

УДК 621.372.542

О. В. Пономарева, кандидат технических наук, доцент
 Н. В. Пономарева, аспирант
 ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
 В. Ю. Пономарева, аспирант
 Ижевская медицинская академия

ПРИМЕНЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ОКОН В ВЕКТОРНОМ АНАЛИЗЕ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ

Показано, что временные окна в существенной степени влияют на обнаружение, разрешение, динамический диапазон, степень достоверности и реализуемости вычислительных операций при спектральном и векторном анализе. Рассмотрено применение семейства трапецидальных временных окон, включающего в себя в качестве крайних случаев классические оконные функции: окно Дирихле и окно Бартлетта – Фейера при решении задач цифрового спектрального и векторного анализа сложных сигналов. Приведена следующая количественная информация об окнах из исследуемого семейства: коэффициент утечки (Leakage Factor), уровень максимального из боковых лепестков спектра относительно спектральной функции на нулевой частоте (Relative sidelobe attenuation); ширина главного лепестка по уровню -3 дБ (Mainlobe width (-3 dB)). Исследования обобщенного семейства трапецидальных временных окон показали, что дискретные окна из данного семейства просты в реализации, имеют хорошие количественные характеристики и не требуют дополнительной памяти для их хранения.

Ключевые слова: векторный анализ, спектральный анализ, временное окно, характеристики временных окон.

Дискретные временные оконные функции (дискретные временные окна) находят самое широкое применение при решении многих задач цифровой обработки дискретных сигналов, поскольку позволяют эффективно бороться с нежелательными эффектами: паразитной амплитудной модуляцией спектра (picket-fence effect) и размывания спектральных составляющих (leakage effect). Временные окна в существенной степени влияют на обнаружение, разрешение, динамический диапазон, степень достоверности и реализуемости вычислительных операций при спектральном и векторном анализе сложных сигналов в виброакустическом функциональном диагностировании объектов, в компьютерной медицинской диагностике, в гидроакустике и в других областях научных исследований [1–24].

Обобщенное семейство трапецидальных временных окон [25] является эффективным и простым в реализации семейством временных окон, включающим в себя в качестве крайних случаев классические оконные функции: окно Дирихле (прямоугольное временное окно) и окно Бартлетта – Фейера (треугольное временное окно). Дискретные окна данного семейства (как равнобедренные трапеции) задаются числом отсчетов нижнего основания N и числом отсчетов верхнего основания m и описываются следующими соотношениями:

– для **четных значений** N и **четных значений** m из множества $m = \overline{0, (N-2)}$:

$$\omega(n) = 1 - \frac{|2n - (N - m)|}{(N - m)}; \text{ при } 1 \leq n \leq (N - m) / 2;$$

$$\omega(n) = 1; \text{ при } (N - m) / 2 < n \leq (N + m) / 2; \quad (1)$$

$$\omega(n) = 1 - \frac{|2(n - 1) - (N + m)|}{(N - m)}; \text{ при } (N + m) / 2 < n \leq N;$$

– для **четных значений** N и **нечетных значений** m из множества $m = \overline{0, (N - 2)}$:

$$\omega(n) = 1 - \frac{|2n - (N - m) - 1|}{(N - m + 1)} \text{ при } 1 \leq n < (N - m + 1) / 2;$$

$$\omega(n) = 1 \text{ при } (N - m + 1) / 2 \leq n < (N + m - 1) / 2; \quad (2)$$

$$\omega(n) = 1 - \frac{|2(n - m) - (N + m)|}{(N - m + 1)}$$

$$\text{при } (N + m - 1) / 2 \leq n \leq N;$$

– для **нечетных значений** N и **четных значений** m из множества $m = \overline{0, (N - 1)}$:

$$\omega(n) = 1 - \frac{|2n - (N - m) - 1|}{(N - m + 1)} \text{ при } 1 \leq n < (N - m + 1) / 2;$$

$$\omega(n) = 1; \text{ при } (N - m + 1) / 2 \leq n \leq (N + m - 1) / 2; \quad (3)$$

$$\omega(n) = 1 - \frac{|2(n - m) - (N - m) - 1|}{(N - m + 1)}$$

$$\text{при } (N + m - 1) / 2 < n \leq N;$$

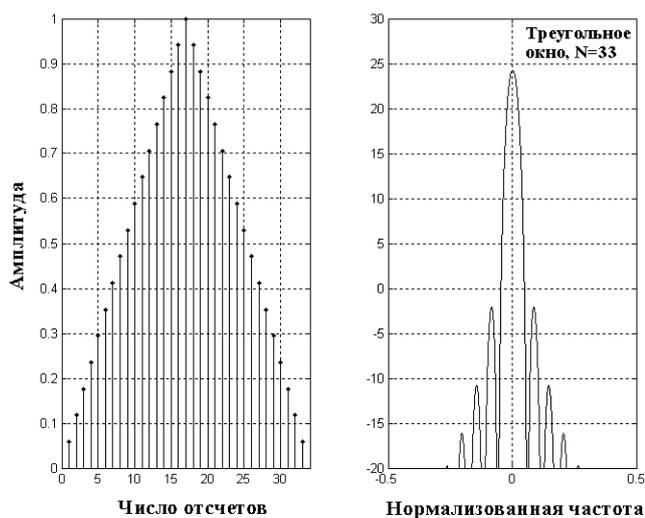
– для **нечетных значений** N и **нечетных значений** m из множества $m = \overline{0, (N - 1)}$:

$$\omega(n) = 1 - \frac{|2n - (N - m)|}{(N - m)} \text{ при } 1 \leq n \leq (N - m) / 2;$$

$$\omega(n) = 1 \text{ при } (N - m) / 2 < n \leq (N + m) / 2; \quad (4)$$

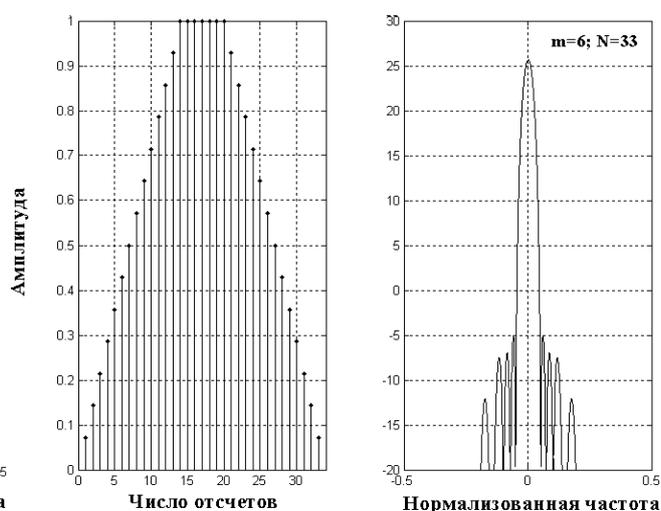
$$\omega(n) = 1 - \frac{|2(n - 1) - (N + m)|}{(N - m)} \text{ при } (N + m) / 2 < n \leq N.$$

На рис. 1 показаны 33-точечные трапецидальные окна при значениях $m = 0$ и $m = 6$, а в таблице приве-



а

дена количественная информация об окнах из исследуемого семейства дискретных временных окон (3).



б

Рис. 1. Дискретно-временные трапецидальные окна (слева) и их АЧХ (справа)

m	Коэффициент утечки, %	Уровень максимального из боковых лепестков АЧХ окна, дБ	Ширина главного лепестка по уровню -3 дБ
Треугольное окно	0,31	-26,6	0,0742219
2	0,24	-26,9	0,0742219
4	0,16	-28,9	0,0742219
6	0,16	-30,7	0,070313
8	0,29	-26,1	0,070313
10	0,55	-22,9	0,070313
12	0,95	-20,4	0,066406
14	1,47	-18,6	0,066406
16	2,09	-17,1	0,066406
18	2,79	-16	0,0625
20	3,56	-15,2	0,0625
22	4,38	-14,6	0,058594
24	5,24	-14,1	0,058594
26	6,14	-13,7	0,0054688
28	7,08	-13,5	0,0054688
30	8,09	-13,3	0,0054688
Прямоугольное окно	9,38	-13,2	0,050781

На рис. 2 представлена огибающая поверхность амплитудно-частотных характеристик трапецидального семейства временных окон при различных соотношениях N и m .

В заключение отметим, что практическое применение известных дискретных временных окон в спектральном и векторном анализе требует либо обращения к тригонометрическим функциям, либо дополнительной памяти для их хранения. Исследования семейства трапецидальных временных окон показали, что оно имеет хорошие количественные характеристики и свободно от указанных недостатков (например, окно, представленное на рис. 1, б и в таблице, $m = 6$).

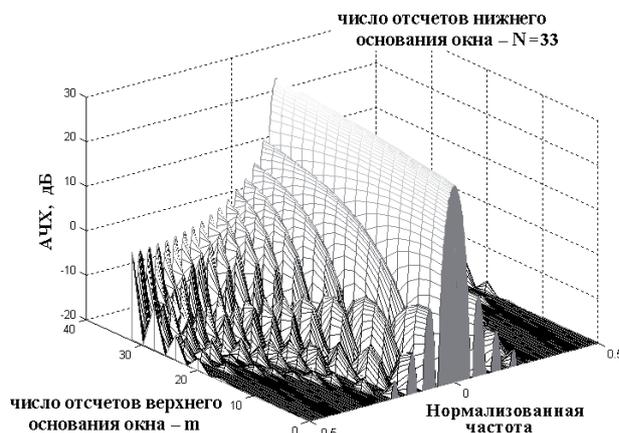


Рис. 2. Огибающая поверхность АЧХ трапецидального семейства окон

Библиографические ссылки

1. Пономарева О. В., Пономарев А. В. Восстановление значений непрерывных частотных спектров дискретных сигналов методом параметрического дискретного преобразования Фурье // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2015. – № 3 (67). – С. 88–91.
2. Пономарев В. А., Пономарева О. В., Пономарев А. В. Метод эффективного измерения скользящего параметрического спектра Фурье // Автометрия. – 2014. – Т. 50. – № 2. – С. 31–38.
3. Пономарев В. А., Пономарева О. В., Пономарев А. В., Пономарева Н. В. Обобщение алгоритмов Герцеля и скользящего параметрического дискретного преобразования Фурье // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 1. – С. 3–11.
4. Пономарева О. В. Неинвариантность скользящего энергетического параметрического фурье-спектра действительных тональных сигналов // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 2. – С. 7–14.
5. Пономарева О. В., Пономарев В. А., Пономарев А. В. Иерархическая морфологическо-информационная модель системы функционального диагностирования объектов на

основе цифровой обработки сигналов // Датчики и системы. – 2014. – № 1 (176). – С. 2–8.

6. Пономарева О. В. Инвариантность скользящего энергетического спектра Фурье дискретных сигналов в базисной системе параметрических экспоненциальных функций // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова. – 2014. – № 2 (62). – С. 102–106.

7. Пономарева О. В., Алексеев В. А., Пономарев А. В. Быстрый алгоритм измерения спектра действительных сигналов методом апериодического дискретного преобразования Фурье // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова. – 2014. – № 2 (62). – С. 106–109.

8. Пономарева О. В. Измерение спектров комплексных сигналов на конечных интервалах методом апериодического дискретного преобразования Фурье // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 1 (23). – С. 100–107.

9. Пономарева О. В., Пономарев А. В., Пономарев В. А. Измерение скользящего взвешенного энергетического дискретно-временного спектра тональных компонент // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2 (24). – С. 126–132.

10. Пономарева О. В. Измерение временных спектров дискретных сигналов методом модифицированного параметрического дискретного преобразования Фурье // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. – № 2 (24). – С. 132–138.

11. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Инвариантность текущего энергетического спектра Фурье комплексных дискретных сигналов на конечных интервалах // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 2. – С. 8–16.

12. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Инвариантность текущего энергетического фурье-спектра действительных дискретных сигналов на конечных интервалах // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – № 1. – С. 15–22.

13. Пономарева О. В., Пономарев А. В., Пономарева Н. В. Метод быстрого вычисления дискретного преобразования Фурье действительных последовательностей // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – № 2. – С. 10–15.

14. Пономарева О. В., Алексеев В. А., Пономарев А. В. Цифровой периодограммный анализ и проблемы его практического применения // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2013. – № 2 (58). – С. 130–133.

15. Пономарева О. В., Пономарев А. В., Пономарев В. А. Обобщение алгоритма Герцеля для решения задач выявления скрытых периодичностей // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1 (21). – С. 41–46.

16. Пономарева О. В., Пономарева Н. В. Повышение точности и расширение функциональных возможностей цифровых фильтров на основе частотной выборки // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2 (7). – С. 114–119.

17. Пономарева О. В. Быстрое параметрическое дискретное преобразование Фурье действительных последовательностей // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 2. – С. 2–5.

18. Пономарева О. В., Пономарева Н. В. Модификация фильтра на основе частотной выборки для решения задач цифровой обработки случайных процессов со скрытыми периодичностями // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2 (20). – С. 122–129.

19. Пономарева О. В. Вероятностные свойства спектральных оценок, полученных методом параметрического дискретного преобразования Фурье // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2 (16). – С. 36–41.

20. Алексеев В. А., Пономарев В. А., Пономарева О. В. Методология определения погрешностей измерения вероятностных характеристик случайных процессов, реализуемых процессорными измерительными средствами // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2 (16). – С. 91–99.

21. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Модификация дискретного преобразования Фурье для решения задач интерполяции и свертки функций // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т. 29. – № 8. – С. 1561–1570.

22. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Временные окна при оценке энергетических спектров методом параметрического дискретного преобразования Фурье // Автоматрия. – 1983. – № 4. – С. 39–45.

23. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Обобщение дискретного преобразования Фурье для интерполяции во временной области // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1983. – Т. XXVI, № 9. – С. 67–68.

24. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Виброакустическое диагностирование коробок передач станков цифровыми методами // СТИН. – 1983. – № 9. – С. 18–21.

25. Пономарев В. А., Тимохин В. И. Применение временных окон в цифровом спектральном анализе случайных сигналов // Методы представления и аппаратурный анализ случайных процессов и полей : 7-й Всесоюз. симпозиум. Секц. 2. – ВНИИЭП, 1974. – С. 93–96.

O. V. Ponomareva, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

N. V. Ponomareva, Post-graduate, Kalashnikov ISTU

V. Yu. Ponomareva, Post-graduate, Izhevsk State Medical Academy

Application of time windows in vector analysis of discrete signals

It is shown that time windows substantially affect the detection, resolution, dynamic range, degree of reliability and feasibility of computing operations in the spectral and vector analysis of complex signals in vibro-acoustic functional diagnosing mechanical objects, as well as in computer medical diagnostics, sonar and other areas of scientific research. The application of a family of trapezoidal time windows is considered, the family including classic window functions as extreme cases: Dirichlet window (rectangular time window) and Bartlett-Fejer window (triangular time window), in solving the problems of the digital spectral and vector analysis of complex signals. The following quantitative information related to the windows of the studied family of discrete time windows is given: the leakage factor which shows the proportion of total window energy concentrated in the side lobes of its spectrum; the maximum level of the side lobes of the spectrum relative to the spectral function at zero frequency (i.e., relative to the main lobe); the width of the main lobe at the level -3 dB. Investigations of the generalized trapezoidal time windows family showed that discrete windows of this family are simple to implement, they have good quantitative characteristics and do not require additional memory for their storage.

Keywords: vector analysis, spectral analysis, time window, characteristics of time windows.