

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ РАСЧЕТА РАДИАЦИОННОГО ИНТРОСКОПА

В. И. ГОРБУНОВ, А. П. ШПАГИН

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института ядерной физики)

В настоящей работе мы рассмотрим одну из распространенных блок-схем радиационного интроскопа, состоящую из источника излучения, контролируемого объекта, преобразователя, объектива, электронно-оптического усилителя (ЭОУ), объектива, передающей телевизионной трубки типа суперортикон, канала передачи видеосигнала и приемной трубки. Методов расчета таких интроскопов пока нет, при выборе оптимальных режимов обычно пользуются экспериментальными зависимостями.

Представляет несомненный интерес попытка применить для расчета такого интроскопа метод частотно-контрастных характеристик (ЧКХ). Так как возможность применения этого метода для оценки оптических и электронно-оптических систем была рассмотрена в литературе [1, 2], то здесь мы остановимся подробнее на телевизионной системе. Известно, что в общем случае передающая телевизионная трубка не является линейным звеном, однако, в области низкой освещенности (а именно, в этом диапазоне работает передающая трубка в радиационном интроскопе) световая характеристика близка к линейной. Учитывая это, а также то, что передаваемый контраст обычно невелик, заключаем, что применение метода частотноконтрастных характеристик возможно и для передающей трубки. Преобразователь обычно линеен. Нелинейность модуляционной характеристики кинескопа можно корректировать в канале передачи, а так как основную роль в шумах на выходе играют шумы передающей трубки, то это не изменяет выходного отношения сигнал/шум. Таким образом, можем считать, что все звенья интроскопа линейны, тогда общую ЧКХ интроскопа можно найти перемножением ЧКХ характеристик звеньев. Для того, чтобы исключить влияния масштабов, необходимо только привести их к формату кадра. Все звенья полагали изотропными, что позволяет характеризовать каждое звено одной ЧКХ. На рис. 1 представлены ЧКХ отдельных звеньев интроскопа. Здесь 1 — ЧКХ ЭОУ типа ПИМ-3 при размере кадра $12 \times 16 \text{ мм}^2$ [2], 2 — ЧКХ — телевизионного объектива „Таир-11“ пересчитанная к формату $12 \times 16 \text{ мм}$ [3], 3 — ЧКХ кинескопа 4ОЛК-16 [4], 4 — ЧКХ передающей телевизионной трубки ЛИ-17, приведенная к формату $24 \times 32 \text{ мм}^2$ [5], 5 — общая ЧКХ всего тракта, начиная с ЭОУ. Для оценки всего

интроскопа необходимо знать еще ЧКХ преобразователя. Вследствие влияния рассеянного излучения ЧКХ преобразователя будет изменяться с изменением геометрии просвечивания и, по сути дела, будет характеристикой геометрии просвечивания при данном конкретном преобразователе. В литературе нет данных по ЧКХ преобразователя, непосредственное их измерение невозможно ввиду отсутствия тестов, в связи с чем для определения ЧКХ мы использовали следующий

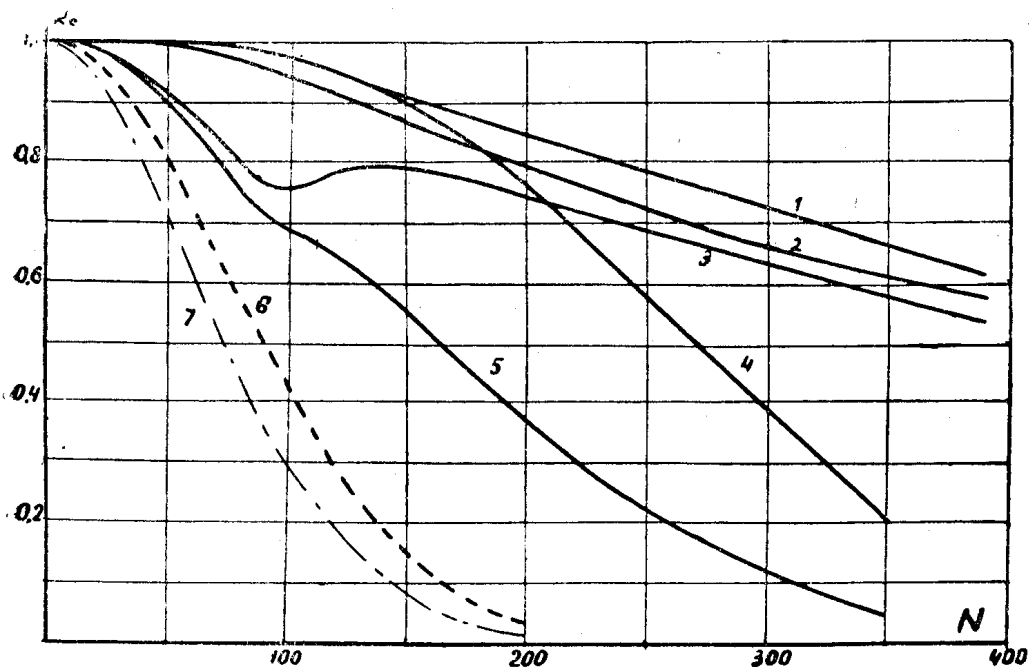


Рис. 1. Частотно-контрастные характеристики

прием. Фотографировали изображение узкой щели на преобразователе, микрофотометрировали его в направлении, перпендикулярном щели. Полученная кривая при достаточно узкой щели являлась функцией рассеяния $B(x)$ [1]. Используя известное соотношение между функцией рассеяния и ЧКХ

$$K(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} B(x) e^{-j\omega x} dx, \quad (1)$$

можно найти ЧКХ.

Для преобразователя NaJ(Tl) толщиной 10 мм и площадью 120×160 мм², удаленного от мишени бетатрона на 2 м, оказалось, что функция рассеяния может быть аппроксимирована функцией Гаусса.

$$B(x) = \frac{1}{v\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2v^2}}, \quad (2)$$

где v — полуширина изображения щели на уровне 0,61, выраженная в долях горизонтального размера кадра

$$v = 0,206 \cdot 10^{-2}.$$

Тогда

$$K(\omega) = e^{-\frac{(v\omega)^2}{2}}. \quad (3)$$

Подставляя значение ν и учитывая, что $\omega = 2\pi N$, получим

$$K(N) = e^{-0,86 \cdot 10^{-4} N^2}. \quad (4)$$

По формуле (4) была вычислена кривая 6 (рис. 1) — ЧКХ преобразователя.

Пренебрегая ЧКХ первого объектива, которая при размерах экрана 120×160 мм близка к единице, найдем ЧКХ интроскопа 7, перемножая кривые 5 и 6, аппроксимируя которую функцией

$$K_1(\omega) = e^{-\frac{(\nu_1 \omega)^2}{2}}, \quad (5)$$

найдем $\nu_1 = 0,266 \cdot 10^{-2}$ и функцию рассеяния

$$B_1(x) = \frac{1}{\nu_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\nu_1^2}}. \quad (6)$$

Используя полученную ЧКХ и функцию рассеяния интроскопа, можно рассчитать параметры изображения на выходе интроскопа, если известна функция распределения толщины дефектометра (так же, как рассчитывают импульсы на выходе электрических цепей). Выше мы полагаем, что коэффициент передачи звеньев на нулевой частоте равен 1. В общем случае следует все выражения для $K_1(\omega)$ умножить на коэффициент передачи на нулевой частоте.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть имеем дефект в виде прямоугольной канавки (дефектометр с канавками), обозначим ширину канавки e , а глубину ее Δ , длину полагаем равной высоте кадра. Функция распределения такого дефекта примет вид

$$f(x) = \begin{cases} d & (x \leq 0) \\ d - \Delta \left(0 < x < \frac{l}{160}\right) & \\ d & (x \geq e/160) \end{cases}$$

Если провести аналогию с электрическими цепями, то такая функция распределения дефекта эквивалентна наличию на входе цепи постоянной составляющей

$$I_0 = n_0 E S \tau e^{-\mu d} \quad (8)$$

и прямоугольного импульса с амплитудой

$$C = n_0 E S \tau e^{-\mu d} \mu \Delta, \quad (9)$$

где E — энергия одного кванта;

n_0 — число гамма-квантов, падающее на 1 см^2 преобразователя при отсутствии контролируемого изделия;

S — площадь преобразователя в см^2 , τ — время кадра, μ — линейный коэффициент ослабления „узкого пучка“ излучения в материале контролируемого изделия.

Если коэффициент передачи интроскопа на нулевой частоте K_0 , то используя обычные методы расчета импульсов на выходе электрических цепей [6], получим:

$$f_1(x) = K_0 C \left[\Phi\left(\frac{x}{\nu_1 \sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{x - \frac{l}{160}}{\nu_1 \sqrt{2}}\right) \right], \quad (10)$$

где $\Phi(z_0)$ —интеграл Лапласа имеет вид $\Phi(z_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_0} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$, значения $\Phi(z_0)$ отыскиваются по таблицам.

Нетрудно заметить что функция $f_1(x)$ имеет максимум при $x = \frac{l}{320}$, подставляя это значение аргумента в выражение (10), получим

$$f_{1\max}(x) = 2K_0 C \Phi\left(\frac{l}{450v_1}\right). \quad (11)$$

При определении шума на выходе интроскопа будем исходить из двумерной ЧКХ интроскопа, которую вследствие изотропности системы можно записать следующим образом:

$$K(\omega, \Omega) = K_0 e^{-\frac{v_1^2}{2}(\omega^2 + \Omega^2)}. \quad (12)$$

Шум на выходе обусловлен большим числом равномерно распределенных вспышек. Такой шум имеет равномерный энергетический спектр (по крайней мере для частот, подчиняющихся условию $\omega\Omega s_0 \ll 1$, где s_0 — площадь одной вспышки).

Можно показать, что плотность распределения такого шума равна [7]

$$p(\omega, \Omega) = 4n_0 E^2 S \tau e^{-\nu d}. \quad (13)$$

Пренебрегая влиянием дефекта на шум, можно корреляционную функцию шума на выходе интроскопа найти из выражений (7), (8):

$$\psi(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(\omega, \Omega) [K(\omega, \Omega)]^2 e^{-j(\omega x + \Omega y)} d\omega d\Omega. \quad (14)$$

Подставляя значения $p(\omega, \Omega)$ и $K(\omega, \Omega)$ и произведя интегрирование, получим

$$\psi(x, y) = \frac{K_0^2 E l_0}{\pi v_1} e^{-\left(\frac{x^2 + y^2}{4v_1^2}\right)}. \quad (15)$$

Значение корреляционной функции при $x = 0, y = 0$ дает дисперсию [8]

$$\sigma^2 = \psi(0, 0) = \frac{K_0 E l}{\pi v_1}. \quad (16)$$

Определенное нами значение шума представляет собой только одну компоненту шума на выходе интроскопа, а именно, шум, обусловленный статистической природой излучения; в реальном интроскопе в каждом звене будет создаваться свой шум, дисперсию которого на выходе можно определить, повторяя приведенные выше рассуждения, только вместо ЧКХ всего интроскопа подставлять в формулу (14) ЧКХ последующих звеньев. Общий шум на выходе будет равен корню квадратному из суммы дисперсий всех компонент. Здесь мы ограничимся определением чувствительности интроскопа, в котором шумы обусловлены только статистической природой излучения.

Для обнаружения сигнала в шуме необходимо выполнение условия

$$f_{1\max}(x) = \varphi\sigma, \quad (17)$$

где φ — отношение сигнал/шум, необходимое для обеспечения заданной вероятности обнаружения и ложной тревоги. Если подставить в выражение (17) значение $f_{1\max}(x)$ и σ и преобразовать с учетом (8) и (9), можно получить

$$\Delta_{\min} = \frac{\varphi e^{0,5\mu d}}{2v_1\mu \sqrt{\pi n_0 S \tau} \Phi\left(\frac{l}{450v_1}\right)}. \quad (18)$$

По формуле (18) были вычислены значения Δ_{\min} для каналов шириной $l=0,1$ мм, $l=1$ мм и $l=10$ мм для трех толщин контролируемого изделия.

Таблица 1

d (см)	Δ_{\min} (мм)		
	$l=0,1$ мм	$l=1$ мм	$l=10$ мм
5	1,4	0,14	0,043
10	2,5	0,25	0,076
20	7,7	0,82	0,246

При расчете были приняты следующие значения коэффициентов: $\varphi = 2$, $v_1 = 0,266 \cdot 10^{-2}$, $n_0 = 10^{-9}$, $\frac{1}{\text{сек} \cdot \text{см}}$, $S = 192 \text{ см}^2$, $\mu = 0,233 \frac{1}{\text{см}}$, $\tau = 0,04 \text{ сек}$. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Нетрудно заметить, что v_1 является в определенном смысле параметром интроскопа, характеризующим способность интроскопа усреднять по поверхности. С целью проследить, как изменяется чувствительность интроскопа при изменении параметра, были рассчитаны значения Δ_{\min} при $d = 10$ см и нескольких значениях v_1 . Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

($v_0 = 0,266 \cdot 10^{-2}$)

v_1	Δ_{\min} (мм)			χ/χ_0 %		
	$l=0,1$ мм	$l=1$ мм	$l=10$ мм	$l=0,1$ мм	$l=1$ мм	$l=10$ мм
$0,5 v_0$	2,37	0,344	0,152	13,2	91	100
v_0	2,4	0,25	0,76	6,4	60	100
$2 v_0$	2,4	0,23	0,038	3,2	33	100
$4 v_0$	2,4	0,225	0,020	1,6	16	97

В некоторых случаях значение минимального обнаруживаемого дефекта ограничивается не отношением сигнал/шум, а минимальным контрастом дефекта. В связи с этим представляет интерес определить

коэффициент передачи контраста интроскопом. Если определить контраст формулой

$$\chi = \frac{W_{\max} - W_{\min}}{W_{\min}}, \quad (19)$$

где W_{\max} и W_{\min} соответственно минимальная и максимальная плотность энергии, то нетрудно найти, что коэффициент передачи контраста интроскопом определится выражением

$$\frac{\chi}{\chi_0} = 2\Phi\left(\frac{l}{450v_1}\right). \quad (20)$$

В табл. 2 приведены значения χ/χ_0 для $d = 10$ см и при нескольких значениях v_1 , в зависимости от ширины канавки.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что применение метода ЧКХ позволяет проводить достаточно полный расчет интроскопов.

По результатам табл. 2 можно сделать следующие выводы. При увеличении v_1 чувствительность интроскопа повышается и практически достигает максимального значения при $v_1 = (3 \div 4)l$, коэффициент передачи контраста, наоборот, уменьшается при увеличении v .

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Раутман. Успехи физических наук. 66, 3, 475. Физматгиз, 1958.
2. В. Р. Муратов, Е. В. Нилов. Успехи научной фотографии, X, 156, «Наука», 1964.
3. А. Г. Ащеулов, Н. П. Березин. Успехи научной фотографии, X--15, «Наука», 1964.
4. Е. Л. Орловский, Н. П. Халфин и др. Теоретические основы электрической передачи изображений. «Сов. радио», М., 1962.
5. М. Н. Кривошеев. Основы телевизионных измерений. «Связь», М., 1964.
6. Н. Г. Мамонкин. Импульсные усилители, Госэнергоиздат, М.—Л., 1958.
7. И. С. Гоноровский. Радиотехнические цепи и сигналы. «Сов. радио», М., 1964.
8. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей, Физматгиз. М., 1962.