УДК 618.51:519.2

Н. Б. Марченко, Л. М. Щербак, м. Київ

ВАГОВІ ФУНКЦІЇ В ЗАДАЧАХ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ

This paper addresses the problem of applying classical methods of spectral analysis using weighting functions. Processing with window functions allows reduction in the lateral spectral counts, but in each case it is necessary to choose the optimal windowing function, based on the a priori conditions.

Вступ. Перетворення Фур'є (ПФ) використовується при дослідженнях сигналів різного виду в частотній області. В задачах цифрового спектрального аналізу сигналів застосовується дискретне перетворення Фур'є (ДПФ), а в більшості випадків на практиці – швидке перетворення Фур'є (ШПФ). Цифрова реалізація ДПФ і відповідно ШПФ, як наближених методів обчислення ПФ мають певні недоліки, які, як правило, відносяться до методичних похибок обчислення. Якщо говорити про задачі використання ШПФ, то в більшості випадків такі задачі є типовими по постановці, але мають широкий діапазон отримання рішень в залежності від характеристик досліджуваних сигналів. До таких сигналів відносяться періодичні сигнали, стаціонарні випадкові процеси, нестаціонарні періодично корельовано процеси та інші.

Результати досліджень сигналів з використанням неперервного ПР і цифрового ДПФ наведені у значній кількості робіт. Але на наш погляд питання практичних рекомендацій використання вагових вікон при цифровому спектральному аналізі розглянуті не в повній мірі.

Постановка завдання. Провести аналіз використання відомих вагових вікон у часовій і частотних областях і сформулювати практичні рекомендації їх використання відповідно до типу досліджуваних сигналів при цифровому спектральному аналізі.

Основні результати дослідження. Відомо, що ПФ можна розглядати як універсальний математичний інструмент при дослідженнях сигналів. Спочатку розглянемо неперервний випадок, в основному використовуючи графічні ілюстрації сигналів.

Неперервний випадок. Розглянемо на прикладі ефект розмивання відліків спектральних компонент. Досліджуваний сигнал $u_0(t)$ є неперервним, заданим на всій часовій вісі $t \in \mathbf{R}$. Як приклад, цей сигнал можна задати як гармонійне коливання з частотою f_0 (рис.1, а). Зафіксуємо скінченний інтервал часу T на якому розраховуватимемо спектр сигналу, як показано на рис.1, б). Тоді сигнал можна представити як добуток сигналу $u_0(t)$ на прямокутний імпульс тривалістю T, $u_T(t) = u_0(t) \cdot w(t)$.

 © Н. Б. Марченко, Л. М. Щербак

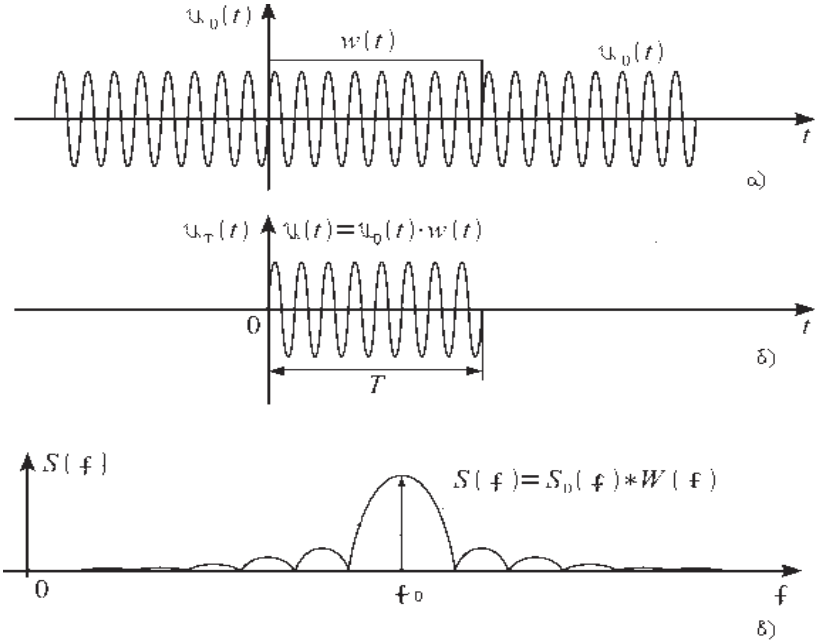

Рис. 1: Спектр обмеженого по часу гармонічного сигналу

Спектр $S(f)$ сигналу $u_T(t)$, згідно властивостям перетворення Фур'е буде рівний згортці спектрів вихідного сигналу $S_T(f)$ і спектру $W(f)$ прямокутного імпульсу $w(t)$: $S(f)=S_T(f)*W(f)$. Графік спектру сигналу $S(f)$ показано на рис.1, в), на якому проілюстровано розмивання відліків спектральних компонент. Відомо, що наведені спектральні компоненти в сигналі $u_0(t)$ відсутні, а існує лише компонента на частоті f_0 як дельта-функція.

Цифрова обробка. Застосування цифрового спектрального аналізу є ефективним у обчислювальному відношенні і забезпечує отримання прийнятних для практики результатів для значного класу сигналів [1]. Однак, незважаючи на зазначені переваги підходу, заснованого на обчисленні ШПФ, існує ряд принципових обмежень. Найбільш важливі з них - це обмеження частотного діапазону, а також здатності розрізняти спектральні лінії двох і більше компонент сигналів. Друге обмеження обумовлено неявною віконною обробкою даних при обчисленні ШПФ. Енергія спектральної інтенсивної компоненти сигнала «розмивається» в бічні спектральні відліки, що призводить до накладання і спотворення спектральних відліків інших спектральних компонент. При цьому спектральні відліки слабких компонент

можуть маскуватися бічними спектральними відліками більш інтенсивних компонент спектру, що досліджується. Правильний вибір функції вікна, значення якої спадають на краях, дозволяють послабити витік в бічні спектральні відліки, однак лише за рахунок зниження роздільної здатності [2, 3]. Останім часом запропоновано значну кількість різних процедур спектрального оцінювання, які розроблені щоб послабити вказані обмеження при використанні ШПФ. Часто про сигнал, з якого беруться часові відліки, відома деяка апріорна інформація, що дозволяє вибрати необхідну модель процесу. У цьому випадку можна отримати більш точну спектральну оцінку, визначаючи характер обраної моделі за результатами вимірювань. Основна проблема класичних методів спектрального оцінювання обумовлена спотворюючим впливом розмиванням спектральних відліків.

Актуальним питанням, яке пов'язане з класичними методами ЦОС, є застосуванням віконних функцій [2]. Якщо неперервний сигнал позначався як $u(t)$, то дискретний сигнал позначимо як $x(t_n) = x[n]$. Зауважимо, що остаточний запис дискретного сигналу $x_0[n]$ з N відліків можна представити як деяку частину вихідної нескінченної послідовності $x[n]$, видиму через прямокутне вікно $w[n]$, у формі добутку:

$$x_0[n] = x[n]w[n], \text{ де } w[n] = \begin{cases} 1, & 0 \le n \le N-1, \\ 0, & \textit{при інших } n. \end{cases}$$

При цьому вважаємо, що всі відліки, які лежать поза межами вікна дорівнюють нулю. ДПФ зваженої вікном послідовності, виражене через перетворення послідовності $x[n]$ і прямокутного вікна $w[n]$, дорівнює згортці цих перетворень. Слід зауважити, що для частотної області використовується згортка, як було показано вище, а для часової області використовується не згортка, а добуток. При використанні прямокутного вікна, бокові спектральні компоненти ДПФ вікна, що називаються розмиванням, будуть змінювати амплітуди сусідніх спектральних піків, призводячи до зміщення спектральних оцінок. Просочування призводить не лише до появи амплітудних похибок, але може також маскувати наявність слабих сигналів і ускладнювати їх виявлення.

Дискретне перетворення Фур'є зваженої вікном послідовності, виражене через перетворення послідовності $x(n)$ і прямокутного вікна $w[n]$, дорівнює згортці цих перетворень :

$$X(f) = X(f) * D_N(f), \tag{1}$$

де $D_N(f) = T\exp(-j2\pi f TN)\dfrac{\sin[N\pi f T]}{\sin[\pi f T]}$ – ядро Діріхле.

Слід зауважити, що для частотної області використовується вираз (1), а для часової області використовується не згортка, а добуток.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики віконних функій

	Назва вікна	Дискретно-часова функція $w(n)$, $n = 0 \ldots N-1$	Частотна характеристика $W(f)$ $f_k = 0,1,\ldots N/2$, $D_N(f) = T\exp(-j2\pi f TN)\dfrac{\sin[N\pi f T]}{\sin[\pi f T]}$
1	Прямокутне	$w(n) = 1$	$D_N(f)$
2	Трикутне (вікно Бартлетта)	$w(n) = 1 - \left\lvert \dfrac{n}{A} - 1 \right\rvert, \quad A = \dfrac{N-1}{2}$	$\dfrac{2}{N} \cdot D_N^2\left(f/2\right)$
3	Вікно Ханна	$w(n) = 0.5 - 0.5\cos\left(\dfrac{2 \cdot \pi \cdot n}{N-1}\right)$	$0.5D_N(f) + 0.25 \times (D_N(f - 1/NT) + D_N(f + 1/NT))$
4	Вікно Хеммінга	$w(n) = 0.54 - 0.46 \cdot \cos\left(\dfrac{2 \cdot \pi \cdot n}{N-1}\right)$	$0.54D_N(f) + 0.23 \times (D_N(f - 1/NT) + D_N(f + 1/NT))$
5	Вікно Наттолла	$w(n) = a_0 - a_1 \cdot \cos\left(\dfrac{2 \cdot \pi \cdot n}{N-1}\right) +$ $+ a_2 \cdot \cos\left(\dfrac{4 \cdot \pi \cdot n}{N-1}\right) - a_3 \cdot \cos\left(\dfrac{6 \cdot \pi \cdot n}{N-1}\right),$ $a_0 = 0.355768, \quad a_1 = 0.487396,$ $a_2 = 0.144232, \quad a_3 = 0.012604$	$\sum_{x=0}^{3} 0.5a_x \times (D_N(f - r/NT) + D_N(f + r/NT))$
6	Вікно Хеннинга	$w(n) = 0,5 + 0,5\cos\left[\dfrac{2n}{N}\pi\right]$	$0,5D_N(f) + 0,25\left[D_N\left(f - \dfrac{1}{NT}\right) + D_N\left(f + \dfrac{1}{NT}\right)\right]$

Запропоновано ряд інших функцій вікна, що мають менший рівень бічних спектральних компонент, ніж у випадку прямокутного вікна. У таблиці 1 наведені визначення та порівняльні характеристики деяких використовуваних N-точкових функцій вікна, симетричних відносно n=0. Саме такі вікна використовуються в якості часових вікон для оцінки кореляційної функції сигналів.

На точність виміру амплітуди спектральної складової впливає не лише спектр широкосмугового сигналу, але і вузько смугові завади, якщо вони потрапляють під смугу пропускання вікна. Дійсно, деяка спектральна компонента з частотою $f = f_0$, буде вносити вклад в спектральну компоненту з частотою $f = f_\alpha$, тобто буде спостерігатися на цій частоті. Цей вклад буде визначатися підсиленням вікна з центром в f_0 на частоті f_α. Це і є ефект, який називається просоченням спектральних складових.

Просочування приводить до зміщення оцінок амплітуд і положень гармонічних складових сигналу. Навіть для єдиної дійсної гармоники (не співпадаючої з частотою гармоники ДПФ) просочення від ядра на осі відємних частот впливає на ядро на осі додатніх частот. Для зменшення негативних наслідків через спектральне просочення амплітуда бокових спектральних складових на віддалі від головного центрального пелюстка частотої характеристики вікна повинна бути малою, а згасання інтенсивності – дуже швидким.

Використання вікон при спектральних вимірюваннях

Запропоновано ряд інших віконних функцій, що мають менший рівень бічних пелюсток їх спектра, ніж у випадку прямокутного вікна. Проте, це як правило досягається ціною розширення головної компоненти спектру вікна [5]. Отже, вікно має вибиратися з урахуванням компромісу між шириною головного спектрального відліку та зменшенням рівня бічних спектральних відліків. В табл. 2 наведенні практичні рекомендації, розроблені на основі значної кількості практичних робіт [1, 6, 7], щодо застосування віконних функцій.

Таблиця 2

Практичні рекомендації застосування віконних функцій

	Найменування вікна	Основні властивості при постановці задачі (за апріорною інформацією)
1	Прямокутне	Застосовується для аналізу перехідних (імпульсних) процесів, коли "просочування енергії" в бічні спектральні компоненти не має особливого значення або коли частота досліджуваного сигналу точно поєднана з середньою частотою вікна.
2	Ханна (Ханнінга)	Найбільш часто застосовуване вікно, являє собою найбільш оптимальний компроміс між роздільною здатністю за частотою і "енергією розмивання" в бічні спектральні відліки. Дуже часто застосовується для аналізу сигналу і дослідження частотних

		характеристик в широкому діапазоні частот.
3	Гауса	Одне з перших "вікон зважування" що отримали практичне застосування в аналізі сигналів. Особливістю цього вікна є максимальна енергія зосереджена в головній компоненті сигналу. Найкраще застосування - детектування (виділення основного) сигналу.
4	Кайзера-Бесселя	Максимально з усіх існуючих вікон пригнічує бічні спектральні відліки, маючи при цьому прийнятну ширину основної компоненти сигналу. Має класичне застосування в спектральному аналізі сигналів. Найкращим чином підходить для поділу 2-х близько розташованих спектральних піків, що мають велику різницю в рівнях (широкий динамічний діапазон вимірювань).
5	Дольфа-Чебишева	Широко використовуються в різних практичних додатках і мають безсумнівний теоретичний інтерес. Теоретичний інтерес до даної віконної функції обумовлений тим, що її форма, а значить і форма її спектральної щільності, обумовлена видом основної компоненти сигналу і рівнем бічних спектральних відліків, варіюються одним параметром, що дозволяє досить легко зв'язати її з похибкою оцінки частоти.
6	Блекмана-Харріса	Вікно, яке має повну збіжність (загасання бічних спектральних відліків) в 3-му або 4-му порядку. Дозволяє дуже швидко розраховувати спектральні оцінки сигналів, що особливо важливо при досліджені вібраційних сигналів.
7	Експоненційне	Забезпечує різну ступінь "демфірування" сигналу-відгуку при випробуваннях за допомогою імпульсного (ударного) впливу.

Висновки

Класичні методи спектрального оцінювання відносяться до числа найбільш стійких методів спектрального оцінювання, вони застосовні майже до всіх класів сигналів та шумів, що мають стаціонарні властивості. Основна проблема класичних методів спектрального оцінювання обумовлена спотворюючим впливом розмиванням спектральних відліків. Обробка за допомогою вікна дозволяє послабити їх вплив, але в кожному окремому випадку необхідно вибирати оптимальну віконну функцію, виходячи з апріорних умов.

1. *Давыдочкин В.М., Давыдочкина СВ*. Синтез весовых функций для спектрального анализа сигналов // Материалы международной научной конференции "Информационные технологии в современном мире" – Ч. 3. – Таганрог – 2006. – С. 29-33.
2. *Марпл-мл. С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. – 584 с.

3. *Хэррис Ф. Дж.* Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье.// ТИИЭР: 1978. – Т. 66. – №1. – С. 60-96.
4. *Рабинер Л., Гоулд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов.- М.: Мир, 1978. – 523 с.
5. *Хемминг Р.В.* Цифровые фильтры: Пер. с англ./ под ред. А.Хойнен. Измерение матрицы рассеяния цели // ТИИЭР: 1965. – Т. 53. – № 8. – С. 1074-1076.
6. *Шахтарин Б.И., Ковригин В.А.* Методы спектрального оценивания случайных процессов. М.: Гелиос АРВ, 2005. – 248 с.
7. *Chengge Z., Yeshu Y., Xinchao Z., Xin W.* A method for target estimation of level radar // International conference of radar proceedings. ICR'96. – Beijing. China. – 1996. – P.270-273.

Поступила 17.02.2014р.

УДК 004.056.5

Т. Л. Щербак, г. Киев

ЗАДАЧИ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Рассмотрены задачи комплекса средств защиты технологических процессов, которые на ряду с классическими задачами защиты аппаратно-программных ресурсов процесса объединены в единую последовательность задач защиты и инженерно-технических ресурсов процесса, включая задачи охранной и пожарной безопасности.

Введение. Широкое использование современных информационных технологий в науке, технике, отраслях промышленности и областях производства является известным фактом. В каждом конкретном случае такое использование имеет свою специфику и характерные особенности. В полной мере это относится и к технологическим процессам. Если рассматривать предметные области проведения таких процессов, то они практически охватывают весь диапазон промышленного и других видов производства, а сами процессы разнообразны и разноплановы. В настоящее время технологические процессы реализуются на базе использования широкого ассортимента изготавливаемых промышленностью аппаратно-программных средств. Возникает актуальная научно-техническая проблема защиты технологических процессов, в первую очередь, аппаратных и информационных ресурсов для обеспечения эффективного их проведения. На сегодня это стало, по сути, аксиомой, поскольку введение в мире рыночной экономики существенно реформировало социально-экономические отношения между производителями и странами, способствовало созданию конкурентных

 © Т. Л. Щербак