УДК 681.3.08.8

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ФИЛЬТРОВЫХ МЕТОДОВ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

д.т.н., проф. В.Н. Чинков, В.А. Тищенко*

Изложены научные и прикладные рекомендации по совершенствованию фильтровых методов спектрального анализа, результаты моделирования на ЭВМ.

Фильтровые методы спектрального анализа по-прежнему привлекают внимание разработчиков аппаратуры спектрального анализа, особенно используемой в эксплуатационных условиях, из-за её простоты. Однако они требуют поиска новых, нетрадиционных направлений своего совершенствования. Как показывают результаты научных исследований авторов, достаточно перспективными являются следующие направления.

1. ***Использование обобщенной математической модели оптимальной оценки спектральной плотности мощности (СПМ)***, описываемой выражением [1]

$$\hat{G}(\omega_0, \Delta\omega) \equiv \hat{G} = \int_0^T H(\tau)\,\hat{R}(\tau)\,d\tau\,,$$

где $H(\tau)$ – преобразующая функция; $\omega_0, \Delta\omega$ - центральная частота анализа и полоса усреднения; T – время анализа; $\hat{R}(\tau)$ - оптимальная оценка корреляционной функции исследуемого сигнала $x(t)$, которая по критерию максимума функции правдоподобия $W[\{x(t)\}/\{R(\tau)\}]$ определяется формулой

$$\hat{R}(\tau) = \frac{1}{T-\tau}\int_0^{T-\tau} x(t)x(t+\tau)\,d\tau\,.$$

Все известные классические методы аппаратурного спектрального анализа могут быть приведены к этой модели [1].

2. ***Применение предложенного авторами корреляционно - фильтрового метода измерения оценки СПМ*** [2]:

$$\hat{G}(\omega_0, \Delta\omega) = \int_0^T x(t)y(t)\,dt\,,$$

где $y(t)$ – фильтрованная реализация случайного сигнала $x(t)$.

Корреляционно-фильтровый метод относится к оптимальным, а по сравнению с методом непосредственной фильтрации обеспечивает более высокую точность спектрального анализа при более простой аппаратурной реализации.

3. ***Применение методов оптимизации функции спектрального окна (ФСО) узкополосных фильтров для спектрального анализа***: по критерию минимума среднеквадратической погрешности аппроксимации идеальной, прямоугольной, ФСО реальной функцией и по критерию минимума влияния боковых лепестков ФСО на погрешность измерения оценки СПМ [3].

Анализ оптимальных ФСО фильтров, $\Phi_1(\omega)$ и $\Phi_2(\omega)$, полученных для указанных критериев, показывает, что функция $\Phi_1(\omega)$ (рис.1) обеспечивает минимальную среднеквадратическую погрешность аппроксимации, но приводит к появлению осцилляций, как в полосе анализа, так и вне её. В то же время функция $\Phi_2(\omega)$ (рис.2) не имеет осцилляций, но при этом вдвое увеличивается относительная среднеквадратическая погрешность аппроксимации.

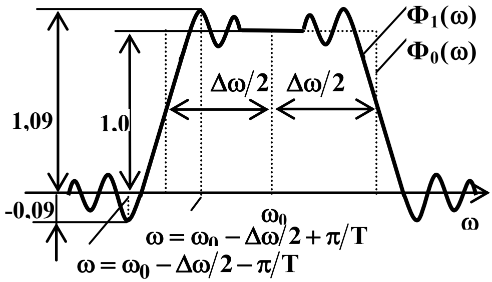

Рис.1. График функции спектрального окна $\Phi_1(\omega)$

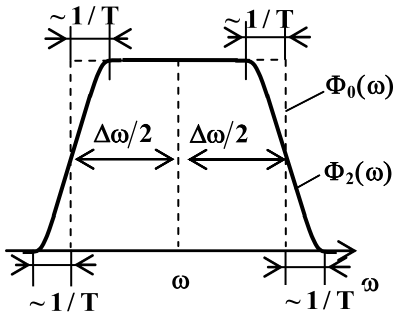

Рис. 2. График функции спектрального окна $\Phi_2(\omega)$

4. ***Формирование ФСО узкополосных фильтров с помощью так называемых динамических (нестационарных, перестраиваемых) фильтров***, характеристики которых (центральная частота, коэффициент затухания, коэффициент передачи) перестраиваются в полосе анализа по определенным законам, обеспечивающим минимальную погрешность аппроксимации ФСО. Для решения задачи оптимизации параметров динамических фильтров разработаны методические основы, которые включают соотношения для статистических характеристик оценок СПМ (математическое ожидание и дисперсия), и полученные на их основе выражения для ФСО и относительной дисперсии для каждой из оценок СПМ, измеренных корреляционно - фильтровым методом и методом непосредственной фильтрации [4].

Приведем исходные соотношения для ФСО и относительной дисперсии оценки СПМ для корреляционно - фильтрового метода (в безразмерных величинах):

$$\Phi(\Omega) = \frac{1}{2}\int_{-1}^{1} \frac{\beta(x)\,c(x)}{(\Omega - x)^2 + \beta^2(x)}\,dx\,;$$

$$\delta\hat{G} = \frac{1}{T\Delta\omega}\int_{-1}^{1}\frac{c^2(x)\rho(x)}{\beta(x)}dx \bigg/ \left[\int_{-1}^{1}c(x)dx\right]^2,$$

где $\beta(x) = \dfrac{\alpha(t)}{\Delta\omega'}$; $c(x) = \dfrac{TB(t)}{\Delta\omega'\rho(x)}$; $\rho(x) = T dx/dt$; $\Omega = (\tilde{\omega} - \omega_0)/\Delta\omega'$; $\Delta\omega' = \Delta\omega/2$; $x(t)$ – функция, определяющая закон изменения частоты настройки динамического фильтра; $\tilde{\omega} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$; $\alpha(t)$ – функция перестройки коэффициента затухания α динамического фильтра; $B(t)$ – функция изменения коэффициента передачи фильтра.

Эти формулы являются исходными для оптимизации характеристик ДФВП $\alpha(t)$, $\tilde{\omega}(t)$ и $B(t)$. С их использованием решена задача оптимизации при условии, что коэффициент передачи ДФВП поддерживается постоянным, а его центральная частота изменяется по линейному закону. В качестве критерия оптимизации принята максимальная точность аппроксимации идеальной ФСО при заданной относительной дисперсии оценки СПМ $\delta\hat{G}$ в полосе анализа. Оптимальный закон перестройки безразмерного коэффициента затухания $\beta(x)$ имеет вид:

$$\beta(x) = \left(1 + 8\mu - x^2\right)\sqrt{\frac{\mu}{1 + 4\mu - x^2}}; \quad \mu = \beta_m \bigg/ 4\left[1 + 2\beta_m \big/ \sqrt{1+\beta_m^2}\right]^{1/2},$$

где β_m - максимальное значение безразмерного коэффициента затухания ДФВП. Оно связано с начальным значением β_0 равенством

$$\beta_0 = \beta_m\left\{1 + (2\beta_m)^{-1}\left[\left(2 + 3\beta_m^2\right)\sqrt{1+\beta_m^2} + 3\beta_m^2 + \frac{7}{2}\beta_m\right]^{-1}\right\}.$$

Разработаны методики синтеза параметров ДФВП для линейного (квазиоптимального) закона изменения коэффициента затухания и при постоянном коэффициенте затухания. В частности, получены выражения ФСО ДФВП:

- при линейном законе изменения $\beta(x)$

$$\Phi_л(\Omega) = \frac{1}{2\pi\left(1+q^2\right)}\left\{\operatorname{sign}(\beta_0 - q\Omega)\left[\operatorname{arctg}\frac{1 + q^2 - \Omega - q\beta_0}{|\beta_0 - q\Omega|} + \operatorname{arctg}\frac{\Omega + q\beta_0}{|\beta_0 - q\Omega|}\right] + \right.$$

$$\left. + \operatorname{arctg}\frac{1 + q^2 + \Omega - q\beta_0}{|\beta_0 + q\Omega|} + \operatorname{arctg}\frac{q\beta_0 - \Omega}{|\beta_0 + q\Omega|} - \frac{q}{2}\ln\frac{\left[(\Omega-1)^2 + (\beta_0 - q)^2\right]\left[(\Omega+1)^2 + (\beta_0 - q)^2\right]}{\left(\Omega^2 + \beta_0^2\right)}\right\};$$

- при постоянном коэффициенте затухания

$$\Phi_{п}(\Omega) = \frac{1}{2\pi}\left(\operatorname{arctg}\frac{1-\Omega}{\beta_0} + \operatorname{arctg}\frac{1+\Omega}{\beta_0}\right).$$

Проведено моделирование и исследование этих ФСО для различных параметров фильтра. В качестве примера на рис.3 приведены графики ФСО $\Phi_{л}(\Omega)$ и $\Phi_{п}(\Omega)$, а также ФСО стационарного фильтра для $\beta_0 = 0{,}05$

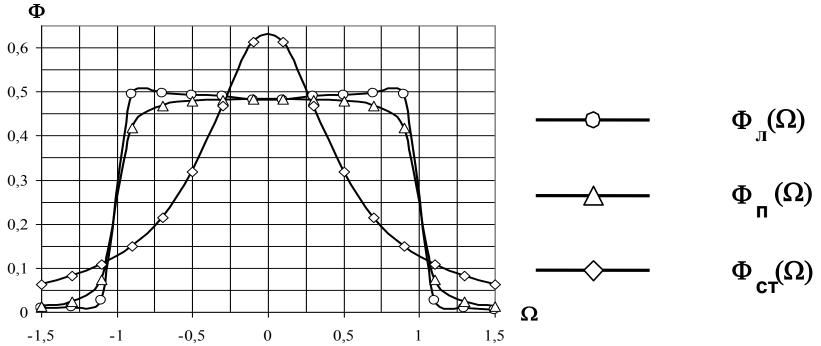

Рис.3. Функции спектрального окна фильтра второго порядка **Ф (Ω)**

при одной той же относительной дисперсии оценки СПМ. Эти графики наглядно иллюстрируют преимущества ДФВП по сравнению со стационарным фильтром. Исследование ФСО в функции β_0 показывает, что точность аппроксимации возрастает с уменьшением β_0.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тищенко В.А., Чинков В.Н. Приведение аппаратных методов оценки спектральной плотности мощности к обобщенной математической модели // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сб. научн. тр. Ч. 1. Вып.6. – Харьков: ХГПУ, 1998. – С. 446 - 451.

2. Чинков В.Н., Тищенко В.А., Харченко А.Л. Метод измерения спектральной плотности мощности случайных сигналов, основанный на усреднении произведения исходного сигнала и его фильтрованной реализации // Вестник ХГПУ. – 1998. – Вып.21. – С. 115 - 118.

3. Харченко А.Л., Чинков В.Н. Исходные соотношения для оптимального синтеза узкополосных нестационарных фильтров при спектральном анализе стационарных случайных сигналов методом перемножения // Вестник ХГПУ. – 1999. – Вып.24. – С. 52 - 57.

4. Тищенко В.А. Методика определения параметров нестационарных фильтров по требуемой точности измерения спектральной плотности мощности случайных сигналов // Вестник ХГПУ. – 1999. – Вып.24. – С. 46 - 51.