аппроксимировать законы распределения оценок КФ рядом Эджворта и нормальным законом. Выполненные численные исследования показали, что для квантилей x_p распределения оценки КФ возможна аппроксимация с точностью до (5—10)% квантилями ряда Эджворта при $T \geqslant \geqslant (5 \div 6)\tau_k$ и $p \in [0{,}05;\ 0{,}95]$. При тех же уровнях p и той же точности аппроксимация нормальным законом возможна в случае $T \geqslant 30\tau_k$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Волгин В. В., Саков И. А.** Построение доверительных интервалов на корреляционные функции, рассчитанные по экспериментальным данным.— Автометрия, 1974, № 2.
2. **Кутин Б. Н.** О вычислении корреляционной функции стационарного случайного процесса по экспериментальным данным.— Автоматика и телемеханика, 1957, т. XVIII, № 3.
3. **Виленкин С. Я.** Статистическая обработка результатов исследования случайных функций. М.: Энергия, 1979.
4. **Бартлетт М. С.** Введение в теорию случайных процессов. М.: ИЛ, 1958.
5. **Золотарев В. М.** Об одной вероятностной задаче.— Теория вероятностей и ее применение, 1961, т. 6, № 2.
6. **Натансон И. П.** Конструктивная теория функций. М.— Л.: Наука, 1949.
7. **Андерсон Т.** Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976.
8. **Палагин Ю. И., Шалыгин А. С.** Измерение характеристик случайных процессов на основе эффективных оценок.— Автоматика и вычислительная техника, 1977, № 5.

Поступила в редакцию 19 июня 1980 г.

УДК 681.323

В. А. ПРЯНИШНИКОВ, М. Б. СТОЛБОВ, В. И. ЯКИМЕНКО

(Ленинград)

ЦИФРОВОЙ АНАЛИЗАТОР С АДАПТИВНОЙ ПРОЦЕДУРОЙ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРА

Современные эксперименты характеризуются непрерывным увеличением сложности и требуемой точности при обработке потоков измерительной информации, что приводит к необходимости измерения все большего количества характеристик случайных сигналов в условиях априорной неопределенности не только в отношении параметров сигнала, но и его класса. При известных ограничениях на объем памяти запоминающих и быстродействие арифметических устройств такая задача требует проведения эксперимента с итеративно изменяемыми параметрами алгоритма или введения адаптации в процедуру измерения.

Современный уровень развития теории адаптивного оценивания параметров сигнала дает возможность решать широкий круг прикладных задач [1, 2], однако формализованный характер решений затрудняет их непосредственную инженерную интерпретацию для задач других типов, в том числе для измерений конкретных вероятностных характеристик.

В экспериментальных исследованиях важное значение имеет спектральный анализ случайных процессов. В отличие от адаптивных методов измерения корреляционных функций и законов распределения вероятностей, исследованных в последние 10—15 лет, адаптивное измерение спектров сигналов начало интенсивно развиваться только в последние годы. Рассмотрим один из характерных подходов, используемых при построении адаптивных анализаторов случайных процессов.

Одной из актуальных задач адаптивного спектрального анализа является оптимальный выбор ординат спектра, аппроксимирующих оцениваемую функцию с погрешностью, не превышающей допустимую.

Измерение спектра $S(\omega)$ сигнала часто проводят, осуществляя непосредственное преобразование входного сигнала $x(t)$ по одной из модификаций дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

Пусть оценку спектра $\widehat{S}^n(\omega)$ на n-м такте получают на основе процедуры ДПФ в соответствии с выражением

$$\widehat{S}^n(\omega)=\widehat{S}^{n-1}(\omega)+\gamma[|\widehat{A}^n(\omega)|^2-\widehat{S}^{n-1}(\omega)], \tag{1}$$

$$\widehat{A}^n(\omega)=\mathbf{W}(\omega)^{\tau}\mathbf{X}^n, \tag{2}$$

где $\widehat{A}(\omega)$ — «периодограммоценка» спектра; γ — коэффициент экспоненциального сглаживания; $\mathbf{W}(\varphi)$ — вектор весовых коэффициентов размерностью N, например, $\mathbf{W}(\omega)=[1,\ e^{j\lambda},\ e^{j2\lambda},\ \ldots,\ e^{j(N-1)\lambda}]^{\tau}$; $\lambda=\Delta t\omega$; $\mathbf{X}^n$ — вектор размерностью N отсчетов сигнала $x(t)$ с шагом дискретизации $\Delta t:\mathbf{X}^n=[x(n\Delta t),\ x((n+1)\Delta t),\ \ldots,\ x((n+N)\Delta t)]^{\tau}$; τ — знак транспонирования.

Процедура измерения спектра в условиях однозначного априорного выбора ординат ω_k в процедуре ДПФ или в условиях априорной неопределенности относительно характера спектра при параллельной фильтрации может оказаться неэффективной, поскольку нерационально выбранные частоты анализа при заданном диапазоне частот и равномерном шаге между ординатами не позволят обеспечить заданную максимально допустимую погрешность измерений на участках существенной неравномерности спектра и окажутся избыточными для «гладких» участков.

Оптимизация выбора частот анализа в пределах заданного диапазона может быть осуществлена по адаптивной процедуре и реализована в адаптивном анализаторе с автоматически перестраиваемыми частотами анализа ω_k.

Обозначим через ω_k^n адаптивно настраиваемые частоты ω_k на n-м такте оценивания. Пусть $\omega_k^0=k\Delta\omega$ ($\Delta\omega$ — минимальный шаг анализа по частоте). Значения частот на $(n+1)$-м такте определяются по формуле

$$\omega_k^{n+1}=\omega_k^n+\Theta_k^{n+1}\Delta\omega,$$

Θ_k^{n+1} — значение переключающей функции, задающей направление текущей корректировки k-й ординаты спектра. При этом выполняется условие

$$\Theta_k^{n+1}=\begin{cases}+1 & \text{при} \quad \Delta S_k^n<\sigma_{\text{м}},\\ \ \ 0 & \text{при} \quad \delta_{\text{м}}\leqslant\Delta S_k^n\leqslant\delta,\\ -1 & \text{при} \quad \Delta S_k^n>\delta,\end{cases} \tag{3}$$

где $\Delta S_k^n=|\widehat{S}^n(\omega_k)-\widehat{S}^n(\omega_{k-1})|$ — текущая погрешность кусочно-ступенчатого восстановления спектра; $\delta_{\text{м}}$ — минимально необходимая (для устойчивости процедуры адаптации) погрешность восстановления спектра; δ — максимально допустимая величина погрешности восстановления.

В результате такой адаптивной процедуры получаем дискретную оценку спектра с неравномерным шагом дискретизации по аргументу, причем ординаты наиболее сконцентрированы на участках резко выраженных «пиков», что соответствует сжатию результатов измерений [3].

Минимизация количества ординат спектра N при заданной погрешности δ осуществляется в предложенной авторами новой структуре цифрового анализатора спектра с адаптивной процедурой измерения [4].

Структура адаптивного процессора, построенного на базе традиционного цифрового анализатора спектра и реализующего описанную адаптивную процедуру, показана на рис. 1.

Исследуемый сигнал по командам от преобразователя кода (ПК) переводится аналого-цифровым преобразователем (АЦП) в последовательность кодов $x(n\Delta t)$, которая подается на умножитель (Умн). Синхронно на второй вход Умн подаются выборки базисных функций от генератора базисных функций (ГБФ). После квадрирования результаты перемножений усредняются в усреднителе ординат (Уср1) и по командам от блока управления (БУ) циркулируют в кольце «Уср1 — ЗУ$_s$», вследствие чего в соответствующих ячейках запоминающего устройства ЗУ$_s$ накапливаются оценки ординат спектра $\widehat{S}(\omega_k)$.

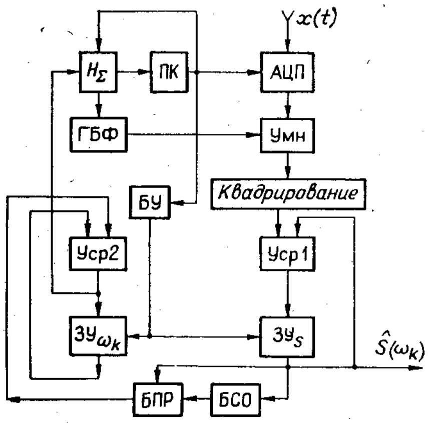

Рис. 1.

Полученные оценки спектра в процессе обработки каждой очередной n-й выборки сигнала поступают в блок сравнения ординат (БСО) и в блок принятия решений (БПР). В БСО формируются значения спектра в соответствии с формулой (1) и абсолютное значение погрешности восстановления

$$\delta = \delta_0 \left| \max_k \widehat{S}(\omega_k) \right|,$$

где δ_0 — относительная погрешность восстановления.

При этом в БСО образуются также разности уровней каждых двух соседних ординат $\Delta\widehat{S}_k^n$, которые в БПР сравниваются с величинами δ и $\delta_м$ в соответствии с выражением (3). В результате сравнения на выходе БПР формируется корректирующий сигнал для изменения величины аргумента ω_k сравниваемых ординат. Это изменение осуществляется в течение $m = \overline{1, \mathscr{L}}$ тактов корректировки аргумента до того момента, при котором выполняется соотношение

$$\delta_м \leqslant \Delta\widehat{S}_k^n \leqslant \delta. \qquad (4)$$

В течение этих тактов для каждой из N ординат спектра в усреднителе Уср2 изменяется содержимое (добавляется ± 1 или 0), которое поступает в запоминающее устройство ЗУ$_{\omega_k}$ и в накапливающий сумматор (H_Σ), формирующий полное значение аргумента и задающий новые интервалы Δt опроса ГБФ и АЦП.

В процессе измерений оценки спектра происходит адаптивное регулирование приращений аргумента $\Delta\omega_k$ между соседними ординатами спектра, что эквивалентно «сжатию» определенных участков огибающей спектра в зависимости от ее крутизны. Благодаря такой процедуре, обеспечивается заданная допустимая погрешность аппроксимации каждого участка спектра.

В результате такого подхода при заданном количестве ячеек ЗУ$_s$ (ординат спектра) обеспечивается более широкий диапазон (в зависимости от класса входного сигнала) либо достигается более высокая скорость анализа при заданном частотном диапазоне.

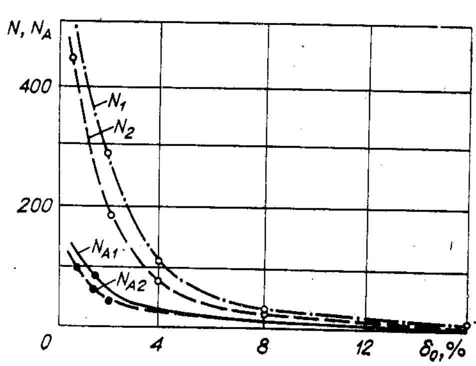

Рис. 2.

Эффективность процедуры видна из сравнения количества необходимых ординат N при неадаптивной и адаптивной процедурах для двух типов характерных спектров (рис. 2).

Пусть спектр первого типа описывается выражением $S(\omega) = Ce^{-\alpha\omega}$. Количество ординат при этом не зависит от величины C, так как $\delta_s = \delta\widehat{S}_{max} = \delta_0 C$. Поэтому при расчетах будем проводить нормирование по $\widehat{S}_{\max}$ и, не нарушая общности выводов, полагаем $C = 1$.

Так как максимально необходимое значение аргумента спектра зависит от характера уменьшения уровня спектра до величины δ_0, т. е. $\widehat{S}(\omega_{\max}) = \delta_0$, то для спектра первого типа $\omega_{\max} = (1/\alpha)\ln(1/\delta_0)$.

При неадаптивной процедуре выбор шага по аргументу производится исходя из следующих условий: $\delta_0 = \Delta\omega|S'(\omega)|_{\max}$ или $\Delta\omega = \delta_0/\alpha$. Тогда количество ординат спектра в диапазоне измерения $\Omega_{\max}$ можно найти из выражения

$$N \approx \int\limits_0^{\Omega_{\max}} \frac{d\omega}{\Delta\omega} = \frac{\alpha}{\delta_0} \int\limits_0^{(1/\alpha)\ln(1/\delta_0)} d\omega = \frac{1}{\delta_0}\ln\frac{1}{\delta_0}.$$

При адаптивном измерении спектра шаг аргумента зависит от скорости изменения огибающей спектра: $\Delta\omega_A \approx \delta_0/|S'(\omega)| = \delta_0/\alpha e^{-\alpha\omega}$. Отсюда следует, что при адаптивной процедуре количество ординат

$$N_A \approx \int\limits_0^{\Omega_{\max}} \frac{1}{\Delta\omega_A(\omega)}\, d\omega = \frac{\alpha}{\delta_0} \int\limits_0^{(1/\alpha)\ln(1/\delta_0)} \exp(-\alpha\omega)\, d\omega \approx 1/\delta_0. \qquad (6)$$

Следовательно, эффективность процедуры, характеризующаяся коэффициентом сжатия, определяется соотношением

$$K = N/N_A \approx \ln(1/\delta_0). \qquad (7)$$

Второй тип характерных огибающих спектра описывается выражением $S(\omega) = A/(B + (\omega - \omega_0)^2)$ или в нормированном виде $S(\omega) = \alpha/(\alpha + (\omega - 1)^2)$.

Результаты аналогичных расчетов для этого типа спектра при $\alpha = 0{,}005$ показаны на рис. 2 (графики N_2, N_{A2}), который иллюстрирует изменение необходимого количества ординат спектра (или соответствующих коэффициентов сжатия K), т. е. эффективность применения адаптации при измерении спектра.

Таким образом, рассмотренный адаптивный анализатор спектра автоматически в темпе эксперимента перераспределяет рабочие частоты анализа в соответствии с типом исследуемого сигнала, что аналогично перераспределению степеней свободы в адаптивных параметрических методах спектрального анализа [5]. Такая адаптивная процедура перераспределения позволяет в 2—10 раз повысить эффективность измерения спектра, т. е. расширить диапазон анализа или осуществить сжатие информации за счет исключения несущественных ординат оценки спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Цыпкин Я. З.** Обучающиеся системы. Элементы теории и применение.— В кн.: Измерение, контроль, автоматизация. Научно-техн. сб. Министерства приборостроения. М.: ЦНИИТЭИП, 1978, № 3 (15).
2. **Петров В. И.** Синтез самонастраивающихся цифровых систем в ортогональном базисе.— Изв. АН СССР. Сер. Техн. кибернетика, 1979, № 5.
3. **Прянишников В. А., Утин М. А.** Адаптивный коррелометр. (Автор. свид-во № 696478).— БИ, 1979, № 41.
4. **Прянишников В. А., Якименко В. И., Попенко Н. В.** Анализатор спектра случайных процессов. (Автор. свид-во № 838600).— БИ, 1981, № 23.
5. **Гейбриел У. Ф.** Спектральный анализ и методы сверхразрешения с использованием адаптивных решеток.— ТИИЭР, 1980, т. 68, № 6.

Поступила в редакцию 5 октября 1981 г.