

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ  
С РЕНТГЕНОВСКОЙ ПЛЕНКИ**

В. П. АБРАМОВ, В. И. ГОРБУНОВ, Б. Н. ЕПИФАНЦЕВ

## ВВЕДЕНИЕ

Вопросам автоматизации процесса контроля качества материалов и готовых изделий с помощью проникающих излучений уделялось и уделяется все возрастающее внимание. Особенно интенсивно эти работы стали проводиться при внедрении в промышленность интроскопов и дефектоскопов, в основу действия которых положен сцинтилляционный метод. Однако основное направление этих работ сводится к автоматизации либо процесса регистрации изменения интенсивности излучения, либо к автоматизации всевозможных перемещений дефектоскопа [7]. В то же время такой важный и, пожалуй, основной раздел любого метода контроля, как анализ и расшифровка дефектоскопической информации, является до настоящего времени монополией человека—оператора. Между тем, современный уровень развития науки, в частности, раздел технической кибернетики—распознавания образов, дает возможность ставить и решать подобные задачи, связанные с анализом и классификацией поступающей информации.

Проблема автоматического анализа и распознавания изображений дефектов на радиографических снимках для своего решения требует разработки многих вопросов, одним из которых является вопрос о выборе принципа преобразования визуальной информации в электрические сигналы, т. е. по существу разработки воспринимающего устройства распознающего автомата. Как известно, воспринимающее устройство распознающей системы осуществляет функцию измерения значений признаков, и, следовательно, предъявляемые к нему требования ограничиваются необходимой точностью, разрешающей способностью и быстродействием. С помощью сканирующей системы из наблюдаемого изображения могут быть «извлечены» такие признаки, как количество и координаты объектов, их конфигурация, цвет, взаимное расположение, линейные размеры и т. п. Таким образом, на выходе получают электрические сигналы, которые несут в себе информацию о разнообразных признаках и свойствах анализируемого изображения.

В настоящей статье рассматриваются вопросы, связанные с выбором принципа преобразования визуальной информации в электрические сигналы для конкретного приложения, приводятся основные соотношения светотехнического расчета сканирующего устройства для обеспечения заданного отношения сигнал/шум.

## Принципы сканирования

По существу выполняемых операций все сканирующие системы можно подразделить на:

1 — совершающие пассивное развертывание поля, осуществляемое по заранее заданной программе;

2 — совершающие активное развертывание поля, программа которых изменяется в течение процесса сканирования в зависимости от конкретной картины поля.

Как активные, так и пассивные системы могут просматривать поле или непрерывно или дискретно с разрывом.

Участок плоского поля можно полностью покрыть самыми произвольными тректориями сканирования, но в технике наибольшее распространение получили построчные и круговые развертки, так как их можно осуществить с помощью довольно простых устройств.

Тип сканирования, а также скорость сканирования объекта определяются поставленной задачей и динамическими свойствами объекта.

Анализ разработанных в настоящее время сканирующих систем позволяет выделить следующие принципы их построения [1, 2].

1. Применение для целей сканирования обычных оптических устройств, наводимых на одну точку объекта и установленных на специальном механическом устройстве. В этом случае последнее изменяет пространственное расположение оптической оси системы таким образом, что производится сканирование объекта по требуемой траектории. Основным недостатком таких устройств является малая допустимая скорость сканирования, поскольку пространственное движение совершает все устройство, имеющее сравнительно большую массу.

2. Сканирующие системы, в которых развертка изображения осуществляется посредством оптико-механического устройства. Так, в работах [3, 4] описаны сканирующие устройства с оптико-механическим генератором светового пятна. Они обеспечивают высокую разрешающую способность и светосилу, однако из-за сложности механической системы, громоздкости, трудности управления положением светового пятна подобные системы получили малое распространение. К заданному типу систем относится и общеизвестный диск Нипкова.

3. Фотоэлектронные сканирующие системы, в которых развертка изображения осуществляется, как правило, путем отклонения потока фотоэлектронов внешними магнитными полями. Для разложения изображения разработан ряд широко применяющихся передающих телевизионных трубок (икonosкопы, суперикonosкопы, ортископы, видископы, диссекторы и др). Положительным свойством фотоэлектрических вакуумных сканирующих устройств являются их высокая чувствительность, разрешающая способность и динамические свойства. Однако некоторые недостатки их определяются высокой сложностью, наличием блоков, формирующих сигналы специальной формы, подаваемые на отклоняющие системы, большой чувствительностью к вибрационным и ударным нагрузкам.

Отдельный класс составляют устройства, в которых сканирование осуществляется путем перемещения перед чувствительным элементом специальных экранов, через отверстия которых поочередно подаются излучения с различных участков изображения. Однако эти системы имеют низкую чувствительность.

За последнее время разработаны также безвакуумные фотоэлектронные сканирующие устройства, основанные на использовании явления электролюминесценции [5]. В них сканирование осуществляется посредством попеременной подачи по взаимно перпендикулярным

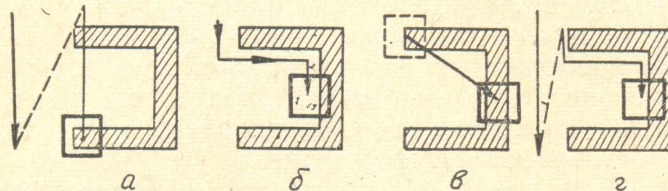
прозрачным электродам электрических сигналов, отпирающих различные участки электролюминофорного экрана. Сканирующий элемент таких устройств достаточно прост, однако его чувствительность и разрешающая способность невысоки. К этой же группе могут быть отнесены сканирующие устройства с элементами волоконной оптики, которые в последнее время получают все большее распространение. Их использование позволяет создать сложные сканирующие системы на основе простых коммутирующих и сканирующих фотоэлектронных устройств с круговыми траекториями сканирования.

Фотоэлектронные и электролюминофорные сканирующие устройства обладают почти равноценными положительными свойствами. Они имеют примерно одинаковую чувствительность и одинаковые динамические свойства. Однако разрешающая способность фотоэлектронных сканирующих устройств значительно выше, чем электролюминофорных. Основное преимущество электролюминесцентных устройств — простота сканирующего элемента, его стойкость к вибрационным и ударным нагрузкам.

Сравнительный анализ рассмотренных принципов построения сканирующих систем, а также поставленное требование разработки высокоскоростного распознающего автомата, осуществляющего расшифровку 500 000 снимков в год с высокой чувствительностью и разрешающей способностью, определяют выбор фотоэлектронного сканирующего устройства.

Для выбора режима просмотра изображений рассмотрим возможные варианты, представленные на рис. 1 (а, б, в, г).

Специфика поставленной проблемы — расшифровка радиографических снимков — требует решения последовательно 2 задач: 1) обна-



1. Рис. 1а. Последовательный просмотр полей зрения всех частей изображения.

Рис. 1б. Перемещение поля зрения вдоль границы или вдоль контура образа (следящая развертка).

Рис. 1в. Просмотр наиболее информативных частей изображения.

Рис. 1г. Переход от сканирования всего изображения к перемещению поля зрения вдоль контура образа (смешанный режим).

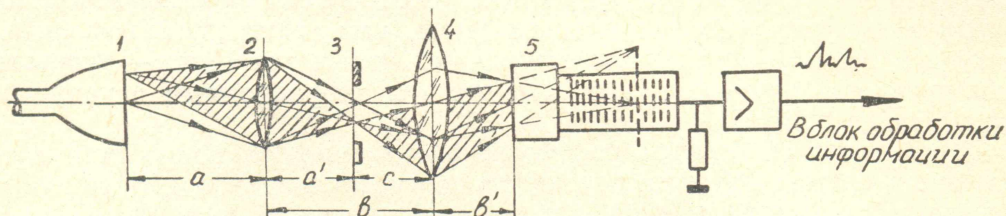
ружение дефектов, зафиксированных на рентгеновской пленке, 2) распознавание или классификация обнаруженных дефектов. В связи с этим наиболее целесообразным принципом, который следует принять при разработке сканирующего устройства, является последовательный просмотр заданного поля. Таким образом, анализ принципов построения сканирующих устройств и требования, которые вытекают из решения задачи расшифровки радиографических снимков, позволяют выбрать фотоэлектронное сканирующее устройство, работающее в режиме последовательного просмотра заданного поля. Наиболее широкое применение среди подобных устройств получили системы с бегущим лучом, в которых в качестве источника света используется световое пятно на экране ЭЛТ, а приемником служит ФЭУ. Они обеспечивают высокую разрешающую способность, высокое быстродействие, которое

определяется временем послесвечения экрана трубки, и позволяют сравнительно просто осуществлять коррекцию выходного сигнала по полю зрения.

### Отношение сигнал/шум и основные соотношения светотехнического расчета сканирующего устройства

Схема устройства для считывания информации, зафиксированной на рентгеновской пленке, приведена на рис. 2.

Источником света служит резко сфокусированное пятно на экране развертывающей трубки 1. С помощью отклоняющих устройств это пятно перемещается по поверхности экрана, описывая растр необходимого



2. Рис. 2. Схема считывающего устройства.

формата. Изображение светящегося пятна проецируется с помощью объектива 2 на рентгеновскую пленку 3.

Прошедший через рентгеновскую пленку световой поток собирается конденсором 4 на фотокатод электронного умножителя 5. Величина тока на выходе ФЭУ в каждый момент времени пропорциональна прозрачности пленки в точке, освещаемой пятном. Так как светящееся пятно последовательно пробегает по различным участкам поверхности кадра рентгеновской пленки, то на выходе ФЭУ получается изменяющийся по времени видосигнал со всего поля сканирования, который усиливается и подается в блок обработки информации.

Поскольку эффективность и надежность сканирующего устройства в целом зависит от правильного выбора параметров его основных элементов — ЭЛТ и ФЭУ, — то ниже кратко отмечаются наиболее важные из них, наиболее подробно об этом можно найти в [8,9].

Требования к ЭЛТ. Во-первых, это малое время послесвечения экрана (от долей до единиц микросекунд). При большом времени послесвечения четкость и контрастность изображения в мелких деталях в направлении строк будут заметно понижены. Во-вторых, высокая разрешающая способность, определяемая размерами рабочей части экрана и светового пятна. В-третьих, высокая яркость пятна в трубке и хорошее отношение сигнал/шум в видеосигнале.

Что касается преобразователей «свет-сигнал» — ФЭУ, то от них требуется высокая интегральная чувствительность фотокатода, приведенная к спектральной плотности излучения люминофора экрана.

$$\delta^* = \delta_{\max} \cdot \kappa_m, \quad (1)$$

где  $\delta_{\max}$  — максимальная абсолютная спектральная чувствительность фотокатода.

$$\kappa_m = \frac{\int_0^{\infty} \delta_{\lambda} p_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} P_{\lambda} d\lambda} \quad (2)$$

— коэффициент приведения относительных спектральных характеристик фотоприемника  $\delta_\lambda$  и источника излучения  $P_\lambda$ . Значения  $\kappa_m$  для различных сочетаний типов люминофоров и фотокатодов табулированы [9, 12].

В свою очередь абсолютная спектральная чувствительность определяется

$$\delta_{\max} = \delta_{\text{инт}} \cdot \nu_{\max} \cdot \kappa_2, \quad (3)$$

где  $\delta_{\text{инт}}$  — интегральная чувствительность, приводимая для фотокатодов ФЭУ в справочниках.

$$\kappa_2 = \frac{\int_0^\infty \nu_\lambda \cdot r_{\text{эл}} d\lambda}{\int_0^\infty \delta_\lambda r_{\text{эл}} \cdot d\lambda} \quad (4)$$

— пересчетный коэффициент. Его значения для фотокатодов различных типов табулированы [9, 12].  $\nu_{\max}$  — максимальная спектральная чувствительность глаза, соответствующая  $\lambda = 555$  нм.

Синтез сканирующего устройства следует проводить из условия обеспечения необходимого отношения сигнал/шум. Выходной сигнал, снимаемый с нагрузки такого устройства, подвержен существенным флуктуациям. Экспериментальное излучение рядом авторов источников возникающих шумов и их характера показало, что наиболее важными из них являются шум самого фотоумножителя и изменения интенсивности свечения экрана. Последние могут быть значительно уменьшены при питании трубки от стабилизирующих источников напряжения, а также применением локальной узкополостной цепи обратной связи с выхода ФЭУ через усилитель и фильтр на сетку трубки, осуществляющую контроль за яркостью, в результате чего интенсивность свечения пятна может быть стабилизирована в пределах  $\pm 1\%$  [10].

Как известно, под отношением сигнал/шум принято понимать отношение абсолютного значения превышения среднего значения уровня сигнала  $U_c$  над средним значением уровня фона  $U_\phi$  к среднеквадратическому значению шума.

$$\psi = \frac{U_\phi - U_c}{\delta_{\text{шф}}} = \frac{KU_\phi}{\delta_{\text{шф}}}, \quad (5)$$

где  $K = \frac{U_\phi - U_c}{U_\phi}$  — коэффициент контрастности носителя информации, характеризующий распределение яркости на носителе, а  $\delta_{\text{шф}}$  вычисляется с учетом темнового тока ФЭУ, составляющих теплового шума и шума усилителя по формуле [9].

$$\delta_{\text{шф}} = \sqrt{2e(I + I_T) \Delta f f(G) R_\phi^2 + \frac{4kT\Delta f (R_\phi + R_{\text{экв}})}{|G(\omega)|^2}}. \quad (6)$$

Формулу (5) можно переписать, используя (6) и учитывая, что реакцию ФЭУ можно представить как  $U_c = I_c \cdot R_\phi = \delta^* \Phi_k \cdot R_\phi$  в следующем виде (пренебрегая тепловыми составляющими шума):

$$\psi = \frac{\kappa \delta^* \Phi_k}{\sqrt{2e \Delta f f(G) (I_T + \delta^* \Phi_k)}}. \quad (7)$$

Если  $I_T \ll \delta^* \Phi_k$ , то

$$\psi = \kappa \sqrt{\frac{\delta^* \Phi_k}{2e \Delta f f(G)}}, \quad (8)$$

где  $\Phi_k$  — световой поток, попадающий на фотокатод ФЭУ;

$\Delta f$  — полоса пропускания устройства;  
 $f(G)$  — коэффициент избыточности шума;  
 $e$  — заряд электрона.

Одной из важнейших характеристик фотоэлектронного сканирующего устройства является величина минимального допустимого потока, при котором реализуется заданное отношение сигнал/шум. Используя формулу (8), получаем:

$$\Phi_k = \frac{\psi^2 \cdot 2e \Delta f f(G)}{\kappa^2 \delta^*} \quad (9)$$

В свою очередь световой поток  $\Phi_k$  связан с общим потоком на экране ЭЛТ  $\Phi_n$  через коэффициент передачи лучистого потока.

$$\Phi_k = \kappa_d \Phi_n = \kappa_d \gamma \cdot I_n U_a, \quad (10)$$

где

$\gamma$  — к. п. д. люминофора;  
 $I_n, U_a$  — ток и анодное напряжение ЭЛТ.

Для схемы, представленной на рис. 1, коэффициент  $\kappa_d$  можно представить как

$$\kappa_d = \kappa_{d_1} \cdot \kappa_{d_2},$$

где  $\kappa_{d_1}$  — коэффициент оптической системы, характеризующий часть светового потока, прошедшего через объектив и попадающего на носитель, он определяется:

$$\kappa_{d_1} = \frac{\kappa_0}{1 + 4(x^2) \left( \frac{M+1}{M} \right)^2}, \quad (11)$$

где  $\kappa_0$  — коэффициент пропускания объектива;  
 $x = F/D$  — коэффициент, обратный относительно отверстию объектива;

$M$  — линейное увеличение системы (отношение  $a'/a$ );

$\kappa_{d_2}$  — коэффициент, характеризующий часть светового потока, прошедшего через носитель и попадающего на фотокатод, равный

$$\kappa_{d_2} = \rho \kappa_k, \quad (12)$$

где  $\kappa_k$  — коэффициент пропускания конденсора;

$\rho = 0,1^D$  — коэффициент пропускания носителя;

$D$  — оптическая плотность пленки.

Анализируя формулы (10) и (12) и учитывая тот факт, что величина светового потока пятна на экране ЭЛТ ограничивается ускоряющим напряжением, типом люминофора, его эффективностью и максимально допустимой нагрузкой, можно констатировать, что обеспечение необходимого режима ФЭУ по среднему току (а значит, и надежного отношения сигнал/шум) следует осуществлять за счет правильного выбора коэффициента передачи лучистого потока  $\kappa_d$ , что достигается в свою очередь рациональной конструкцией считывающего устройства.

Не менее важной характеристикой для подобных устройств является эффект влияния послесвечения, накладывающий ограничения на быстродействие устройства, так как величина дополнительного потока  $\Delta \phi$  пропорциональна скорости развертки  $V$ . Поэтому при расчете и конструировании сканирующих устройств следует помнить об этой связи, поскольку при чрезмерном увеличении скорости развертки может нарушиться нормальный режим работы устройства. Подробное рассмотрение этого вопроса можно найти в [11].

В заключение приведем некоторые технические характеристики разработанного сканирующего устройства.

В качестве источника света использована ЭЛТ типа 18Л047А как трубка, обладающая наименьшим временем послесвечения среди осциллографических трубок. Преобразователем «свет-сигнал» служит фотоэлектронный умножитель ФЭУ-31. Контроль за яркостью осуществляется с помощью локальной узкополостной обратной связи с выхода ФЭУ.

В оптической системе, проектирующей луч на рентгеновскую пленку, использован объектив «Юпитер-3» с разрешающей способностью 30 *лин/мм* в центре и 14 *лин/мм* по полю и хорошей светосилой (относительное отверстие 1:1,5). Выходной зрачок объектива проектируется на фотокатод ФЭУ конденсором с фокусным расстоянием  $f = 30$  мм и относительным отверстием 1:1.

Выходной сигнал сканирующего устройства кодируется 10-разрядным преобразователем напряжения в код и поступает для последующей обработки в ЭЦВММ-20.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. П. Катус. Сканирующие фотоэлектрические устройства поиска и слежения, изд-во «Наука», М., 1964.
2. Г. П. Катус. Автоматический обзор и поиск в оптическом диапазоне, изд-во «Наука», М., 1966.
3. P. M. Blackal, G. M. Macleod, P. Zannels. The automatic analysis of spark chambers using a flying spot digitizer Meeting on Programming for HRD and other flying spot devices held at the College de France, Paris, 1963.
4. W. F. Baker, A. Spark chamber film reading system. Meeting on Programming for NRD and other flying spot devices held at the College de France Paris, 1963.
5. И. Р. Ляличев. Способ и устройство для передачи телевизионного изображения, Авт. свид. № 115236, 1955.
6. Читающие устройства, сб-к статей, ВИНТИ, М., 1965.
7. В. И. Горбунов, Н. Я. Макаров, В. В. Чемев, В. П. Абрамов, Л. Б. Ворошень. Автоматический контроль качества изделий большой толщины, Тр. V конференции «Автоматический контроль и методы электрических измерений» г. II, изд-во «Наука» СО АН СССР, Новосибирск, 1965.
8. А. И. Петренко. Преобразование графиков в электрические сигналы, изд-во «Наукова думка», К., 1964.
9. А. И. Петренко. Автоматический ввод графиков в ЭВМ, изд-во «Энергия», М., 1968.
10. Читающие устройства, сб-к ВИНТИ, М., 1962.
11. И. Я. Бутицкий. Светотехнический расчет датчика телевизионных сигналов с бегущим лучом, «Техника кино и телевидения», № 5, 1957.
12. В. К. Елисеев. Светотехнический расчет фотоэлектрических преобразователей изображений. Тр. семинара «Распознавание образов и конструирование читающих автоматов» вып. 1, К., 1966.
13. Р. И. Рыбак, О. Ф. Пурин. Фотоэлектрический преобразователь устройства обработки оптической информации с помощью ЭВМ. Тр. семинара «Распознавание образов и конструирование читающих автоматов» вып. 2, К., 1968.