

Анализ процесса выделения информации о
локальных изменениях пространственного
распределения поля излучения за
перемещающимся объектом

Воробьев В.А., Дзаконенко А.А., Покровский А.В.

Представлена объединенным семинаром секторов
ДСМ и ГРД НИИ ЭИ

Широко распространенный метод исследования пространственного распределения поля излучения за перемещающимся объектом основан на приеме излучения, прошедшего образец сцинтилляционным детектором, преобразовании его в электрический сигнал и последующем анализе этого сигнала [1, 2].

Сигнал в основном определяется локальными изменениями поля излучения, но также зависит от геометрических размеров коллиматора детектора. Детекторы обычно характеризуют разрешающей способностью, так как детектор с высоким разрешением позволяет найти различие между двумя близко расположенными неоднородностями поля, в то время как детектор с низким разрешением зарегистрирует их как одну. Детектор с меньшей площадью коллиматора дает лучшее разрешение. Положим, что неоднородность имеет сферическую форму и весьма мала по сравнению с размерами ожидаемых неоднородностей поля. Анализ проводим в прямоугольной системе координат. Ось X расположена в направлении перемещения объекта.

Неоднородность поля целиком попадает в поле зрения детектора. Это определяет одномерную функцию реакции детектора

$$f(x) = \int_a^b f(x, y) dy, \quad (I)$$

где пределы интегрирования берутся по величине коллиматора по оси y .

Функция, дающая суммарную реакцию на импульсные неоднородности, из которых складывается неоднородность определенного вида, запишется как $h(x' - x)$.

где x' — расстояние от $x = 0$ до переднего края неоднородности по направлению движения образца на детектор.

Тогда реакция детектора на неоднородность в точке (рис. I) описывается интегралом суперпозиции, вида

$$U(x') = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) h(x' - x) dx, \quad (2)$$

где $h(x' - x) = \begin{cases} A & \text{для } C \geq x' - x \geq 0 \\ 0 & \text{для } C < x' - x < 0 \end{cases}$

$f(x) = \begin{cases} D & \text{для } B \geq x \geq 0 \\ 0 & \text{для } B < x < 0 \end{cases}$

Выражение (2) аналогично интегралу, описывающему реакцию пассивного фильтра на входное воздействие [3], которое имеет вид

$$U_2(t) = \int_{-\infty}^{t_1} U_1(t) h(t_1 - t) dt. \quad (3)$$

В уравнении (3) реакция на единичное импульсное воздействие $U_1(t)$, а $h(t_1 - t)$ — импульсная характеристика во время. Перенесем эту аналогию на рассматриваемый случай. Тогда возмущение на выходе детектора при постоянной скорости перемещения объекта запишется в виде

$$U(t_1) = \int_{-\infty}^{t_1} f(\nu t) h(t_1 - \nu t) \nu dt, \quad (4)$$

где $x = \nu t$, t_1 — текущее время.

Спектральная характеристика для неоднородности определенной длины

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(t_1) e^{-j\omega t_1} dt. \quad (5)$$

Проведенная аналогия позволяет сделать заключение, что в данном случае детектор, с точки зрения формирования огибающей выходного сигнала, выступает как фильтр с передаточной функцией, способный изменить частотные составляющие выходного сигнала либо при изменении скорости движения, либо при изменении размеров коллиматора. Очевидно, что детектор-фильтр значительно меняет, как форму, так и частотный спектр сигнала от неоднородности $h(x' - x)$.

Используя передаточную функцию детектора, рассмотрим дальнейшие операции выделения полезного сигнала на фоне шумов. В соответствии с этим фильтры радиометрических систем радиационной дефектоскопии должны проектироваться так, чтобы полоса пропускания фильтра соответствовала диапазону частот, в котором сосредоточена основная доля энергии сигнала с детектора. При этом предполагается, что сигнал от неоднородностей имеет ограниченный диапазон частот, а шум имеет непрерывный спектр. Если имеет место периодический шум, то в этом случае значительное улучшение отношения сигнал-шум даст применение избирательного фильтра. Частотный спектр такого шума имеет вид серий дискретных линий различных амплитуд в составе основной частоты шума. Важно подчеркнуть, что неоднородность, как и шум, воспринимаются детектором, который сам является своего рода фильтром. Детектор с большими размерами коллиматора аналогичен фильтру с более узкой полосой пропускания и наоборот.

В теории информации обычно говорят об энтропии сигнала, которая характеризует в данном случае ожидаемую величину сигнала. При прохождении сигнала через линейный фильтр неизбежно сокращение энтропии его. Это сокращение равно [4]

$$\frac{1}{Z} \int_0^Z \ln h(f) df \quad (6)$$

где $h(f)$ — передаточная функция фильтра,
 Z — диапазон частот сигнала.

Иными словами, увеличение размеров коллиматора приводит к сокращению числа различных частотных составляющих сигнала детектора. Это способствует потерям энергии особенно для малых неоднородностей. Для передачи без потерь необходим преобразователь с плоской частотной характеристикой. Для дальнейшего повышения отношения сигнал-шум целесообразно, наряду с соответствующим выбором параметров детектора (коллиматора), применить в регистрирующей схеме непосредственно после детектора избирательный фильтр с той же полосой пропускания. Задача данного фильтра состоит в подавлении любых шумов с частотами вне диапазона пропускания фильтра.

Как следует из выражения (6) любая фильтрация на выходе системы дает дополнительные потери информации в обмен на повышение отношения сигнал-шум. В этом случае для увеличения информационной

способности измерительного тракта целесообразно применить корреляционный фильтр, действие которого основано на соответствующем расположении детекторов (рис.2).

Регистрирующее устройство (рис.3) состоит из источника излучения I, 2-х пар сцинтилляционных счетчиков 3,4 и 5,6, включенных между собой дифференциально. Пары сцинтилляционных счетчиков расположены на расстоянии l друг от друга по направлению движения изделия 2. Выходные сигналы детекторов проходят через катодные повторители 7,8 и 9,10 и затем вычитаются, например, на импульсных трансформаторах. Разностные сигналы $\Delta U(t)$ усиливаются усилителями I3, I4. Напряжение $\Delta U(t)$, выделяющееся на вторичных обмотках трансформаторов II, I2, состоит из полезного сигнала, характеризующего качество материала $U_c(t)$ и помехи $U_n(t)$

$$\Delta U(t) = U_c(t) + U_n(t) \quad (7)$$

Поскольку детекторы 3,4 смещены относительно детекторов 5,6 вдоль движения изделия, то сигнал, характеризующий качество изделия в области под счетчиками 3,4 $U_c(t)$, будет снят со счетчиков 5,6 с некоторым трансформаторным запаздыванием $\tau = l/v$ где l - расстояние между парами детекторов, v - скорость перемещения изделия.

В цепь усилителя I3 включен блок задержки I5. Сигналы с трансформаторов $\Delta U(t)$ и $\Delta U(t-\tau)$ подаются на коррелятор, состоящий из множительного I6 и интегрирующего I7 устройств. Выходной сигнал коррелятора включает следующие компоненты (5):

$$\begin{aligned} R_{12}(\tau) &= [U_c(t) + U_n(t)][U_c(t-\tau) + U_n(t+\tau)] = \\ &= U_c(t)U_c(t+\tau) + U_c(t)U_n(t+\tau) + U_n(t)U_c(t+\tau) + \\ &+ U_n(t)U_n(t+\tau) \end{aligned} \quad (8)$$

Первый и последний члены являются функциями автокорреляции полезного сигнала и шума соответственно, а оставшиеся два члена - функциями взаимной корреляции между сигналом и шумом. Функция $R_{n,n_s}(\tau)$ убывает до нуля, когда сдвиг τ становится настолько большим, что корреляционные связи флуктуационного процесса практически утрачиваются (рис.4). Взаимная корреляция между сигналом и шумом отсутствует в силу отсутствия статистической связи

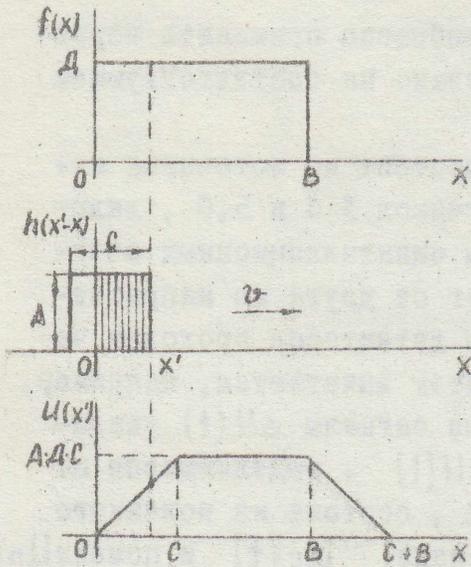


Рис.1.

Нахождение напряжения на выходе сцинтилляционного детектора.

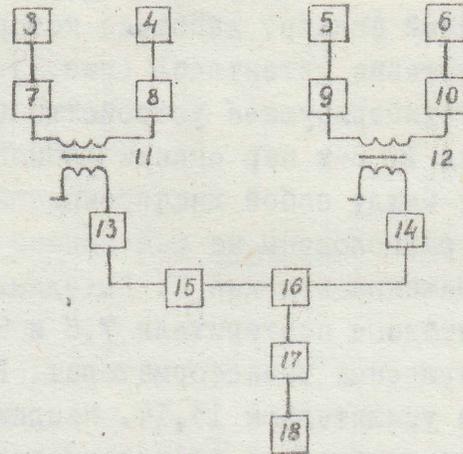


Рис.3.

Блок-схема устройства регистрации.

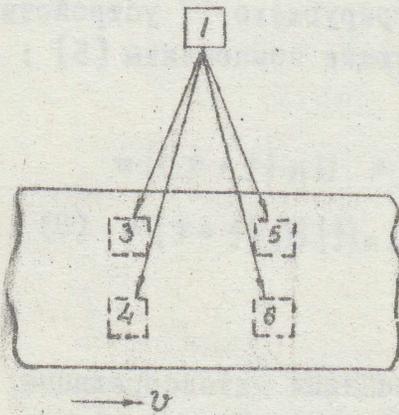


Рис.2.

Схема расположения детекторов излучения.

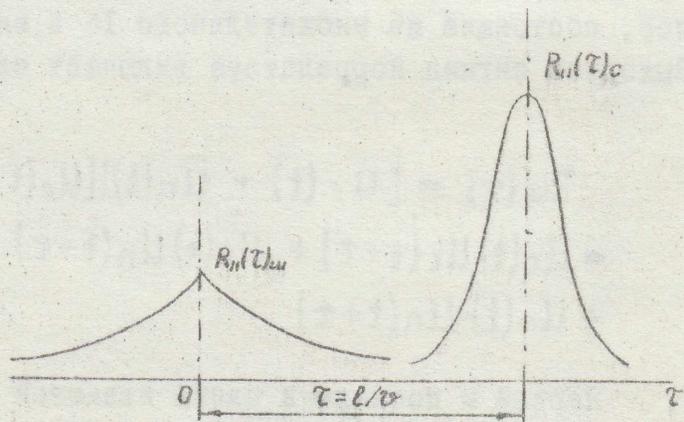


Рис.4.

График функции взаимокорреляции сигналов $\Delta U(t)$ и $\Delta U(t-\tau)$.

между сигналом и шумом. Таким на выходе коррелятора остается только компонент пропорциональный функции взаимной корреляции полезного сигнала вида

$$R_{12}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{t-\tau}^t U_c(t) U_c(t-\tau) dt. \quad (9)$$

Регистрирующее устройство ИВ фиксирует взаимокорреляционную функцию (9). Этот способ выделения информации о локальных изменениях пространственного поля излучения дает эффективность шумоподавления $P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$ до 40.

Таким образом, повышение чувствительности радиометрического метода регистрации возможно путем соответствующего выбора передаточной функции детектора с оптимальными частотными характеристиками. Передаточная функция определяется геометрическими размерами коллиматора и скоростью контроля. Оптимальным фильтром является взаимокорреляционное устройство, уменьшающее влияние не только статистических шумов радиометрического тракта, но и шумов источника получения и внешней среды при соответствующем расположении детекторов излучения.

Л и т е р а т у р а

1. Горбунов В.И., Кармадонов А.Н., Пикалкин Ю.В., Покровский А.В. Разработка новых схем регистрации для бетатронных дефектоскопов. Труды У конф. по электронным ускорителям, Атомиздат, 1966.

2. Недавний О.И. Кандидатская диссертация, Томск, 1967.

3. Вайнштейн Л.А., Зубаков В.Д. Выделение сигналов на фоне случайных помех. Изд. "Советское радио", М., 1960.

4. Солодов А.В. Теория информации и ее применение к задачам автоматического управления и контроля. Изд. "Наука", М., 1967.

5. Ли И.В. Применение корреляционного анализа для обнаружения периодических сигналов в шуме. Сборник Теория информации и ее приложения. Изд. физмат. литературы, М., 1959.