

Е. Д. КОЛТИК,
С. А. КРАВЧЕНКО, Р. В. ЯРАЛОШВИЛИ

(Ленинград)

К ВОПРОСУ ОБ АТТЕСТАЦИИ ИНФРАЗВУКОВЫХ КОРРЕЛОМЕТРОВ

В технике статистических измерений широко применяются специализированные измерительные электронные приборы, известные под названием корреляционных анализаторов (коррелометров) [1]. Требование единства измерений обуславливает необходимость создания единых критериев точности, методов поверки коррелометров и соответствующей аппаратуры. Согласно критерию точности коррелометров, учитывающему метрологические свойства этих приборов, погрешность определяется как максимальное отклонение показаний прибора от расчетного при воздействии на его вход сигнала $x(t)$ с заданным распределением и спектральной плотностью [2]. При этом поверка коррелометров может проводиться как с помощью образцового прибора, так и по образцовой мере, которая воспроизводит сигнал с расчетным значением корреляционной функции.

Рассмотрим последний наиболее перспективный случай, когда поверка проводится по образцовому сигналу. Основной задачей, возникающей при практическом использовании этого метода, является выбор вида сигнала с позиций наилучшего «удержания» критериальных характеристик. На основании сказанного сформулируем требования, предъявляемые к образцовому сигналу: образцовый сигнал (ОС) должен обладать заданным видом энергетического спектра $S(\omega)$; закон распределения ординат ОС должен соответствовать выбранному; заданные свойства ОС должны быть стабильны во времени; отклонение текущих значений образцового сигнала от расчетного не должно быть более, чем это допустимо для поверки коррелометров, в частности, погрешность не должна превышать 5%; источник ОС должен позволять осуществлять поверку коррелометров совместно с устройством задержки и отдельно с ним; образцовый сигнал может быть случайным или детерминированным, однако при поверке инфразвуковых коррелометров приобретает особо значительный вес погрешность из-за конечности реализации случайного сигнала. Оценить эту погрешность позволяют следующие рассуждения.

При нормальном распределении ординат текущего процесса $W(x, t)$ среднеквадратичное отклонение σ_R^2 значения корреляционной функции от истинного из-за конечности реализации случайного процесса определяется следующим выражением:

$$\sigma_R^2(\tau) = \frac{2}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} \left(1 - \frac{\tau_1}{T-\tau}\right) [R_{xx}^2(\tau_1) + R_{xx}(\tau_1 + \tau) R_{xx}(\tau_1 - \tau)] d\tau_1, \quad (1)$$

где $R_{xx}(\tau)$ — корреляционная функция; τ — аргумент корреляционной функции; τ_1 — параметр интегрирования; T — интервал усреднения ($T = K T_p$); T_p — длина реализации.

Зададимся конкретным видом корреляционной функции

$$R_{xx}(\tau) = \sigma_x^2 e^{-\alpha(\tau)}, \quad (2)$$

где α — коэффициент затухания экспоненциальной корреляционной функции, а σ_x^2 — дисперсия процесса $x(t)$, и вычислим интеграл (1) при условии $\tau_1 \gg \tau \geq 0$

$$\sigma_R^2(\tau) = \frac{\sigma_x^4}{\alpha^2 (T-\tau)^2} [e^{-2\alpha(T-\tau)} + 2\alpha(T-\tau) - 1]. \quad (3)$$

Перенесем σ_x^4 в левую часть и полученное отношение обозначим

$$\delta^2 R(\tau) = \frac{\sigma^2 R(\tau)}{\sigma_x^2}. \quad (4)$$

Очевидно, что отношение (4) представляет собой приведенную погрешность коррелометра, вызванную конечностью интервала интегрирования T . Обозначим $\alpha(T-\tau) = \gamma$ и исследуем (3) относительно переменной γ . Получим, что

$$\begin{aligned} \delta^2 R(\tau) &\rightarrow 0 \text{ при } \gamma \rightarrow \infty; \\ \delta^2 R(\tau) &\rightarrow 200\% \text{ при } \gamma \rightarrow 0; \\ \delta^2 R(\tau) &\rightarrow \infty \text{ при } \gamma \rightarrow -\infty. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, можно утверждать, что с увеличением α при постоянных значениях разности $(T-\tau)$ погрешность убывает.

Определим связь α с шириной спектра. Пользуясь преобразованием Фурье, найдем сопряженное значение $S(\omega)$ для выбранного вида $R_{xx}(\tau)$ по формуле (2):

$$S(\omega) = \frac{\alpha}{\pi} \frac{1}{\alpha^2 + \omega^2}, \quad (6)$$

где ω — текущее значение круговой частоты. Площадь под кривой $S(\omega)$ определяется интегралом

$$I = \frac{2\alpha}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{\alpha^2 + \omega^2} d\omega. \quad (7)$$

По условиям нормировки $I=1$; при ограничении пределов площадь под кривой уменьшится до некоторой величины, которую практически можно считать равной 0,99. Решив уравнение

$$\frac{2\alpha}{\pi} \int_{\omega_H}^{\omega_B} \frac{1}{\alpha^2 + \omega^2} d\omega = 0,99, \quad (8)$$

получаем соотношение

$$\alpha \approx \frac{\Delta f_x}{2}, \quad (9)$$

где $\omega_в$ и $\omega_н$ — верхняя и нижняя граничные частоты диапазона: $\Delta f_x = \omega_в - \omega_н$ — ширина полосы сигнала $x(t)$.

Рассмотрим, например, погрешность $\delta R(\tau)$ для инфразвукового коррелометра с шириной полосы $\Delta f = 20$ гц, $f_н = 0,01$ гц, при длительности $T = 10$ мик. Из выражений (3), (4) и (9) следует

$$\delta^2 R(\tau) \approx \frac{2}{\alpha(T-\tau)}.$$

Найдем $\delta^2 R$ для $\tau = \tau_{\max}$, значение которого определяется по величине периода нижней частоты $T_н = 100$ сек; $\tau_{\max} = (3 \div 5)$, $T_н = 300 \div 500$ сек. Окончательно имеем

$$\delta R(\tau_{\max}) \approx 40 \%$$

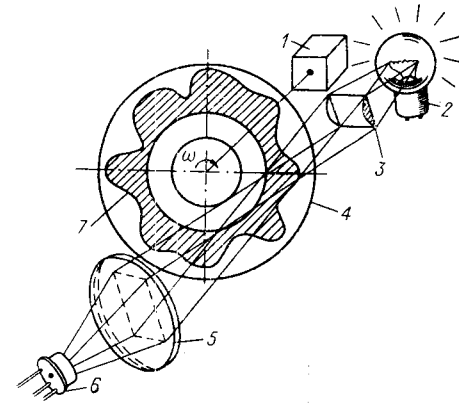
Приведенный пример свидетельствует о недопустимости использования случайных сигналов в качестве образцовых при поверке коррелометров. Результаты подобных расчетов для других видов корреляционных функций сведены в таблицу.

$R_x(\tau)$	$D[R_x^*(\tau)]$	$D[R_x^*(0)]$
$e^{-\alpha \tau }$	$\frac{1}{\alpha(T-\tau)} \left[1 - \frac{\tau}{2T} + (1+2\alpha\tau)e^{-2\alpha\tau} \right]$	$\frac{2}{\alpha T}$
$\cos \omega_0 \tau e^{-\alpha \tau }$	$\frac{\cos^2 \omega_0 \tau}{\alpha(T-\tau)} + \frac{\alpha}{(\alpha^2 + \omega_0^2)(T-\tau)}$	$\left[\frac{1}{\alpha T} + \frac{\alpha}{(\alpha^2 + \omega_0^2) T} \right] \frac{2}{\alpha T}$
$e^{-\alpha^2 \tau^2}$	$\frac{\sqrt{\frac{\pi}{2}} (1 + e^{-2\alpha^2 \tau^2})}{\alpha(T-\tau)}$	$\sim \frac{2,6}{\alpha T}$
$(1 + \alpha T) e^{-\alpha \tau }$	$\frac{3 - \alpha^2 \tau^2}{\alpha(T-\tau)}$	$\frac{3}{\alpha T}$

Возможно использование детерминированных, например, сложных периодических сигналов в качестве образцовых. Очевидно, что здесь мы не будем связаны длительностью реализации, так как возможно задание некоторого целого (или вообще фиксированного) числа периодов такого сигнала, что позволяет полностью ликвидировать погрешность из-за ограничения интервала интегрирования. Любое же ограничение длительности случайного процесса непременно приводит к большей или меньшей статистической погрешности, так как даже на очень больших отрезках времени вероятность проявления всех заложенных свойств случайного сигнала отнюдь не равна единице. Поэтому предлагается использовать детерминированные сигналы, длительность которых не влияет на точность воспроизведения образцового сигнала и позволяет однозначно и с высокой точностью задавать критериальные характеристики. В частности, для этой цели могут быть использованы полигармонические и экспоненциальные сигналы. Поэтому устройство для поверки коррелометров должно обеспечивать воспроизведение двух сигналов сложной формы с временной задержкой одного из сигналов. Такие сигналы могут быть по-

лучены с помощью двух оптико-электронных преобразователей при использовании принципа модуляции светового потока.

На рисунке показана принципиальная схема одного из оптико-электронных преобразователей. Он состоит из постоянного по яркости источника света 2, линзы 3, фокусирующей световой пучок в линию на плоскости диска механического модулятора 4. На последний нанесена «маска» 7, обеспечивающая воспроизведение любой наперед заданной функции, в данном случае полигармонического сигнала, состоящего из суммы 1, 2 и 3-й гармоник. Для фокусирования модулированного маски свет на поверхности чувствительной части фотоприемника 6 служит двояковыпуклая линза 5. Диск приводится во вращение двигателем 1. В качестве фотоприемника могут быть применены фотоэлементы, фотоусилители, фотосопротивления, фотодиоды и фототранзисторы. В оптикоэлектронном преобразователе использован фототранзистор, так как он обладает высокой чувствительностью, малой инерционностью и малыми габаритами.



При вращении диска модулятора световой поток после прохождения через маску становится переменным по величине и определяется выражением

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{\Phi_m - \Phi_0}{2} + \frac{\Phi_m - \Phi_0}{2} \sum_{q=1}^2 A(2q+1) \cos(2q+1)(\omega t + \varphi),$$

где Φ_0 , Φ_m — соответственно минимальный и максимальный световые потоки, получающиеся при вращении модулирующего диска; $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ — угловая скорость вращения диска (n — число оборотов диска в минуту); $q=0, 1, 2, \dots$

Напряжение на нагрузке фототранзистора может быть представлено как

$$U_{\phi m} = R_k K_{\phi m} \left(\Phi_0 + \frac{\Phi_m - \Phi_0}{2} \right) + R_k K_{\phi m} \frac{\Phi_m - \Phi_0}{2} \sin \omega t \pm \Delta U_{\kappa m},$$

где R_k — сопротивление коллектора фототранзистора; $K_{\phi m}$ — интегральная чувствительность фототранзистора; $\Delta U_{\kappa m}$ — приращение выходного напряжения фототранзистора, зависящее от температуры окружающей среды.

Для исключения постоянной составляющей (первый и третий члены последнего выражения) из спектра выходного сигнала оптико-электронного преобразователя предусмотрен источник напряжения противоположной полярности. Полезный сигнал усиливается высокостабильным термостатированным транзисторным усилителем. При уровнях выходных сигналов 40 дБ (от 10 в) дрейф усилителя не превышает 20 мкВ/ч.

Практически выполненное устройство представляет собой два оптико-электронных преобразователя, расположенных на одном валу, кото-

рый приводится во вращение через декадный редуктор от двигателя ДМ-3. Скорость двигателя стабилизирована и изменяется в широких пределах.

Временная задержка (τ) обеспечивается путем взаимного автономного поворота обеих оптических систем и в сумме составляет величину, равную периоду самой низкочастотной составляющей сигнала. Отсчет временной задержки осуществляется с помощью цифрового табло. Конструктивно устройство выполнено в виде настольного прибора. Для исключения паразитных сигналов из-за детонации первого и второго рода основание прибора представляет собой массивную литую плату из алюминия. Для воспроизведения сигналов различной формы в устройстве предусмотрена возможность смены стеклянных дисков, на которые нанесены полупрозрачные маски. Существенной особенностью прибора является возможность изменения частоты основной волны и гармоник по заданной программе с сохранением формы сигнала. Это позволяет применять прибор при поверке коррелометров, на входе которых имеются узкополосные фильтры, например, третьоктавные.

Оптико-электронный преобразователь полигармонических сигналов инфразвуковых частот (0,01—20 гц) может использоваться не только при поверках коррелометров, но и для испытания анализаторов спектра, измерителей коэффициента нелинейных искажений и других приборов. Амплитудная и временная погрешности прибора не превышают 2—3 и 0,5% соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Я. Мирский. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. М.—Л., «Энергия», 1967.
2. F. H. Lange, W. T. Müllers. [б. н.] Telecommunicatu (Bucuresti), 1965. № 9.

*Поступила в редакцию
19 мая 1969 г.,
окончательный вариант —
24 декабря 1969 г.*