ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 184 1970

НЕКОТОРЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО МЕТОДА БЕТАТРОННОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

В. И. ГОРБУНОВ, А. В. ПОКРОВСКИЙ, А. К. ТЕМНИК

(Представлена научным семинаром НИИЭИ)

Сцинтилляционный метод бетатронной дефектоскопии находит все более широкое применение при автоматическом контроле больших толщин металла [1, 2].

Вопросы повышения чувствительности метода и надежности получения достоверных данных о наличии дефекта являются в настоящее время определяющими. Однако чувствительность и надежность во многом зависят от помех, возникающих в приемно-регистрирующем тракте.

На основе теории вероятности и математической статистики проведем анализ флуктуационных явлений в электрических цепях схемы регистрации.

Рассмотрим возможности понижения уровня шумов и способы выделения сигнала на уровне шумов. Шумы в электрической схеме образуются вследствие флуктуаций тока в электронных лампах (дробовой эффект), хаотического движения электронов в сопротивлениях и других элементах схемы; кроме того, сам детектор является источником шумов [1, 2]. Сигнал с детектора флуктуирует также ввиду нестабильности излучения бетатрона. Шум представляет собой колебательный процесс, изменяющийся по случайному закону во времени. В различных электрических цепях встречаются флуктуационные колебания, различные по своей структуре. Математически их можно описать с помощью аппарата теории вероятности.

Функция помехи представляет собой в каждый момент t какое-либо значение, характеризующееся вероятностью появления его в данный момент времени. Для более полного описания процесса взаимодействия сигнала и помехи вводится в рассмотрение двухмерная вероятность, т. е. случайная величина принимает в момент времени t_1 значение x_1, а в момент времени t_2 — значение x_2. При известном двухмерном законе распределения вероятностей может быть определена функция взаимной корреляции по формуле [4]:

$$R(t_1 t_2) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} x_1(t_1)\cdot x_2(t_2)\cdot P(x_1 x_2)\, dx_1 \cdot dx_2 = \overline{x_1(t_1)\cdot x_2(t_2)}, \qquad (1)$$

где $x_1(t_1)$ — закон изменения сигнала во времени,
$x_2(t_2)$ — закон изменения помехи во времени,
$P(x_1 x_2)$ — двумерная плотность вероятностей.

Функция корреляции представляет собой среднюю степень вероятностей связи между процессами x_1 и x_2 в два момента времени t_1 и t_2 [4].

Схема регистрации, обеспечивающая наилучший прием сигнала при наличии шума, называется оптимальной. Такая схема обеспечивает максимальную вероятность неискаженного приема сигнала. Однако сигнал под действием шума существенно искажается, поэтому возникает неопределенность при приеме сигнала.

Исходя из этого определение сигнала о дефекте представляет собой статистическую задачу: по известному сигналу $У$ на выходе узнать все о сигнале X на входе схемы.

Математически эта задача заключается в определении апостериорного распределения вероятностей $P_y\ (x)$ [5]. Это распределение находится, как правило, путем анализа многочисленных экспериментов.

Фактически апостериорная вероятность дает нам все, что можно узнать о сигнале на входе схемы регистрации, поэтому в дальнейшем данную схему будем называть идеальной.

Также определяющей величиной надежного приема сигнала является величина $P_x\ (y)$ — условное распределение вероятности того, что принятый сигнал $У$ является результатом наложения помехи на входной сигнал X.

$P_x\ (y)$ можно рассматривать как функцию X при данном принятом сигнале $У$, при этом она показывает, какому переданному сигналу X правдоподобнее всего соответствует принятый сигнал $У$.

Следовательно, для решения задачи приема требуется произвести такую операцию, которая определяла бы функцию правдоподобия.

$$L(x) = P_x(y), \tag{2}$$

где $L(x)$ — функция правдоподобия.

Рассмотрим случай, когда на сигнал $x(t)$, существующий в течение времени T прохождения дефекта перед окном коллиматора приемника излучения, накладывается помеха в виде „белого" шума:

$$y(t) = x(t) + n(t), \tag{3}$$

где $n(t)$ — закон изменения помехи во времени.

Для нахождения функции правдоподобия, что равносильно вычислению вероятности $P_x(y)$, воспользуемся теоремой Котельникова [3], которая определяет функцию $x(t)$ через ее дискретные значения вычислений через интервалы Δt:

$$\Delta t = \frac{1}{2F_0}, \tag{4}$$

где F_0 — ширина частотного спектра.

Количество дискретных значений, отображающих данную функцию $y(t)$ на временном интервале T, равно:

$$m = \frac{T}{\Delta t} = 2F_0T. \tag{5}$$

Применив теорему умножения m независимых событий к дискретным значениям, получаем [6]

$$L(x) = P_x(y) = \prod_{\kappa=1}^{m} P_x(y) = (2\pi\sigma_{ш})^{-F_0T} \exp\left[-\frac{1}{G}\sum_{\kappa=1}^{2F_0T}[y(t) - x(t)]^2\right], \tag{6}$$

где $\sigma_{ш}$ — дисперсия шума,

$G = \frac{\sigma_{ш}^2}{F_0}$ — спектральная плотность мощности шума.

Функция $L(x)$ максимальна, когда переданный и принятый сигналы совпадают в исследуемом интервале. Заменив предельную сумму в выражении (6) интегралом, рассмотрим составляющие его части:

$$\int_0^T [y(t) - x(t)]^2 dt = \int_0^T [y(t)]^2 dt + \int_0^T [x(t)]^2 dt - 2\int_0^T y(t)\cdot x(t)\cdot dt. \qquad (7)$$

Первый интеграл характеризует весь принятый сигнал, второй — весь переданный сигнал, а третий выражает взаимосвязь между переданным и принятым сигналами. Поэтому, чтобы полностью охарактеризовать входной сигнал $x(t)$ по принятому $y(t)$, необходимо знать, что принятый сигнал $y(t)$ соответствует данному исходному сигналу $x(t)$. Отсюда следует, что для определения функции правдоподобия $L(x)$ достаточно вычислить интеграл

$$g(t) = \int_0^T y(t)\cdot x(t)\, dt. \qquad (8)$$

Полученное выражение представляет собой аналог функции взаимной корреляции между принятым и переданным сигналами.

Таким образом, для наилучшего приема сигнала детекторы и схема регистрации должны быть взаимокоррелированного типа, однако качество приема сильно зависит от величины спектральной плотности шума, т. е. отношение сигнал/шум улучшается при использовании в схемах частотных фильтров. Рассмотрим частотную характеристику согласованного фильтра. Спектр пропускаемых частот для единичного сигнала описывается формулой [4]:

$$S(\Omega) = \int_0^{T_u} e^{-j\omega t}\cdot dt. \qquad (9)$$

Однако при периодизации сигнала от дефекта полезная информация содержится в последовательности импульсов. Для определения спектра, состоящего из N импульсов, воспользуемся линейностью преобразования Фурье [6]:

$$S(\omega) = S_0(\omega) + S_0(\omega)e^{-j\omega t} + S_0(\omega)e^{+j\omega t} + \cdots\cdots +$$
$$+ S_0(\omega)e^{-j\omega\frac{N-1}{2}T} + S_0(\omega)e^{+j\omega\cdot\frac{N-1}{2}T}, \qquad (10)$$

где

$$S_0(\omega) = T_u \frac{\sin\frac{\omega T_u}{2}}{\frac{\omega T_u}{2}}. \qquad (11)$$

Пользуясь формулой суммы геометрической прогрессии, преобразуем выражение (10) [6]

$$S(\omega) = S_0(\omega)\frac{\sin N\frac{\omega T_u}{2}}{\sin\frac{\omega T_u}{2}}. \qquad (12)$$

Формула (12) показывает, что при увеличении числа импульсов N энергия начинает концентрироваться вблизи частот кратных ω, максимумы энергии приходятся на частоты спектров одиночных импульсов. Особенно наглядно виден механизм оптимальной фильтрации в гребенчатом фильтре [3]. Полосы прозрачности гребенчатого фильтра совпадают с главными лепестками спектра прямоугольного импульса, поэтому основная часть импульса проходит без искажений. «Белый» шум, обладающий равномерным спектром, в большинстве своем подавляется, поэтому прошедшие через фильтр части сигнала и шума целесообразно просуммировать, так как законы суммирования для сигнала и шума различные. При этом импульсы полезного сигнала суммируются арифметически и результирующий сигнал имеет амплитуду напряжения в N раз большую соответственно и мощность его возрастает в N^2 раз. Вместе с тем результирующая амплитуда шумов по напряжению будет складываться по среднеквадратичному закону и будет равна $\sqrt{N}$, а значит мощность увеличится в N раз. В результате проведенной операции синхронного накопления отношение сигнал/шум возрастает по мощности в

$$\frac{N^2}{N} = N_{\text{раз}}. \tag{13}$$

Сказанное относится только к периодическим импульсам, что как раз имеет место в дефектоскопии на базе бетатрона и других ускорителей. Это означает, что в пропускаемом фильтром спектре увеличивается вклад частот, приходящихся на полосу частот регистрируемых периодических импульсов, иными словами, улучшается соотношение сигнал/шум.

Подводя итоги, приходим к следующим выводам:

1. Увеличение отношения сигнал/шум в бетатронной дефектоскопии со сцинтилляционными счетчиками можно получить вышеуказанными путями.

2. Наиболее перспективным путем является применение в схемах регистрации гребенчатых фильтров, обеспечивающих выигрыш в отношении сигнал/шум в число раз, пропорциональное времени накопления.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Горбунов и др. «Сварочное производство», 7, 1965.
2. В. И. Горбунов, А. В. Покровский. «Дефектоскопия», 5, 38, 1965.
3. А. А. Харкевич. Борьба с помехами, «Наука», 1965.
4. З. М. Коневский, М. И. Финкельштейн. Флуктуационные помехи и обнаружение импульсных радиосигналов, ГЭИ, 1963.
5. Б. Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники, «Советское радио», 1965.
6. Н. В. Смирнов и др. Курс теории вероятностей и математической статистики, «Наука», 1965.