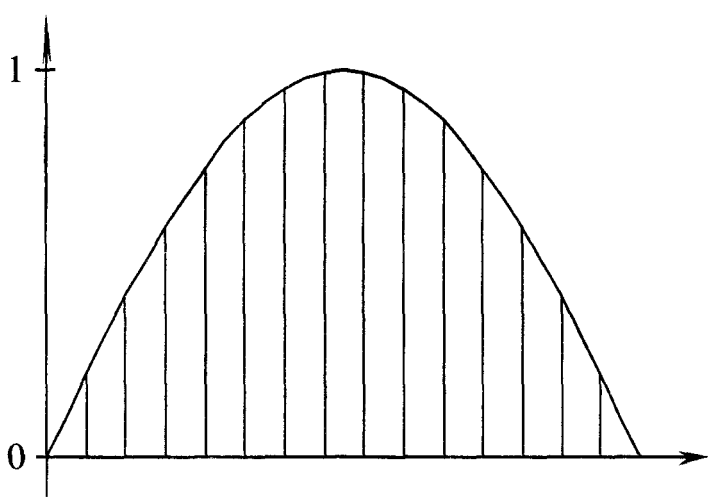
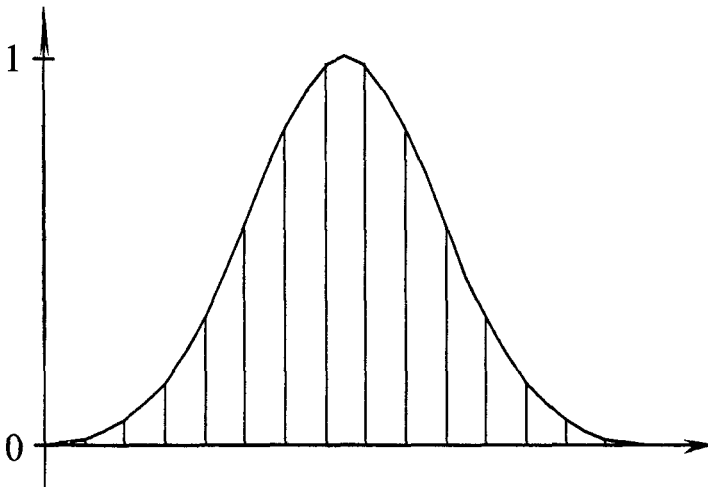
– для сигнала 1

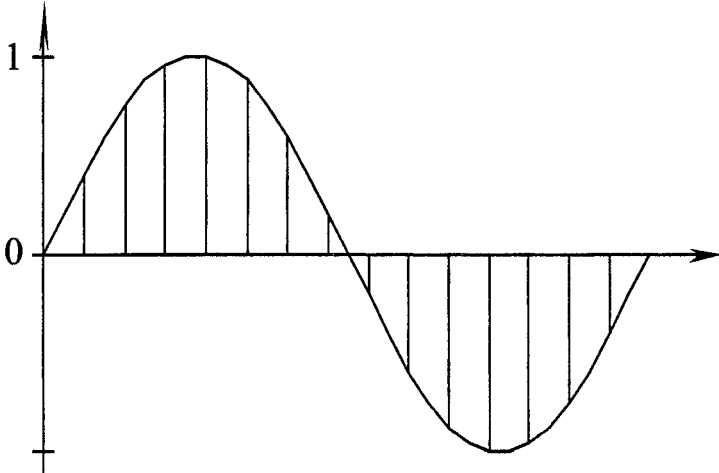
$$\mathbf{X}_1^{(-3)} = \frac{1}{\sqrt{2}} [\mathbf{H}^{(-4)}]^T \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1^{(-4)} \\ \mathbf{Y}_1^{(-4)} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2.38 \\ 0.00 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 2.38 \\ 2.38 \end{bmatrix};$$

– для сигнала 2

$$\mathbf{X}_2^{(-3)} = \frac{1}{\sqrt{2}} [\mathbf{H}^{(-4)}]^T \begin{bmatrix} \mathbf{X}_2^{(-4)} \\ \mathbf{Y}_2^{(-4)} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.48 \\ 0.00 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1.48 \\ 1.48 \end{bmatrix}.$$

Таблица 1

| № | Форма сигнала | X | F(X) |
|---|--|--|---|
| 1 |  | 0.00 0.21 0.41 0.59 0.74 0.87 0.95 0.99 0.99 0.95 0.87 0.74 0.59 0.41 0.21 0.00 | 2.38 0.00 -0.83 0.83 -0.40 -0.17 0.17 0.40 -0.15 -0.13 -0.09 -0.03 0.03 0.09 0.13 0.15 |
| 2 |  | 0.00 0.02 0.07 0.16 0.33 0.57 0.82 0.98 0.98 0.82 0.57 0.33 0.16 0.07 0.02 0.00 | 1.48 0.00 -0.87 0.87 -0.11 -0.45 0.45 0.11 -0.01 -0.06 -0.17 -0.11 0.11 0.17 0.06 0.01 |

| № | Форма сигнала | X | F(X) |
|---|--|---|--|
| 3 |  | $\begin{bmatrix} 0.00 \\ 0.41 \\ 0.74 \\ 0.95 \\ 0.99 \\ 0.87 \\ 0.59 \\ 0.21 \\ -0.21 \\ -0.59 \\ -0.87 \\ -0.99 \\ -0.95 \\ -0.74 \\ -0.41 \\ 0.00 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.00 \\ 2.38 \\ -0.20 \\ -0.20 \\ -0.64 \\ 0.53 \\ 0.53 \\ -0.64 \\ -0.29 \\ -0.15 \\ 0.08 \\ 0.27 \\ 0.27 \\ 0.08 \\ -0.15 \\ -0.29 \end{bmatrix}$ |

Первая декомпрессия не дала никаких результатов, потому что сигналы симметричны относительно середины интервала выборки. Однако при первой декомпрессии распознаются сигналы с различными средними значениями относительно середины интервала выборки.

3. Продолжаем декомпрессию сигналов 1 и 2. Для этого выделяем $\mathbf{X}^{(-2)}$:
 – для сигнала 1:

$$\mathbf{X}_1^{(-2)} = \frac{1}{\sqrt{2}} [\mathbf{H}^{(-3)}]^T \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1^{(-3)} \\ \mathbf{Y}_1^{(-3)} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{2.38}{\sqrt{2}} \\ \frac{2.38}{\sqrt{2}} \\ -0.83 \\ 0.83 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0.85 \\ 2.51 \\ 2.51 \\ 0.85 \end{bmatrix};$$

– аналогично для сигнала 2: $\mathbf{X}_2^{(-2)} = \frac{1}{\sqrt{2}} [0.18 \ 1.92 \ 1.92 \ 0.18]^T$.

Сравнивая полученные векторы, находим, что соотношение средних составляющих проекции сигнала 1 с первой и четвертой почти в 3,5 раза меньше, чем в проекции сигнала 2. Отсюда вновь приходим к выводу, что сигналы значительно отличаются по форме.

Чем ближе сигналы по форме, тем больше приходится проводить декомпрессий. Таким образом, мы получаем систему распознавания сигналов с неопределенным числом признаков классов и неопределенным числом самих классов. Число признаков классов зависит лишь от величин выборки сигналов и в пределе равно ее длине. Эта особенность использования вейвлет-преобразования позволяет достаточно просто строить адаптивные системы распознавания «без учителя».

Другое немаловажное преимущество использования вейвлет-преобразования проявляется при передаче данных — если сигнал распознан по первым проекциям, передачу можно прервать в любой момент, т.е. не следует дожидаться получения полного пакета данных. Для примера, если распознаются сигналы с различным условным средним, а длина выборки равна 1024, то достаточно принять 1 значение выборки и освободить передатчик от передачи оставшихся 1023 значений.

Таким образом, метод распознавания сигналов на основе вейвлет-преобразований может служить для получения обобщенных признаков характери-

стик стохастических сигналов. Вейвлет-преобразование является достаточно эффективным по количеству вычислительных операций, чем обеспечивает высокие качественные показатели распознавания сигналов в реальном масштабе времени, а следовательно, и решение задачи отождествления результатов измерений.

Литература

1. C.K.Chui. *An Introduction to Wavelets*, volume 1 of *Wavelet Analysis and its Applications*. Academic Press, Boston, 1992.
2. A.Bultheel. *Wavelets with applications in signal and image processing*. Academic Press, Boston, 2002.

APPLICATION OF WAVELET TRANSFORM FOR SIGNAL IDENTIFICATION

I.N.Perepelkin, V.K.Toporkov, M.G. Travin*

Belgorod State University, Studencheskaja St., 14, Belgorod, 308007, Russia

An approach to solution of the problem of signal identification allowing for elimination of measurement ambiguity in triangulation systems of passive location is suggested. The approach utilizes the results of frequency-time analysis of signal structure and wavelet transforms.