

Д. Ю. АКАТЬЕВ, А. Н. КОСТЮНИН
(Горький)

ЦИФРОВОЙ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗАТОР ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА

Введение. Цифровые методы спектрального анализа (СА) такие, как рекурсивная цифровая фильтрация и методы с использованием быстрого преобразования Фурье, находят широкое применение в специализированных приборах (спектроанализаторах), в автономных системах сбора и обработки данных и в измерительно-вычислительных комплексах [1, 2]. При решении разнообразных прикладных задач предпочтение все чаще отдают нетрадиционным или нелинейным методам СА [3]. Одним из наиболее перспективных методов этого класса является недавно разработанный [4] метод минимакса энтропии (ММЭ). Сохраняя общее для нелинейных методов свойство сверхразрешения [3], ММЭ характеризуется дополнительным выигрышем в скорости сходимости и помехозащищенности. Это показано на ряде примеров из практики спектрального анализа путем математического моделирования ММЭ на ЭВМ [4, 5]. В подтверждение и развитие выводов теоретического анализа ниже приводятся результаты экспериментального исследования цифрового экспресс-анализатора, в котором ММЭ впервые был практически реализован.

Математическая формулировка ММЭ. В соответствии с общей формулировкой ММЭ [4, 5] оценка энергетического спектра случайного временного ряда $\{x(t), t=1, 2, \dots, T\}$ по выборке объема $T > 1$ находится из выражения

$$G_{\text{ММЭ}}^{(T)}(f) = 1 \left/ \left[\sum_{m=0}^M \lambda_m^{(T)} K_m^{2(T)}(f) \right] \right., \quad (1)$$

где $K_m^{2(T)}(f)$ — амплитудно-частотная характеристика декоррелятора m -го порядка, адаптированного под наблюдаемый процесс на интервале анализа $[1; T]$; $\{\lambda_m^{(T)}\}$ — совокупность весовых коэффициентов, определяемых корнями системы уравнений

$$\int_0^F K_m^{2(T)}(f) \left[\sum_{i=0}^M \lambda_i^{(T)} K_i^{2(T)}(f) \right] df = \sigma_m^2(T),$$

$$m = \overline{0, M},$$

в функции дисперсий откликов набора используемых декорреляторов в заданной полосе анализа $[0, F]$. В общем случае решение системы уравнений может быть получено по схеме последовательных приближений

$$\lambda_m^{(T)}(l+1) = \lambda_m^{(T)}(l) + \gamma \left\{ 2 \int_0^F K_m^{2(T)}(f) \left[\sum_{i=0}^M \lambda_i^{(T)}(l) K_i^{2(T)}(f) \right]^{-1} df - \sigma_m^2(T) \right\}, \quad (2)$$

$$l = 0, 1, \dots, L,$$

с инициализацией $\lambda_m^{(T)}(0) = F / [\sigma_m^2(T)(M+1)]$, $m = \overline{0, M}$, при заданном шаге $\gamma > 0$ [4]. ММЭ в формулировке (1), (2) охватывает как частный случай классический метод фильтрового СА на заданном наборе частот f_m , $m = \overline{1, M}$ [2]. При использовании набора полосовых расстроенных по частоте фильтров с резонансными частотами $f_m \in [0; F]$, $m = \overline{1, M}$, на основании очевидного из (2) равенства $\lambda_m = \Delta f / \sigma_m^2$, где Δf — полоса пропускания каждого канала, и (1) приходим к известной расчетной

формуле

$$G(f_m) = \sigma_m^2 / (\Delta f k_m^2).$$

Здесь k_m — коэффициент усиления m -го канала.

Таким образом, ММЭ можно рассматривать как обобщение традиционного фильтрового метода на случай адаптивной обработки. Не сомневаясь в целесообразности такого обобщения, нельзя обойти вопрос о различиях в сложности реализации исследуемого адаптивного и известных методов спектрального анализа. Закономерно в этой связи возникает задача поиска наиболее экономного варианта реализации ММЭ.

Цифровая реализация ММЭ. Совокупность выражений (1), (2) на множестве различных алгоритмов настройки используемого набора декорреляторов несовпадающих порядков $m = 1, 2, \dots, M$ определяет множество модификаций оценки ММЭ, отличающихся как эффективностью, так и сложностью реализаций. По-видимому, наибольший для практики интерес при одновременном учете технических и эксплуатационных показателей представляет собой реализация декорреляторов на базе адаптивного решетчатого фильтра (АРФ) M -го порядка. Его динамика в дискретном времени $t = 1, 2, \dots, T$ описывается системой рекуррентных выражений [6]

$$\left. \begin{aligned} x_m(t) &= x_{m-1}(t) + \rho_m(t-1) y_{m-1}(t-1), \\ y_m(t) &= y_{m-1}(t-1) + \rho_m(t-1) x_{m-1}(t), \\ \rho_m(t) &= \rho_m(t-1) - \gamma_1 x_m(t) y_{m-1}(t-1) / \sigma_m^2(t), \\ \sigma_m^2(t) &= \gamma_2 \sigma_m^2(t-1) + 0,5 [x_m^2(t) + y_m^2(t-1)] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

с инициализацией $\sigma_m^2(0) = 0$; $\rho_m(0) = 0$; $m = 0, \overline{M}$; $x_0(t) = y_0(t) = x(t)$ ($\gamma_1, \gamma_2 = \text{const}$). При этом вектор коэффициентов отражения $\rho_m(t)$, $m = \overline{1, M}$, АРФ M -го порядка, отнесенный к моменту отсчета $t = T$, одновременно определяет весь требуемый в (1) набор частотных характеристик:

$$\left. \begin{aligned} K_m^{(T)}(f) &= \left| \sum_{k=0}^m a_{m,k}^{(T)} \exp(-j2\pi k f \tau) \right|, \\ a_{m,k}^{(T)} &= a_{m-1,k}^{(T)} + \rho_m(T) a_{m-1,m-k}^{(T)}, \\ a_{m,0}^{(T)} &\equiv 1, \quad m = \overline{0, M}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь $\tau = 0,5/F$ — период взятия отсчетов из анализируемого процесса. Выражения (3), (4) в совокупности с (1), (2) определяют адаптивный алгоритм спектрального анализа, отвечающий информационному критерию ММЭ. Прямой подсчет затрат на вычисления (3) внутри одного интервала дискретизации дает $N_\tau = 9M$ операций умножения-деления или $9MT$ элементарных операций на всем интервале анализа. Добавляя к ним $(M^2 + 18MN + 19N + 3MNL)$ операций на реализацию выражений (1), (2) и (4), где N — число дискретов внутри частотного диапазона, L — количество итераций, будем иметь $(M^2 + 18MN + 19N + 9MT + 3MNL)$ элементарных операций для ММЭ в целом.

Требования к объему оперативной памяти системы обработки должны учитывать объем основной программы вычислений V_0 16-разрядных двоичных слов, объем массива используемых частотных характеристик $(M+1)N$ слов и, наконец, объем массива импульсных характеристик (коэффициентов АРФ) $(M+1)^2$ слов. В итоге необходимый объем памяти составляет $(M+1)(M+N+1) + V_0$ 16-разрядных слов или порядка 10 000 слов при $M \leq 10$, $N \leq 100$ и реализации программы вычислений на алгоритмическом языке Фортран-IV ($V_0 = 8$ Кслов, $K = 1024$).

Полученные оценки могут служить обоснованием для выбора необходимых вычислительных средств. Если исходить из требования к полосе спектрального анализа F , то для обеспечения режима вычислений в

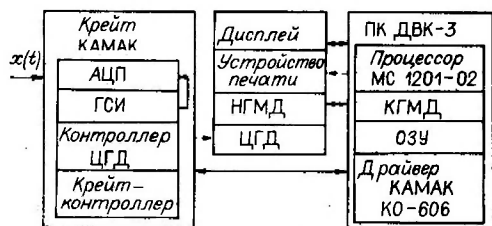


Рис. 1. Структурная схема анализатора спектра

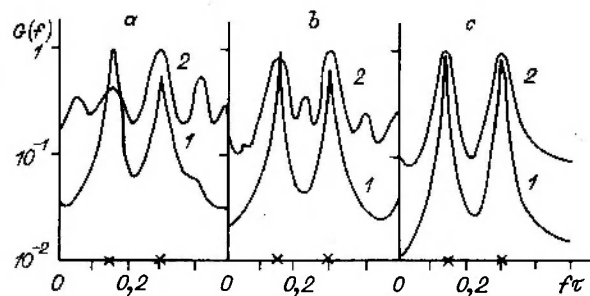
реальном времени быстродействие процессора при выполнении одной элементарной операции должно отвечать ограничению на длительность такта $\tau \leq 0,5/(N_1 F) = 0,5/(9MF)$. При реальных значениях $N \leq T \leq 100$, $M \leq 10$ длительность такта τ на 30% больше по сравнению с традиционными методами СА на основе БПФ (корреляционный метод, метод модифицированных периодограмм), требующими выполнения $2T \log_2 T$ элементарных операций на интервале T [2]. Если не связывать жестко работу процессора с режимом реального времени, тогда единственно существенным будет ограничение на объем оперативной памяти $V_n \geq 2[(M+1)(M+N+1) + V_0 + T]$ байт. Здесь дополнительные T 16-разрядных ячеек памяти используются для буферного накопления выборок наблюдений. Поскольку требования к объему памяти почти всегда обеспечиваются технически проще, чем требования к быстродействию процессора, режим вычислений с буферизацией данных и был выбран в дальнейшем для аппаратной реализации (рис. 1). При этом использовался серийно выпускаемый промышленностью персональный компьютер (ПК) типа ДВК-3, имеющий в своем составе центральный процессор МС 1201-02, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) на 28 К 16-разрядных двоичных слов, контроллер накопителя на гибких магнитных дисках (КГМД) с накопителем (НГМД), дисплей, устройство печати и драйвер крейта КАМАК КО-606. Для сопряжения ПК с источниками сигналов и цветным графическим дисплеем (ЦГД) применялся крейт КАМАК в следующем составе: крейт-контроллер КАМАК, контроллер ЦГД, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), генератор синхроимпульсов (ГСИ).

Результаты экспериментального исследования. С применением разработанного экспресс-анализатора энергетического спектра (см. рис. 1) было проведено экспериментальное исследование сравнительной эффективности ММЭ и традиционных методов на основе БПФ [1] в диапазоне частот $F = 1$ кГц при заданном порядке АРФ $M = 10$. В роли анализируемого использовался случайный процесс, образованный смесью одного, двух или трех гармонических сигналов переменной амплитуды A и белого гауссова шума средней мощности $\sigma_{ш}^2$. В процессе эксперимента варьировались отношение сигнал/шум $\beta^2 = 0,5A^2/\sigma_{ш}^2$ и длина выборки T . Цель эксперимента — изучение качественных различий в исследуемых спектральных оценках.

Из традиционных методов СА наиболее приемлемые оценки получены корреляционным методом (КМ) (метод Блэкмана — Тьюки) с прямоугольным окном. На рис. 2, а — с показан ряд типичных реализаций оценок ММЭ (кривые 1) и КМ (кривые 2) при наблюдении шума в смеси с двумя гармоническими сигналами (частоты гармонических сигналов помечены на оси абсцисс звездочками). В первом случае варьировался интервал наблюдения T и фиксировался параметр $\beta^2 = 0$ дБ (см. рис. 2, а, б), во втором — изменялись оба параметра β^2 и T (см. рис. 2, в). Видно, что характерной особенностью оценки КМ является устойчивый эффект изрезанности спектра, появление ложных максимумов, иногда превышающих истинные максимумы (см. рис. 2, а). Оценка ММЭ практически лишена этого недостатка. Кроме того, ширина спектральных пиков в оценке ММЭ всегда меньше, чем для оценки КМ. Как результат, точность и разрешающая способность оценки ММЭ оказываются значительно выше. Указанные различия в оценках возрастают при уменьшении β^2 и T . Увеличение числа гармонических сигналов сопровождается дополнительным выигрышем в точности оценки ММЭ по отношению к оценке КМ.

Рис. 2. Оценки энергетического спектра:

a — при объеме выборки $T = 25$, отношении сигнал/шум $\beta^2 = 0$ дБ;
 b — $T = 50$, $\beta^2 = 0$ дБ; c — $T = 50$, $\beta^2 = 10$ дБ



На завершающем этапе экспериментального исследования были получены численные оценки разрешающей способности ММЭ. Показано, что два гармонических сигнала в смеси с шумом при $\beta^2 = 0$ дБ и $T = 25$ надежно (в пяти, как минимум, реализациях из десяти) разрешаются спектральным анализатором (см. рис. 1), если их частотный сдвиг $\Delta F \geq F/10$. Это примерно в 3,7 раза лучше, чем разрешающая способность в рассматриваемых условиях традиционных методов спектрального анализа.

Заключение. Результаты проведенного исследования дают наглядное представление о преимуществах ММЭ в точности, скорости сходимости и помехозащищенности перед одним из наиболее широко используемых методов спектрального анализа на основе БПФ. Кроме того, важное для практики значение имеет проведенный детальный анализ вычислительных затрат на реализацию ММЭ. Впервые разработанный по результатам такого исследования цифровой анализатор энергетического спектра отличают высокие технические и эксплуатационные показатели.

Использование высокопроизводительных персональных компьютеров типа IBM PC с сопроцессорами и распараллеливание вычислений позволят повысить скорость ввода данных для обработки в реальном времени до 100—200 кГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забияка Д. Н., Предтеченский А. А., Черных А. И. Анализатор спектра на микроЭВМ «Электроника-60» // Автометрия.— 1988.— № 6.
2. Рабинер Л., Голд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов.— М.: Мир, 1978.
3. Цыпкин Я. З. Оптимальные рекуррентные методы спектрального оценивания: Обзор и новые результаты // АиТ.— 1985.— № 5.
4. Савченко В. В. Рекуррентный метод параллельного спектрального анализа // АиТ.— 1988.— № 10.
5. Савченко В. В., Акатьев Д. Ю. Спектральное оценивание вибрационных процессов по методу минимакса энтропии // Тез. докл. Всесоюз. конф. «Волновые и вибрационные процессы в машиностроении».— Горький: ГФИНМАШ АН СССР, 1989.
6. Фридландер Б. Решетчатые фильтры для адаптивной обработки данных // ТИИЭР.— 1982.— 70, № 8.

Поступила в редакцию 26 марта 1990 г.