

14. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов.— М.: Мир, 1974.
15. Патрушев Г. Я., Печеркина Т. П. Программа статистического анализа узкополосных случайных процессов // Алгоритмы и программы.— 1982.— № 3.
16. Патрушев Г. Я., Петров А. И., Покасов В. В. Флуктуации интенсивности при зеркальном отражении оптических пучков в турбулентной атмосфере // Изв. вузов. Радиофизика.— 1983.— № 7.
17. Монастырский Е. А., Патрушев Г. Я., Петров А. И., Покасов В. В. Временные спектры флуктуаций интенсивности на трассе с отражением // Изв. вузов. Радиофизика.— 1984.— № 7.
18. Монастырский Е. А., Патрушев Г. Я., Покасов В. В. Экспериментальные исследования влияния флуктуирующего ветра на временные характеристики световой волны // Радиотехника и электроника.— 1986.— № 1.
19. Патрушев Г. Я., Петров А. И. О статистических характеристиках флуктуаций интенсивности оптических пучков в турбулентной атмосфере при дожде // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана.— 1986.— Т. 22, № 10.

Поступила в редакцию 27 января 1986 г.

УДК 621.391.8:519.2

В. П. ГОРБУНОВ, Ф. М. ЗАВЬЯЛКИН, В. И. СОЛОДУШКИН, В. А. УДОД

(Томск)

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ДИСКРЕТНЫМ СКаниРОВАНИЕМ РАДИАЦИОННОГО ПОЛЯ

При проектировании радиометрических сканирующих систем возникает необходимость выбора оптимальных в определенном смысле значений их основных параметров и характеристик. Между тем многообразие задач, решаемых при помощи различных измерительных систем, обуславливает существование различных критериев оптимальности их функционирования. Выбор того или иного критерия определяется содержанием исследуемой задачи. При этом важную роль играет априорная информация об объекте исследования. При ее отсутствии или недостаточности для проектирования системы целесообразно использовать критерий, обладающий определенной степенью общности.

В фото-, кино- и телевизионных системах, а также в ряде разработанных в настоящее время систем вычислительной томографии и протоскопии за оценку качества функционирования систем принимают пространственное разрешение и контрастную чувствительность [1—9]. Пространственное разрешение характеризует способность раздельного воспроизведения системой различных структурных элементов в объекте исследования при 100%-ном контрасте и количественно выражается, как правило, через функцию передачи модуляции системы [1, 4, 5, 7—9]. Контрастная чувствительность определяется как минимальное отклонение в распределении значений исследуемого параметра, которое при наличии шума может быть выявлено с заданной вероятностью и количественно выражается через отношение сигнал/шум (ОСШ). В системах вычислительной томографии получила распространение оценка качества, известная под названием «контрастно-детальная чувствительность» [5, 6]. Данная характеристика представляет собой зависимость минимального контраста детали, выявляемой на томограмме, от размеров этой детали в контролируемом сечении.

Однако, как следует из экспериментальных результатов [5, 6], вышеуказанные характеристики не отражают способности раздельного воспроизведения системой малоконтрастных деталей радиационного поля объекта исследования при наличии шума, что в ряде случаев имеет важное значение.

Целью настоящей работы является получение характеристики, отражающей указанную способность систем и позволяющей корректно по-

дойти к задаче оптимального выбора основных параметров. Применительно к радиометрическим системам с дискретным сканированием радиационного поля к таковым можно отнести размер апертуры детектора в направлении сканирования и шаг дискретизации.

Для решения данной задачи предположим, что радиационное поле, сформированное пуассоновским источником излучения за объектом исследования (ОИ), сканируется построчно и в пределах каждой строки описывается функцией вида

$$R(x) = N_0 \exp\left(-\int_{-\infty}^{+\infty} \mu(x, u) du\right),$$

т. е. предполагается, что вариации поля происходят в одном направлении. Здесь N_0 — плотность потока квантов, падающих на ОИ; $\mu(x, u)$ — линейный коэффициент ослабления излучения по толщине ОИ.

Для однородного ОИ с постоянной толщиной H , содержащего однородную дефектную прослойку (ДП), получаем

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \mu(x, u) du = \mu_{\text{ОИ}} H - \Delta\mu S(x),$$

где $\Delta\mu = \mu_{\text{ОИ}} - \mu_{\text{Д}}$; $\mu_{\text{ОИ}}$, $\mu_{\text{Д}}$ — линейные коэффициенты ослабления излучения материалом бездефектного участка ОИ и материалом ДП соответственно; $S(x)$ — функция, описывающая изменения толщины ДП, относительно которой предполагается, что она периодическая с периодом T , причем

$$\max_x S(x) = \max_{|x-y| \leq T} |S(x) - S(y)| = \Delta H.$$

Величина $|\Delta\mu| \Delta H$ — контраст радиационного поля, а величина $a = T/2$ — размер разрешаемого элемента поля в направлении сканирования (предположительно осуществляемом вдоль оси x). Тогда при условии $|\Delta\mu| S(x) \ll 1$ (приближение малого контраста), что в большинстве задач радиационной дефектоскопии (диагностики) представляет наибольший практический интерес, получаем

$$R(x) \approx R_0(x) = N_0 (\exp(-\mu_{\text{ОИ}} H)) (1 + \Delta\mu S(x)).$$

Следует заметить, что ОИ, содержащий ДП, толщина которой описывается пространственно-периодической функцией $S(x)$ прямоугольного профиля, выступает своеобразным «радиационным» аналогом итриховой миры — тест-объекта, используемого в оптике для экспериментальной оценки пространственного разрешения оптических систем [4].

При сканировании поля на выходе детектора радиометрической системы, использующей пуассоновский источник излучения, наблюдается процесс во времени в виде пуассоновской последовательности кратковременных импульсов, который согласно [2] с точностью до первых двух начальных моментов можно представить следующим образом:

$$Z(t) = \lambda(t) + \sqrt{\lambda(t)} n(t),$$

где $n(t)$ — белый шум с нулевым средним значением ($\overline{n(t)} = 0$) и единичной спектральной плотностью; $\lambda(t)$ — интенсивность пуассоновской последовательности импульсов, которая при прямолинейном равномерном сканировании поля со скоростью v вдоль оси x представима в виде

$$\lambda(t) = \alpha \left[1 + \Delta\mu \frac{v}{b} \int_{t-b/2v}^{t+b/2v} S(v\tau) d\tau \right]$$

или

$$\lambda(t) = \alpha [1 + \Delta\mu S(vt) * vh(vt)],$$

где $\alpha = N_0 \exp(-\mu_{\text{оп}} H) \varepsilon g b$; ε — эффективность регистрации детектора; b, g — соответственно длина и ширина апертуры детектора; функция

$$h(x) = \frac{1}{b} \text{rect}\left(\frac{x}{b}\right) = \begin{cases} 1/b, & |x| \leq b/2; \\ 0, & |x| > b/2 \end{cases}$$

представляет собой импульсный отклик апертуры детектора в направлении сканирования; символ «*» означает свертку.

Используя приближение малого контраста ($|\Delta\mu|\Delta H \ll 1$), будем полагать, что интенсивность «шумовой» составляющей процесса $Z(t)$ постоянна и равна α , т. е. $Z(t) = \lambda(t) + \sqrt{\alpha}n(t)$. Такая аппроксимация уже использовалась ранее в работе [3].

Результат прохождения процесса $Z(t)$ через сглаживающий линейный фильтр в установившемся режиме измерений (при достаточно больших t) можно представить в виде

$$\xi(t) = \alpha[1 + \Delta\mu S(vt) * vh(vt) * \varphi(t)] + \sqrt{\alpha}n(t) * \varphi(t),$$

где $\varphi(t)$ — импульсный отклик сглаживающего фильтра.

Отображение результатов измерений в радиометрических системах осуществляется в виде записи на диаграммной ленте самописца. Абстрагируясь от физической сущности такого преобразования, с математической точки зрения можно сказать, что регистрирующее устройство осуществляет отображение функции времени $\xi(t)$ в некоторую функцию $U(x)$ пространственной переменной. Вид такого отображения может быть различным. В наиболее простом случае $U(x)$ определяется следующим образом: $U(x) = \xi(x/v')$. Это соответствует ситуации, когда диаграммная лента равномерно перемещается в самописце со скоростью v' . С целью согласования масштабов и функций $U(x)$ и $R(x)$ необходимо, чтобы выполнялось условие $v' = v$. В этом случае будем иметь

$$U(x) = \alpha[1 + \Delta\mu S(x) * h(x) * \varphi_0(x)] + \sqrt{\alpha}vn(x) * \varphi_0(x),$$

где

$$U(x) = \xi(x/v); \varphi_0(x) = \varphi(x/v)/v.$$

Рассмотрим отношение

$$M = \frac{\max_{|x-y| \leq T} |\bar{u}(x) - \bar{u}(y)|}{\sigma}, \quad (1)$$

здесь σ^2 — дисперсия процесса $U(x)$.

Данное выражение представляет собой ОСШ на пространственной частоте $\nu = 1/T$. Считаем, что с некоторой вероятностью система воспроизводит отдельные элементы строки радиационного поля с размером $a = T/2$ в направлении сканирования и радиационным контрастом $|\Delta\mu|\Delta H$, если при этом значение величины M не ниже некоторого порогового.

В дальнейшем выражение (1) используем как критерий и проведем выбор основных параметров радиометрических систем с дискретным сканированием на его основе.

При дискретном режиме измерения процесс на выходе детектора системы можно представить в виде

$$\xi(t) = \alpha[1 + \Delta\mu(S * h)(kl)] + \sqrt{\alpha}n(t), \\ k\delta \leq t < (k+1)\delta, \quad k = 0, 1, \dots,$$

где l — величина шага дискретизации; δ — время, в течение которого апертура детектора находится в одной позиции (постоянно на каждом шаге). Применяя для сглаживания процесса $\xi(t)$ интегратор с постоянной времени δ , получим последовательность отсчетов

$$U_k = \alpha[1 + \Delta\mu(S * h)(kl)] + C_k.$$

Здесь C_k — случайная величина, причем $\bar{C}_k = 0$, $\delta C_k^2 = \alpha/\delta$ для любого k .

В этом случае выражение M имеет вид

$$M = \sqrt{\alpha\delta} \max_{|kl - ml| < 2a} |(S * h)(kl) - (S * h)(ml)|.$$

В качестве $S(x)$ возьмем функцию

$$S(x) = \Delta H \sum_{h=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x - 2ak + \psi}{a}\right),$$

где ψ ($0 \leq \psi \leq 2a$) — некоторая фаза. В этом случае соответствующая ей строка радиационного поля характеризуется резкими перепадами по амплитуде. Тогда

$$M = \sqrt{\alpha\delta} (\Delta H) V,$$

где

$$V = \max_{|kl - ml| < 2a} |(S_0 * h)(kl) - (S_0 * h)(ml)|; \quad S_0 = \sum_{h=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x - 2ak + \psi}{a}\right).$$

Величину V можно интерпретировать как коэффициент передачи амплитудной модуляции системой на пространственной частоте $\nu = 1/2a$. Заметим, что согласно [5] выборочное значение параметра b должно лежать в интервале $[0, 2a]$. Выборочное значение параметра l , очевидно, следует брать из интервала $[0, a]$.

Вследствие того что значение величины V для произвольного значения l в общем случае не будет постоянным для различных значений ψ , целесообразно для дальнейшего анализа использовать величину $V_{\min} = \min_{\psi} V$. В результате проведенных расчетов $V_{\min} = (2 \min(a, b) - b)/b$ при $0 < l \leq |a - b|$ и

$$V_{\min} = \begin{cases} \left[\frac{a}{l} \right] \frac{l}{b}, \left[\frac{a}{l} \right] \leq \frac{a - b - l + 2 \min(a, b)}{2l}; \\ \frac{a - b - l + 2 \min(a, b)}{2b}, \frac{a - b - l + 2 \min(a, b)}{2l} \leq \\ \leq \left[\frac{a}{l} \right] \leq \frac{a - b - l + 2 \max(a, b)}{2l}; \\ \frac{2a - l}{b} - \left[\frac{a}{l} \right] \frac{l}{b}, \frac{a - b - l + 2 \max(a, b)}{2l} \leq \left[\frac{a}{l} \right] \end{cases}$$

при $|a - b| \leq l \leq a$. Здесь $[a/l]$ — целая часть числа a/l .

Максимум выражения $M_{\min} = \sqrt{\alpha\delta} (\Delta H) V_{\min}$ достигается при $b \rightarrow a$, $l \rightarrow 0$ и равен $(\Delta H) \sqrt{N_0 \epsilon g \tau} \exp(-\mu_{\text{OH}} H)$. Но при $l \rightarrow 0$ время сканирования строки неограниченно возрастает. В практической же ситуации оно всегда конечно. Используя это обстоятельство, положив $\delta = l\tau/L$, будем иметь

$$M_{\min} = (\Delta H) P \sqrt{b l} V_{\min}, \quad (2)$$

где $P = \frac{\sqrt{N_0 \epsilon g \tau} \exp(-\mu_{\text{OH}} H)}{\sqrt{L}}$; L, τ — соответственно длина и полное время сканирования строки радиационного поля.

Максимум выражения (2) достигается при

$$b_{\text{опт}} = a, \quad l_{\text{опт}} = 2a/3. \quad (3)$$

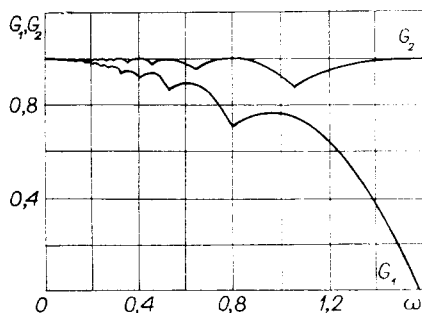
Заметим, что для $b_{\text{опт}}, l_{\text{опт}}$ выполняется $V_{\max} = \max_{\psi} V = V_{\min} = 2/3$.

При подстановке соотношений (3) в выражение (2) получаем

$$M_{\min} = 0,544a (\Delta H) P. \quad (4)$$

В этом выражении произведение $M_1 = (\Delta H) a P$ представляет собой максимально возможное значение ОСШ, которое достигается при $\psi = 0$,

Рис. 1. Минимальное $G_1(\omega)$ и максимальное $G_2(\omega)$ значения коэффициента передачи амплитудной модуляции оператора дискретизации со ступенчатой интерполяцией; $\omega = \pi\nu l$; ν — пространственная частота; l — величина шага дискретизации



$b = l = a$ и соответствует случаю, когда апертура детектора в точности перекрывается одним элементом строки радиационного поля на каждом шаге скапирования.

Возьмем теперь в качестве $S(x)$ функцию

$$S(x) = \frac{(\Delta H)}{2} \left(\sin \left(\frac{\pi}{a} (x + \psi) \right) + 1 \right).$$

Соответствующая ей строка радиационного поля будет характеризоваться плавными перепадами по амплитуде. В этом случае выражение M принимает вид

$$M = \sqrt{\alpha \delta} (\Delta H) |\Phi(\nu)| F(\nu, \psi).$$

Здесь $\nu = 1/2a$ — пространственная частота; $\Phi(\nu) = (\sin \pi\nu b) / \pi\nu b$ — передаточная функция апертуры детектора в направлении сканирования. Функцию

$$F(\nu, \psi) = \frac{1}{2} \max_{|k-l| \leq 1/\nu} |\sin 2\pi\nu(kl + \psi) - \sin 2\pi\nu(ml + \psi)|$$

можно интерпретировать как коэффициент передачи амплитудной модуляции оператора дискретизации со ступенчатой интерполяцией. При этом функции $F_{\max}(\nu) = \max_{\psi} F(\nu, \psi)$ и $F_{\min}(\nu) = \min_{\psi} F(\nu, \psi)$ равны

$$F_{\max}(\nu) = \sin \left(\pi\nu l \left[\frac{1}{2\nu l} + \frac{1}{2} \right] \right);$$

$$F_{\min}(\nu) = \sin \left(\pi\nu l \left(1 + \left[\frac{1}{2\nu l} \right] \right) \right) \sin \left(\pi\nu l \left[\frac{1}{2\nu l} \right] \right)$$

и соответственно могут быть интерпретированы как максимальное и минимальное значения коэффициента передачи амплитудной модуляции на пространственной частоте ν оператора дискретизации со ступенчатой интерполяцией. Здесь $[d]$ — целая часть числа d . На рис. 1 приведены графики функций

$$G_1(\omega) = F_{\max}(\omega/\pi l); \quad G_2(\omega) = F_{\min}(\omega/\pi l).$$

Для дальнейшего анализа целесообразно использовать выражение

$$M_{\min} = \sqrt{\alpha \delta} (\Delta H) |\Phi(\nu)| F_{\min}(\nu).$$

Максимум данного выражения достигается при $b \rightarrow 0,74a$; $l \rightarrow 0$ и равен $0,678 (\Delta H) \sqrt{N_0 \varepsilon g a \delta} \exp(-\mu_{\text{оп}} H)$.

Используя ограничение на время сканирования строки, полагая $\delta = l\tau/L$, будем иметь

$$M_{\min} = (\Delta H) P \sqrt{b l} |\Phi(\nu)| F_{\min}(\nu).$$

Зависимость величины M_{\min} от параметров b , l для заданной частоты ν можно представить в виде

$$M_{\min} = \frac{(\Delta H) P}{\pi\nu} \frac{\sin x}{\sqrt{x}} \sqrt{y} \sin \left(y \left(1 + \left[\frac{\pi}{2y} \right] \right) \right) \sin \left(y \left[\frac{\pi}{2y} \right] \right), \quad (5)$$

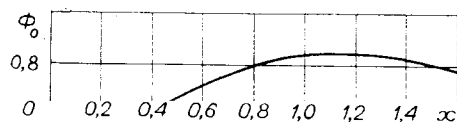


Рис. 2. Зависимость отношения $\sin x/\sqrt{x}$ от величины x ; $x = \pi vb$; v — пространственная частота; b — размер апертуры детектора в направлении сканирования

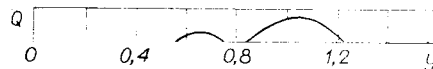


Рис. 3. Зависимость произведения $Q(y) = VyG_1(y)$ от величины y ; $y = \pi vl$; v — пространственная частота; l — величина шага дискретизации

где $x = \pi vb$; $y = \pi vl$. На рис. 2, 3 приведены графики функций

$$\Phi_0(x) = \sin x/\sqrt{x};$$

$$Q(y) = V\bar{y} \sin\left(y\left(1 + \left[\frac{\pi}{2y}\right]\right)\right) \sin\left(y\left[\frac{\pi}{2y}\right]\right)$$

соответственно.

В результате численных расчетов получено, что максимум выражения (5) достигается при

$$b_{\text{опт}} = 0,74a; \quad l_{\text{опт}} = 2a/3. \quad (6)$$

Подставляя соотношение (6) в выражение (5), имеем

$$M_{\text{min}} = 0,42a(\Delta H)P. \quad (7)$$

Выражение $M_2 = 0,54a(\Delta H)P$ представляет собой максимально возможное значение ОСШ, которое достигается при $b = 0,74a$; $l = a$; $\psi = a/2$ и соответствует случаю, когда центр апертуры при сканировании в точности совпадает с координатами максимумов и минимумов функции синусоидального профиля с периодом, равным $2a$.

ОСШ (выражение (4)), полученное в случае сканирования строки радиационного поля с резкими перепадами по амплитуде, составляет приблизительно 54% от своего максимально возможного значения, определяемого из ограничения на полное время сканирования строки. Аналогично при сканировании строки поля с плавными перепадами по амплитуде ОСШ (выражение (7)) составляет приблизительно 78% от своего максимально возможного значения.

Как видно из (3), (4), (6) и (7), форма функции $S(x)$ не оказывает существенного влияния на выбор оптимальных значений параметров b , l и соответствующих им значений M_{min} . Наибольшее отличие в выражениях (4) и (7) объясняется тем, что импульсная переходная функция апертуры детектора в направлении сканирования является согласованной по форме с функцией

$$S(x) = (\Delta H) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x - 2ak + \psi}{a}\right).$$

Полученные соотношения (3) — (7) могут быть взяты за основу при проектировании радиометрических систем с дискретным сканированием радиационного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров Г. А. Радиационная интроскопия: Кодирование информации и оптимизация эксперимента. — М.: Энергоатомиздат, 1982.
2. Вяземский В. О. Ошибки воспроизведения значения интенсивности случайного импульсного потока по его реализации // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. — 1976. — № 5.

3. Горбунов В. П., Горбунов В. М., Завьялкин Ф. М., Квасница М. С. Влияние усреднения измеряемой характеристики изделия в поле зрения детектора на выбор радиометрического устройства // Дефектоскопия.— 1976.— № 2.
4. Вычислительная оптика: Справочник/Под ред. М. М. Русилова, А. И. Грамматина, П. Д. Иванова и др.— Л.: Машиностроение, 1984.
5. CT/T Technology Continuum // General Electric, Co.— USA, 1978.
6. Informationen zur Computer — Tomography // Meseigenschaften des SOMATOM2.— BRD: Siemens AU, 1979.
7. Harding G. Dose rate control tomography—a study of image quality from a transfer function standpoint // Radiologia Diagnostica.— 1979.— V. 4, N 20.— P. 581—586.
8. McCullough E. C., Payne I. T. X-ray-transmission computed tomography // Medical Physics.— 1977.— V. 4, N 2.— P. 85—98.
9. Reimers P., Goebbels I. New possibilities of nondestructive evaluation by X-ray computed tomography // Mater. Evaluation.— 1983.— V. 41.— P. 732—737.

Поступила в редакцию 22 апреля 1985 г.

УДК 681.3.06 : 800.02

С. О. СТЕПАНИН

(Ереван)

ЯЗЫК АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ ТЕСТОВ (АЗАТ)

В последние годы для тестового контроля цифровых схем все чаще применяются функциональные тесты (ФТ). Эта тенденция объясняется в основном следующими причинами: во-первых, традиционные автоматизированные системы генерации тестов плохо справляются с возросшей сложностью современных цифровых схем [1, 2]; во-вторых, возможности генерации теста по структурному описанию схемы теоретически ограничены [3, 4]; в-третьих, с повышением быстродействия элементного базиса возрастает роль и значение динамического контроля, для которого пригодны только ФТ [2, 5], и, наконец, в-четвертых, функциональное описание схемы, как правило, всегда проще, понятнее и доступнее, чем описание ее структуры [2, 6, 7].

Для упрощения задачи составления ФТ разработано множество языков описания тестов (ЯОТ) [8—18], распространению которых способствовала, в частности, возможность обеспечения программной поддержки ЯОТ непосредственно в исполнительных контрольно-диагностических системах (КДС), построенных на базе мини- и микроЭВМ [7]. Специфика ЯОТ усматривается, прежде всего, в эффективном решении таких вопросов, как обработка информационных объектов, не обязательно кратных по длине формату машинного слова базовой ЭВМ [19], и совмещение механизмов формирования тестовых последовательностей во времени (на одном контакте для многих тактов) и в пространстве (на многих контактах для одного такта). Применение с этой целью конструкций универсальных языков программирования (например, Паскаля [16, 17]) обычно приводит к громоздкой и неаглядной форме необходимого описания ФТ. В этом смысле предлагаемый язык алгоритмического задания тестов (АЗАТ), разработанный для КДС «Севан-2», обладает рядом отличительных особенностей, раскрываемых ниже.

Прежде всего язык АЗАТ ориентируется на контролируемую схему, а не КДС. С этой целью из номенклатуры команд, унифицированной для ЯОТ [18, 19], исключены команды непосредственного управления аппаратурой КДС и периферийными установками ввода — вывода. В итоге исходная программа (ИП), написанная на языке АЗАТ, задает только порядок формирования стимулов и ожидаемых реакций контролируемой схемы и ничего более этого. Текст ИП складывается из предложений, каждое из которых содержит базовую команду языка или выражение. Предусмотрены всего семь различных базовых команд, часть которых выполняет стандартные функции управления последователь-