

Г. М. КЕСЕЛЬМАН, С. Е. САС

(Львов)

О СИГНАЛЕ, ПРОХОДЯЩЕМ ЧЕРЕЗ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОР БЕЗ ИСКАЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА

Постановка задачи. Изучению ошибки спектрального анализа в отдельно взятом фильтре за счет проникновения сигналов из одной полосы в другую посвящено много работ [1, 2]. Однако во многих случаях такой подход недостаточен. Если интерес представляет весь энергетический спектр, точнее доля каждой компоненты по отношению к другим, то не так важна индивидуальная ошибка, как то, насколько все индивидуальные ошибки исказили общую картину спектра.

При отсчете, снимаемом с квадратичного детектора, измеряемая величина пропорциональна суммарной энергии, проникающей через данный фильтр из всех полос анализа. При такой ситуации мы никогда не можем получить результат, в точности соответствующий входному сигналу. Вместе с тем существует сигнал, который проходит через спектроанализатор без искажения формы энергетического спектра.

Действительно, сигнал, поступающий на вход анализатора, можно представить вектором $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, компоненты которого x_k являются мощностями сигнала в соответствующей полосе Φ_k [3]. Мощность сигнала на i -м выходе (на выходе i -го фильтра) равна сумме мощностей сигналов, проникающих через i -й фильтр из разных полос:

$$y_i = \sum_k a_{ik} x_k.$$

Соответствие между входом (X) и выходом (Y) можно представить матрицей A [4]:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{n,n-1} & 1 \end{vmatrix}.$$

Элементы матрицы a_{ik} представляют прозрачность i -го фильтра для сигнала k -й полосы. Единицы по диагонали отражают предположение, что сигнал из i -й полосы полностью проходит через i -й фильтр. Предполагая наличие усиления, мы можем не заботиться о нормировке, требуемой законом сохранения энергии. Очевидно, что все $a_{ik} \geq 0$.

В силу теоремы Перрона для положительных матриц (см., например, [5], с. 355) матрица A имеет положительное характеристическое число λ , которое является простым корнем характеристического уравнения и модуль которого не меньше модулей всех других характеристических чисел. Ему соответствует собственный вектор X с положительными координатами $x_i > 0$ ($i=1, 2, \dots, n$). Этот собственный вектор физически реализуем. Другими словами, для каждого спектроанализатора можно подобрать такой сигнал, который, пройдя через спектроанализатор, сохранит свой энергетический спектр. Очевидно, что такой сигнал, с точностью до нормировки, является единственным.

Физическая интерпретация существования инвариантного энергетического спектра состоит в следующем: вклады в отсчет по данной полосе от остальных полос фильтра всегда только увеличивают результат (энергии суммируются); увеличение каждой компоненты таково, что отношение между ними не меняется.

На ЭВМ «Минск-32» были вычислены собственные векторы и собственные значения для нескольких вариантов спектроанализатора с симметричными характеристиками фильтров. Физически реализуемый собственный вектор спектроанализатора имеет большие значения плотностей в средней части полосы анализа и меньшие — по краям.

Форма инвариантного спектра определяется параметром подавления на одну полосу. Чем больше подавление, тем более крутая характеристика инвариантного спектра. Остальные собственные сигналы нельзя реализовать непосредственно, но они могут быть представлены как разности реальных сигналов. Знание собственных сигналов и собственных чисел анализатора дает возможность оценить качество анализа. Легко показать, что выходной сигнал анализатора можно представить как

$$Y = \lambda_{cp} X + \sum \Delta \lambda_k \alpha_k r_k (\Delta \lambda_k = \lambda_k - \lambda_{cp}),$$

где r_h , λ_h — собственные векторы и собственные значения матрицы; α_h — коэффициенты разложения X по системе r_h ; λ_{cp} — некоторое среднее значение λ .

Очевидно, что чем меньше разброс ($\lambda_h - \lambda_{cp}$), тем ближе форма выходного сигнала к форме входного, т. е. $\lambda_{min}/\lambda_{max}$ может служить мерой качества анализа, где λ_{min} и λ_{max} — соответственно минимальное и максимальное число матрицы.

Выводы

1. Для каждого полосового спектроанализатора существует такой сигнал, для которого отсчеты по выходам фильтров после квадратичного детектора повторяют форму входного энергетического спектра сигналов.

2. Разброс собственных значений может служить мерой качества анализа.

3. Полученный результат показывает, что вывод Сепмайера об уменьшении ошибки спектрального анализа с уменьшением наклона спектра справедлив только с точки зрения индивидуальной ошибки. С точки зрения передачи всего спектра как целого он оказывается неверным. Например, для спектров, форма которых подобна форме спектра, представляемого инвариантным вектором, ошибка будет уменьшаться, пока наклон спектра не станет равным наклону спектра, эквивалентного собственному вектору, после чего ошибка будет возрастать, хотя наклон спектра будет падать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sempeyer L. W. Bandwidth error symmetrical bandpass filters used for analysis of noise and vibration.— "IASA", 1962, vol. 14, N 10, p. 1653—1657.
2. Чайковский В. И. Оценка точности анализатора спектра фильтрующего типа.— «Радиотехника и электроника», 1974, № 1, с. 196.
3. Френкс Л. Теория сигналов. М., «Сов. радио», 1974.
4. Лабутин В. К., Молчанов Л. И. Модели механизмов слуха. М., «Энергия», 1973.
5. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М., «Наука», 1967.

Поступило в редакцию 16 октября 1974 г.

УДК 621.373.86.072.6

Г. В. ЕФИМОВ, Н. А. СЕМЕНОВСКАЯ, В. С. ТКАЧЕНКО,
Н. С. ФЕРТИК, А. В. ЧУПРАКОВ

(Харьков)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СИСТЕМАХ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРОВ

Для стабилизации частоты лазеров часто применяют системы автоматического регулирования, управляющим элементом в которых служит пьезоэлектрический преобразователь [1—3]. Расчет систем автоматической подстройки частоты (АПЧ) лазеров и, в частности, расчет устойчивости и оптимизации таких систем невозможен без знания комплексной передаточной функции управляющего элемента.

В литературе приведены аналитические выражения для передаточной функции пьезоэлектрического преобразователя [4], однако по нашим экспериментальным данным они не дают удовлетворительной аппроксимации характеристик применяемых нами цилиндрических пьезоэлектрических преобразователей из пьезокерамики ЦТС-19, так как не учитывают низкочастотных механических резонансов, которые присущи пьезоэлектрическим преобразователям любых конструкций, частоты которых лежат в диапазоне $1 \div 20$ кГц, т. е. в рабочей полосе АПЧ или вблизи нее.

Структурная схема установки для измерения амплитудно-частотных (АЧХ) и фазо-частотных (ФЧХ) характеристик управляющего элемента приведена на рис. 1.

Для удобства измерений в схеме применена узкополосная автоматическая система подстройки частоты излучения одного лазера к частоте другого. Если долговременная