УДК 551.501.7:621.391

С. Ф. СИМОВСКАЯ, канд. техн. наук, *В. И. АЛЕХИН*, канд. техн. наук

ОЦЕНКА ДОПЛЕРОВСКОЙ ЧАСТОТЫ НЕПРЕРЫВНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ЛОКАТОРА

При разработке перспективных доплеровских акустических локаторов непрерывного действия требуется рассчитать точность измерения среднеквадратической частоты доплеровского процесса, связанной с метеорологическими величинами в приземном слое атмосферы.

Звуковой сигнал, рассеянный трассирующими частицами атмосферы, представляющими собой неоднородности скорости ветра и температуры воздуха, несет информацию о скорости перемещения или конвекции градиентов скорости или температуры.

Акустическая локационная система непрерывного действия принимает эхо-сигнал, частота которого отличается от частоты излученного колебания на значение доплеровского сдвига, связанного с параметрами скорости ветра [1]. Сложившееся представление о том, что отраженный от метеоцелей звуковой сигнал формируется совокупностью элементарных рассеивающих трассирующих частиц, положение которых в рассматриваемом объеме пространства произвольно и взаимно независимо, исключает возможность детерминированного подхода к его анализу. Стохастический характер принимаемых акустическим локатором сигналов обусловлен также функционированием локационной системы в условиях априорной неопределенности из-за неполного знания структуры и характеристик метеосреды. Кроме того, в данной системе нельзя пренебречь мешающим воздействием различного рода шумов и помех. Задачу частотной оценки спектра стационарного гауссовского эргодического процесса можно решать различными способами [2]. При наличии записи реализаций стационарного процесса спектральный анализ проводится с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ). В этом случае появляется возможность вычислить смещение и рассеяние оценки среднеквадратической частоты для априори известной и неизвестной полосы частот. На основе соотношения

$$\omega_{\text{ср}} = \left[\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 G(\omega)\, d\omega \Big/ \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega)\, d\omega \right]^{1/2},$$

где $G(\omega)$ — энергетический спектр процесса, вычисляется оценка среднеквадратической частоты стационарного процесса с нулевым математическим ожиданием. Поскольку среднее число нулей стационарного процесса в единицу времени пропорционально значению среднеквадратической частоты $n = \omega_{\text{ср}}/\pi$, в практике нашел широкое применение метод, основанный на подсчете числа пересечений процессом нулевого уровня [3].

Решение задач оценки параметров нормальных процессов связано с широким применением корреляционного анализа. Использование корреляционной системы может обеспечить измерение с заданной точностью доплеровского смещения частоты. Известно [3], что оценка доплеровского сдвига частоты $F_{Д_0}$ автокорреляционным методом проводится по значению временного интервала τ_1, при котором впервые обращается в нуль функция автокорреляции сигнала вида $R(\tau) = r(\tau) \cos 2\pi F_{Д_0}\tau$, где $r(\tau)$ — огибающая автокорреляционной функции. Для расчета частоты доплеровского спектра используется соотношение $F_{Д_0} = 1/(4\tau_1)$. Известны корреляторы, вычисляющие корреляционную функцию по методу аппроксимации ее суммой членов разложения в ряд по ортогональным функциям [4].

Ортогональный коррелятор содержит формирователь коэффициентов разложения, схемы умножения, суммирующее устройство и генератор опорных импульсов. В состав формирователя коэффициентов разложения входят ортогональный фильтр, схемы умножения и устройства усреднения по числу ячеек фильтра. Отметим достоинства ортогонального метода вычисления корреляционной функции: непосредственное получение графика функции корреляции, обеспечение работы в реальном масштабе времени, отсутствие временной задержки и высокая надежность. Сложность схемы и трудоемкость реализации ортогонального коррелятора относятся к его недостаткам.

Корреляционная функция стационарного случайного процесса представляется усеченным рядом вида

$$R_N(\tau) = \sum_{n=0}^{N} a_n \varphi_n(\tau), \qquad (1)$$

где a_n — коэффициенты ряда, $a_n = \int_a^b R(\tau)\varphi_n(\tau)\,d\tau$; $\varphi_n(\tau)$ — семейство базисных функций, ортогональных в интервале (a, b) с весом $\mu(\tau)$; N — число членов ряда.

Выбор системы ортогональных функций обусловлен характером аппроксимируемой корреляционной функции, ее интервалом корреляции, весовой функции, связанной с погрешностью аппроксимации при усечении ортогонального ряда, простотой реализации блока ортогонального фильтра.

Функцию корреляции типа экспоненциального затухающего косинуса, характерную для колебаний с доплеровскими частотами, можно аппроксимировать применением фильтра Лагерра, который обеспечивает высокую точность аппроксимации сравнительно малым числом членов разложения. В корреляторе Лагерра реализуются ортогональные фильтры с импульсной характеристикой

$$g_n(t) = \frac{\lambda}{2} \exp\left\{-\frac{\lambda t}{2}\right\} L_n(\lambda t),$$

где $L_n(\lambda t)$ — полиномы Лагерра,

$$L_n(\lambda t) = \sum_{i=0}^{n} \frac{n!\,(-1)^i\,(\lambda t)^i}{(n-i)!\,(i!)^2}.$$

Параметр λ обратно пропорционален постоянной времени звеньев фильтра (с точностью до множителя 2), $\lambda = 2/\tau_ц$.

На выходе ортогонального коррелятора Лагерра получается график изменения оценки корреляционной функции, а также вычисляются значения оценок коэффициентов разложения, что позволяет производить дальнейшую обработку цифровым способом.

Для анализа доплеровских сигналов на кратковременном интервале наблюдения применяется кратковременный ортогональный автокоррелятор с преобразованием временного масштаба. Сужение выходного сигнала автокоррелятора достигается введением одной из двух систем ортогонального фильтра, генерирующей функции Лагерра, с увеличенным значением параметра фильтра.

При использовании коррелятора Лагерра определяется достижимая аппроксимальная точность вычисления корреляционной функции. Поскольку искомая оценка среднеквадратической частоты доплеровского спектра сигнала связана с аргументом функции корреляции при первом ее обращении в нуль, рассмотрим погрешности, обусловленные усечением ортогонального ряда, в точке первого пересечения корреляционной функции нулевой оси.

Относительная ошибка в смысле равномерного приближения во временной области аппроксимированной рядом Лагерра корреляционной функции определяется из соотношения $\delta_N(\tau_1) = |\tau_1 - \tau_{1N}|/\tau_1$. **(2)**, где τ_1, τ_{1N} — аргументы первого перехода через нуль заданной функции корреляции $R(\tau)$ и аппроксимированной функции корреляции $R_N(\tau_N)$.

Для экспоненциально-косинусной корреляционной функции

$$R(\tau) = \exp\{-|\gamma\tau|\}\cos 2\pi F_{Д0}\tau \qquad (3)$$

оценку точности равномерного приближения в области первого нуля τ_1 с учетом (1), (2), (3) вычисляем, используя формулы

$$R_N(\tau_N) = \sum_{n=0}^{N} a_n \exp\{-|\alpha\tau_N|/2\} L_n(\alpha\tau_N),$$

$$a_n = \int_0^\infty R(\tau)\exp\{-|\alpha\tau|/2\} L_n(\alpha\tau)\,d\tau.$$

При проведении математического моделирования для доплеровского сигнала с экспоненциально-косинусной корреляционной функцией рассчитали относительную ошибку аппроксимации на основании (2) по формуле $\delta_N(T_1) = |T_1 - T_{1N}|/T_1$ (4), где T_1, T_{1N} — безразмерные аргументы функций $R(T)$, $R_N(T_N)$, $T_1 = \alpha\tau_1$, $T_{1N} = \alpha\tau_{1N}$; $R(T)$ — заданная корреляционная функция,

$$R(T) = \exp\{-0{,}5\,\eta T\}\cos 2\pi FT,\ T \geqslant 0;\ \eta = 2\gamma/\alpha;$$
$$F = F_{Д0}/\alpha;\quad \beta = (1+\eta)/2;$$

$R_N(T_N)$ — аппроксимированная функция корреляции,

$$R_N(T_N) = \exp\{-T_N/2\}\times$$
$$\times \sum_{k=0}^{N}\sum_{\nu=0}^{k}\sum_{s=0}^{k} \frac{(k!)^2(-T_N)^\nu(-1)^s}{(k-\nu)!\,(\nu!)^2\,(k-s)!\,(s!)\,\beta^{s+1}\,[1+(\omega/\beta)^2]^{(s+1)/2}}\times$$
$$\times\cos[(s+1)\operatorname{arctg}\omega/\beta],\quad T_N \geqslant 0.$$

В введенных безразмерных переменных первый нуль корреляционной функции анализируемого сигнала имеет место при $T_1 = 1/(4F)$.

Чтобы рассчитать погрешность аппроксимации функции корреляции с экспоненциальной формой огибающей, разработали и составили программу, в которую включен оператор вызова подпрограммы *LAP* для вычисления полиномов Лагерра. В таблице даны рассчитанные по выражению (4) значения относительной ошибки аппроксимации $\delta_N(T_1)$ для $F = 0{,}1$.

N	$\sigma_N(T_1)$	
	$\eta=11$	$\eta=14$
6	0,0225	0,0255
10	0,0120	0,0155
15	0,0075	0,0115

Результаты расчета точности аппроксимации экспоненциально-косинусной корреляционной функции в области первого ее перехода через нуль показывают, что ошибка приближения τ_{1N} к τ_1 уменьшается с увеличением членов N ряда Лагерра. Точность приближения связана с соотношением параметров функции корреляции γ, $F_{\text{Д}0}$, с постоянной времени ортогонального фильтра $\tau_{\text{ц}}$, выбор которой определяется параметром α функций Лагерра. Ошибка уменьшается тем значительнее, чем меньше относительная частота F при заданном параметре η.

Анализ результатов расчета оценки доплеровской частоты акустического локатора непрерывного действия показывает, что ортогональный коррелятор Лагерра позволяет с достаточно высокой точностью (единицы и доли процента) определить оценку смещения доплеровской частоты при ограниченном числе ($5 \div 7$) каналов.

Обработка сигналов в корреляторе осуществляется в два этапа. На первом этапе коррелятор за время анализа формирует оценки коэффициентов разложения ряда Лагерра. На втором этапе, длительность которого может быть короче длительности первого этапа, по найденным оценкам коэффициентов разложения синтезируется значение оценки функции корреляции. Время, соответствующее первому обращению в нуль оценки корреляционной функции, фиксируется для нахождения оценки доплеровской частоты акустического локатора.

Список литературы: 1. *Измерение* скорости ветра непрерывным доплеровским акустическим локатором в условиях аэропорта / В. И. Алехин, А. И. Рыженко, В. И. Сидько, Г.И. Сидоров // VI Всесоюз. совещ. по радиометеорологии: Тез. докл.— Таллин.— 1982.— С. 156—157. 2. *Шемякин В. С.* Оценка среднеквадратичной частоты спектра гауссовского эргодического процесса // Радиотехника.— 1985.— № 9.— С. 60—63. 3. *Колчинский В. Е., Мандуровский И. А., Константиновский М. И.* Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов.— М. : Сов. радио, 1975.— 432 с. 4. *Мирский Г. Я.* Аппаратурное определение характеристик случайных процессов.— М. : Энергия, 1972.— 456 с.

Поступила в редколлегию 14.07.86