

ременной составляющей сигнала нелинейного поглощения в результате слабой модуляции магнитного поля, налагаемого на ячейку с газом, с одновременным усреднением измеряемой величины сигнала. Для этого ячейка с газом размещается внутри соленоида 7 с известными параметрами, по которому пропускается эталонный постоянный ток, слабо промодулированный по амплитуде. Величина и направление постоянной составляющей эталонного тока устанавливаются такими, чтобы магнитное поле, создаваемое соленоидом, компенсировало измеряемое магнитное поле. Степень компенсации полей контролируется электронной системой 6 по величине первой гармоники сигнала модуляции выходного излучения лазера, имеющей в зависимости от результирующего магнитного поля B острую резонансную особенность с центром при $B = 0$. Значение измеряемой индукции определяется по величине эталонного тока соленоида как результат усреднения большого количества единичных измерений силы тока.

На рис. 2 представлен график зависимости амплитуды первой гармоники сигнала модуляции U (т. е. первой производной от функции, описывающей контур магнитооптических резонансов) от величины результирующего магнитного поля в метане. Видно, что сверхузкий резонанс, представленный частью кривой в окрестности $B = 0$, имеет полуширину примерно 2 мТ. Это обуславливает возможность привязки к центру сверхузкого резонанса с чувствительностью до $2 \cdot 10^{-7}$ Т. Измеренные с помощью этой установки значения магнитной индукции менялись в интервале 0—200 мТ.

Предложенный метод измерения индукции магнитных полей может найти применение в электронной промышленности и физическом эксперименте, в частности, в лазерной спектроскопии высокого разрешения, в ускорителях, плазменных ловушках и других объектах сильноточной электроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Ю. В., Студенцов Н. В., Хорев В. Н. и др. Средства измерения параметров магнитного поля.— Л.: Энергия, 1979.
2. Чечерников В. И. Магнитные измерения.— М.: Изд-во МГУ, 1969.
3. Жерновой А. И. Измерения магнитных полей методом нутации.— Л.: Энергия, 1979.
4. Бадалян А. М., Кобцев С. М., Ковалевский В. И. и др. Индуцирование узких нелинейных магнитооптических резонансов молекулярными столкновениями // Письма в ЖТФ.— 1983.— Т. 9, вып. 14.
5. Badalian A. M., Kovalevsky V. I., Rautian S. G. a. o. Nonlinear magneto-optical resonances induced by molecular collisions // Opt. Comm.— 1984.— V. 51, N 1.— P. 21.

Поступило в редакцию 21 октября 1986 г.

УДК 681.519.8

К. С. ПОЛУЛЯХ, А. А. РОМАНОВ, С. Н. ТЕРЕНТЬЕВ
(Харьков)

ОЦЕНИВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА МЕТОДАМИ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭНТРОПИИ

В автоматизированных системах научных исследований на базе мини- и микроЭВМ широкое применение находят методы спектрального анализа. Одним из распространенных является метод максимальной энтропии (ММЭ), позволяющий про-

водить обработку данных в реальном масштабе времени и получать хорошие результаты при большом отношении сигнал/шум. ММЭ применяют для анализа действительного синусоидального сигнала на фоне шума. Однако даже в отсутствие шума появляется ошибка, связанная с частотной оценкой Берга [1]. Обычно эта ошибка объясняется интерференцией между положительными и отрицательными составляющими спектра при обработке с помощью преобразований Фурье [2].

Для уменьшения указанной ошибки были разработаны окна, которые применялись совместно с модификацией алгоритма Берга, предложенной Андерсеном [3].

В [4] показано, что метод оптимального параболического взвешивания [5] позволяет получать наиболее эффективные оценки частоты при оценивании спектральной плотности мощности (СПМ) по сравнению с другими методами, в основу которых положен алгоритм Берга.

Методом наименьших квадратов с предсказанием вперед — назад (МНК) [6] также можно получать эффективные оценки частоты для синусоидального сигнала.

В данной работе по результатам моделирования проведен анализ вычислительной эффективности и эффективности оценок частоты, полученных с помощью МНК и методом оптимального параболического взвешивания (ОПВ) при обработке синусоидального сигнала в отсутствие шума. (Подробное описание МНК дано в [6] и из-за сложности в настоящем сообщении не приводится.)

Суть метода ОПВ заключается в расчете коэффициентов отражения фильтра ошибки предсказания (ФОП) m -го порядка $(1, a_{m,1}, \dots, a_{m,m})$. Андерсен показал [3], что для действительного сигнала из N отсчетов $X_k, k = 0, 1, \dots, N-1$, коэффициенты определяются выражением

$$a_{m,m} = -2 \sum_{k=0}^{N-1-m} D_{m,k} E_{m,k} \left| \sum_{k=0}^{N-1-m} (D_{m,k}^2 + E_{m,k}^2) \right|^{-1/2},$$

где

$$D_{m,k} = D_{m-1,k} + a_{m-1,m-1} E_{m-1,k};$$

$$E_{m,k} = E_{m-1,k+1} a_{m-1,m-1} D_{m-1,k+1},$$

а начальные значения $D_{1,k} = X_k$ и $E_{1,k} = X_{k+1}$. Для метода ОПВ

$$a_{m,m} = -2 \sum_{k=0}^{N-1-m} W_{m,k} D_{m,k} E_{m,k} \left| \sum_{k=0}^{N-1-m} W_{m,k} (D_{m,k}^2 + E_{m,k}^2) \right|^{-1/2},$$

здесь $W_{m,k} = \frac{6(k+1)(N-m-k+1)}{(N-m+1)(N-m+2)(N-m+3)}, k = 0, \overline{N-1-m}$.

Эффективный способ вычисления $W_{m,k}$ предложен в [5]. Он позволяет определить $W_{m,k}$ из следующего выражения:

$$W_{m,k} = 2W_{m,k-1} - W_{m,k-2} - \lambda, \quad k = 3, \overline{N-1-m},$$

где

$$\lambda = 12/(N(N+1)(N+2)).$$

Тестовый сигнал единичной амплитуды, состоящий из $N = 16$ отсчетов, задавался в виде

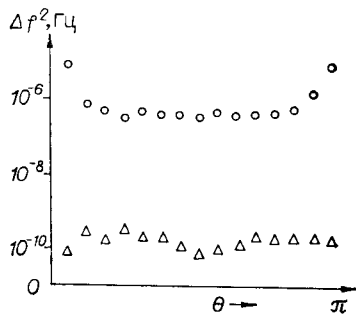
$$X_k = \cos(\theta_0 k + \varphi), \quad k = 0, \overline{N-1},$$

где θ_0 — интересующий параметр, который при фиксированном интервале $t_s = 0,5$ с связан с частотой синусоиды f_0 соотношением $\theta_0 = 2\pi f_0 t_s$ рад. (С параметром θ удобнее работать, чем с частотой f .)

При оценивании СПМ различными ММЭ получаем оценку $\hat{\theta}$, которая связана с действительной величиной θ выражением

$$\hat{\theta} = \theta + \Delta\theta,$$

где $\Delta\theta$ — вносимая ошибка $\equiv 2\pi\Delta f t_s$; Δf — частотная ошибка. Величина θ изменялась от 0 до π рад с шагом π/N рад. Начальная фаза варьировалась от 0 до 345° с шагом 15° . Последовательность данных исследовалась с помощью ФОП второго порядка, что теоретически необходимо и достаточно для анализа синусоиды в отсутствие шума. Частота синусоиды определялась по методике, предложенной в [7]. Зависимости Δf^2 от параметра θ для ОПВ и МНК приведены на рисунке, где кружки и треугольники — дисперсии оценок частоты, полученных методом ОПВ и МНК соответственно. При использовании метода ОПВ необходимо, чтобы выполнялось условие $2\pi/N \leq \theta \leq (\pi - 2\pi/N)$, так как в этой области Δf^2 распределена равномерно и имеет минимальные значения. Дисперсия Δf при применении МНК не имеет явно выраженных экстремумов по всему диапазону параметра θ и в значительной степе-



ни может объясняться конечностью разрядной сетки ЭВМ. Средние значения Δf^2 для МНК и ОПВ составили $4,173 \cdot 10^{-10}$ и $4,75^{-5}$ Гц соответственно.

Вычислительную эффективность алгоритмов принято определять по количеству операций типа умножение и сложение. Так, для МНК необходимо $NM + 9M^2 + 2N + 30M$ умножений и $NM + 8M^2 + N + 7M + 8$ сложений, а для метода ОПВ — $8NM - 3,5M^2 + 11,5M - N + 6$ умножений и $7NM - 3M^2 + 9M - N + 4$ сложений. При обработке исходной последовательности из 100 отсчетов при помощи ФОР 30-го порядка для МНК необходимо 12200 умножений и 10402 сложений, а для метода ОПВ — 21551 умножений и 19185 сложений. Для реализации метода ОПВ необходимо примерно на треть больше оперативной памяти по сравнению с МНК.

Вычислительная эффективность метода ОПВ приблизительно в 2 раза ниже, чем у МНК. Теоретические выводы подтверждаются при исследовании продолжительности работы программ по таймеру.

При использовании ММЭ для анализа полигармонического сигнала с высоким отношением сигнал/шум следует отдавать предпочтение МНК.

Полученные результаты использованы при разработке системы автоматизированных испытаний гидротурбин, выполненной на базе ЭВМ СМ-2М. Применение МНК в системах спектрального анализа, построенных на базе мини-ЭВМ, позволяет проводить оценивание СПМ по коротким выборкам без снижения разрешающей способности по частоте, что повышает общую производительность и дает возможность более рационально использовать оперативную и внешнюю память мини-ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Swingler D. N. On the optimum tapered Berg algorithm // IEEE Trans. Acoust., Speech Signal Process.— 1984.— V. ASSP-32, N 1.— P. 185—186.
2. Суинглер Д. Н. Модифицированный алгоритм Берга для спектрального анализа максимальной энтропии // ТИИЭР.— 1979.— Т. 67, № 9.
3. Anderson N. O. On the calculation of filter coefficients for maximum entropy analysis // Geophysics.— 1974.— V. 39, N 1.— P. 69—72.
4. Paliwal K. K. Further simulation results on tapered and energy weighted Berg methods // IEEE Trans. Acoust., Speech., Signal Process.— 1985.— V. ASSP-33, N 6.— P. 1624—1626.
5. Kaveh M. K., Lippert G. A. An Optimum tapered Berg algorithm for linear prediction and spectral analysis // IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Process.— 1983.— V. ASSP-31, N 2.— P. 438—444.
6. Marple S. L. A new autoregressive spectrum analysis algorithm // IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.— 1980.— V. ASSP-28, N 4.— P. 441—453.
7. Маркел Дж. Д., Грей А. Х. Линейное предсказание речи.— М.: Связь, 1980.

Поступило в редакцию 24 ноября 1986 г.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В № 4 за 1987 г замечены следующие опечатки:

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
15	2-я (снизу)	... C_n C_n^2 ...
17	29-я (спизу)	... C_n^2 C_n ...