

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ТОМОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассмотрены принципы построения распределенных томографических систем (РТС). Для РТС предлагается открытая архитектура, относительно самостоятельные система обработки данных и система сбора исходных данных, связь между которыми может осуществляться с помощью существующих систем связи (спутниковые системы, локальные вычислительные сети и т.д.). Приведена простейшая классификация существующих систем связи применительно к РТС. Отмечена перспективность использования ПЭС в качестве приемника излучения в системах сбора исходных данных РТС.

В настоящее время промышленные томографические системы представляют собой стационарные комплексы. Однако существует множество объектов контроля, которые не могут быть исследованы с помощью таких комплексов, например, находящиеся в эксплуатации трубопроводы, отдельные части собранных изделий и т.д. Сейчас практически невозможна медицинская акспресс-диагностика за пределами диагностических центров. Для подобных приложений необходимо иметь как минимум мобильные системы сбора исходных томографических данных. Такие системы создаются [4], но они еще не получили достаточного распространения.

Широкому внедрению томографических методов в производство, медицину и научные исследования, на наш взгляд, будет способствовать создание распределенных томографических систем (РТС). РТС включает систему сбора исходных данных, систему передачи информации и систему обработки данных. Характерными чертами РТС являются относительная самостоятельность и подвижность системы сбора исходных данных относительно системы обработки этих данных, открытость архитектуры томографической системы за счет существования системы передачи информации, позволяющей изменять структуру РТС, например, подключением дополнительных систем сбора данных или подключением более мощной системы обработки. Причем, в качестве системы передачи информации РТС целесооб-

Вычислительная томография. Куибышев, 1990.

разно использовать существующие системы связи. В рамках такого подхода к построению РТС возможна стандартизация оборудования томографических систем, что в сочетании с использованием уже применяемых в вычислительной технике систем передачи информации должно привести к значительному снижению стоимости томографических систем. Использование существующих систем связи для организации систем передачи информации дает возможность оптимальной организации РТС любой мощности для конкретного потребителя, что определяет универсальный характер РТС. Кроме того, возникает возможность оптимизации стоимости РТС в зависимости от необходимой производительности, а также возможность наращивания со временем мощности РТС при минимальных затратах.

РТС можно условно разделить на мобильные (передвижные) и стационарные. Мобильность РТС определяется мобильностью системы обработки данных (например, установка системы обработки данных на автомобиле). Мобильные РТС должны иметь минимальную стоимость, т.к. в них без ущерба для производительности РТС могут использоваться ЦЭВМ или мини-ЭВМ, а также простые системы сбора исходных данных. Области применения мобильных РТС следующие: эксплуатационный контроль магистральных трубопроводов, опор линий передач, медицинская экспресс-диагностика за пределами диагностических центров и т.п.

Стационарные РТС целесообразно использовать при больших объемах обрабатываемой информации, когда есть возможность использовать преимущества стационарных систем обработки данных, или когда необходимо интегрировать базу данных РТС в крупный банк данных (например национальный банк данных в медицине). В качестве ядра системы обработки данных стационарных РТС наибольшее применение, видимо, найдут мини- и супермини-ЭВМ, сочетающие высокую производительность, малые габариты, большую емкость накопителя на магнитных дисках (НМД) и приемлемую стоимость. РТС такого типа необходимы, например, на химических предприятиях для контроля заводских трубопроводов, когда контроль осуществляется одновременно несколькими системами сбора исходных данных, а результаты обработки данных сохраняются в банке данных. В медицине системы обработки данных стационарных РТС могут устанавливаться в поликлиниках и диагностических центрах, а системы сбора исходных данных, кроме находящихся в помещениях диагностических центров, могут находиться на машинах скорой помощи.

Применительно к РТС существующие системы связи можно разделить на локальные и глобальные. К локальным системам связи можно отнести различные типы используемых в вычислительной технике локальных сетей.

Наиболее распространенные из них *Arcnet* и *Ethernet* имеют скорость передачи данных до 10 МБит/с на расстоянии порядка 1000 м. В настоящее время разрабатываются беспроводные локальные сети с шумоподобными сигналами (230 КБит/с, расстояние до 100 м внутри здания и 1000 м вне здания). В наиболее простых системах передачи информации могут использоваться модемы (2400 КБод). Можно приблизительно оценить стоимость мобильных РТС с локальными системами связи. Если принять, что система сбора исходных данных для малоразмерного мобильного томографа стоит 50 тыс. долларов, а стоимость системы обработки на базе недорогого АРМ 15 тыс. долларов, то в зависимости от типа используемой в качестве системы передачи информации локальной сети стоимость РТС будет 65–80 тыс. долларов.

К глобальным системам связи можно отнести телефонные сети, скоростные волоконно-оптические сети (100–200 МБит/с, расстояние до 100 км), цифровые сети с комплексными услугами (типа *ISDN*), спутниковые системы связи. К примеру, стационарная РТС со спутниковой системой связи может быть использована в региональной системе контроля магистральных трубопроводов.

Если для создания систем обработки данных и систем передачи информации можно и целесообразно использовать существующие аппаратные средства, то на сегодняшний день не существует более или менее стандартизированных систем сбора исходных данных. Возможности и качество систем сбора исходных данных в большой степени зависят от выбора детектора. Рассмотрим этот вопрос подробнее применительно к рентгеновской томографии.

В настоящее время для регистрации пространственного распределения энергии мягкого рентгеновского излучения широко применяются матрицы кремниевых *p-i-n* диодов, рентгеновские фотопленки и газонаполненные камеры. Характеристики детекторов в области энергии порядка нескольких килоэлектронвольт [1] приведены в таблице.

Тип детектора	Чувствительность, квант/см ² × 10 ³	Динамический диапазон	Разрешающая способность, лин/мм	Энергетическое разрешение, %	Радиальная стойкость, рад
Матрицы диодов	0,2	10 ² –10 ³	2 – 5	10 – 30	10 ⁵ –10 ⁶
Газонаполненные камеры	1	10 ² –10 ³	1 – 10	20 – 40	-
Фотосуммусионные пленки	20	600	100	-	-
Детекторы на ПЗС	0,02	10 ² –10 ⁴	50–150	10 – 20	10 ⁶ –10 ⁷

Критерием радиационной стойкости для прибора с зарядовой связью (ПЗС) считается увеличение на порядок коэффициента переноса, а для диодных матриц – увеличение на порядок токов утечки, приводящее к необратимому ухудшению чувствительности.

Сигнальный заряд в ячейках ПЗС, работающего в режиме детектора излучения, создается благодаря генерации пар электрон-дырка в подложке при поглощении энергии излучения и благодаря накоплению неосновных носителей под действием электрического поля в потенциальных ямах под затворами. Величина дозы излучения, необходимая для заполнения всей потенциальной ямы

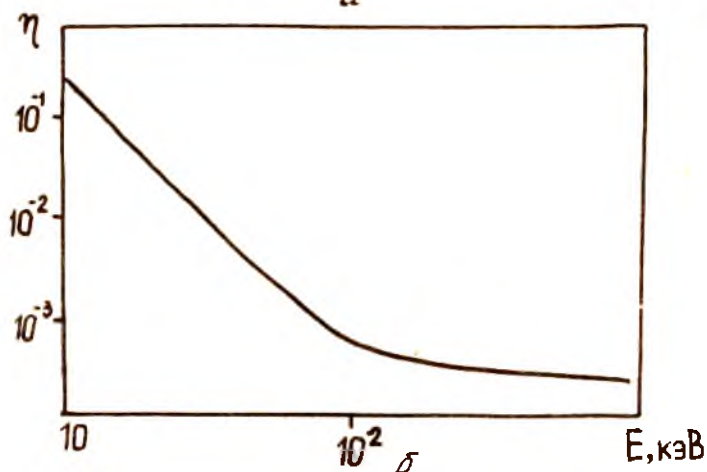
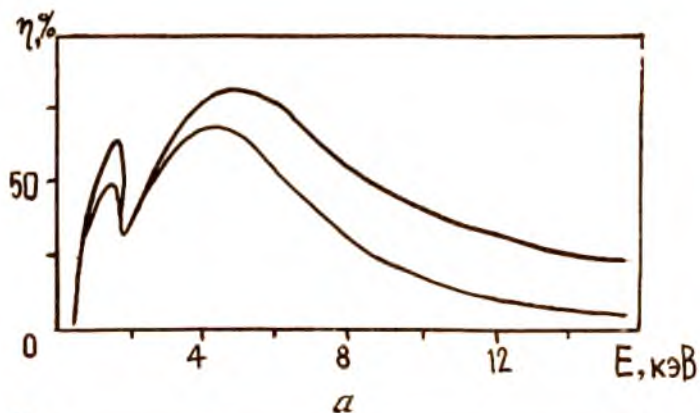
$$T = \frac{N_{pW}}{q_{\gamma}(L+W)A_{\delta}} \quad (1)$$

где N_{pW} – полная емкость ПЗС-ячейки, выраженная через число носителей; L – диффузионная длина неосновных носителей в подложке; W – глубина обедненного слоя; q_{γ} – скорость генерации электронно-дырочных пар, которую для ионизирующего излучения можно считать неизменной по толщине подложки; A_{δ} – площадь ПЗС, приходящаяся на одну информативную ячейку.

Характеристики, характеризующие ПЗС как детекторы пространственного распределения рентгеновского излучения, следующие: эффективность регистрации, квантовый выход, чувствительность, разрешающая способность, динамический диапазон и радиационная стойкость.

Эффективность регистрации определяется соотношением $\eta = N_p / N_{\text{пад}}$, где N_p – число зарегистрированных частиц, а $N_{\text{пад}}$ – полное число частиц, проходящих чувствительный объем приемника за то же время (причем зарегистрированными считаются те частицы, которые дали вклад в электрический заряд в потенциальной яме детектора). Спектральная зависимость квантовой эффективности η (Е) в диапазоне энергий рентгеновского излучения $E = 1 \dots 15$ кэВ для различных L при толщине подложки $\delta = 250$ мкм приведена на рис. 1,а. Снижение эффективности регистрации при меньших энергиях квантов объясняется поглощением излучения затворами и диэлектриком, а при больших энергиях – сквозным прохождением излучения через чувствительный объем приемника без взаимодействия. Зависимость η (Е) при больших энергиях квантов (до 1 МэВ) представлена на рис. 1,б.

Квантовый выход θ , т.е. количество заряда (в электронах), образованного в чувствительном объеме детектора при прохождении одного



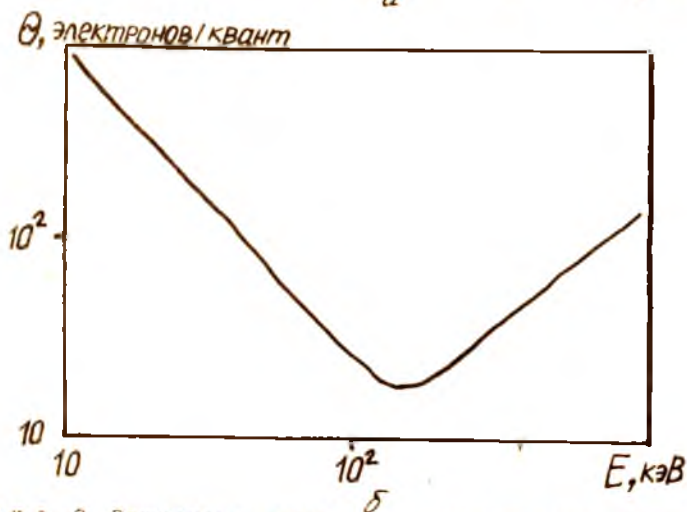
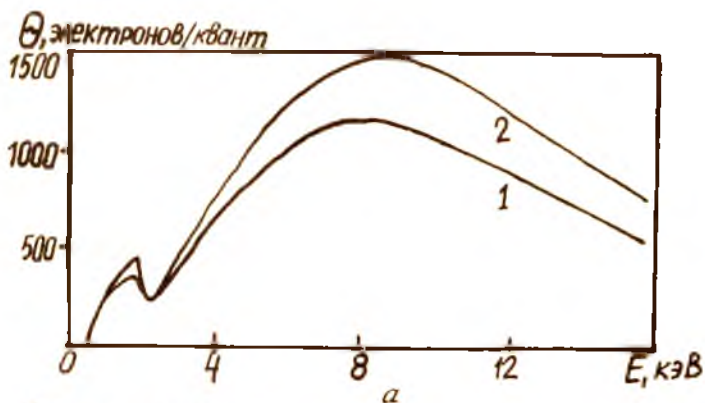
Р и с. 1. Зависимость квантовой эффективности от энергии падающего излучения для S_i ПЭС-детектора с поверхностным каналом (толщина затвора и диэлектрика по 0,1 мкм): а - для низких энергий, $\sigma = 250$ мкм, 1 - при $L = 10$ мкм; 2 - при $L = 75$ мкм; б - для высоких энергий, $\sigma = 200$ мкм, $L = 50$ мкм

кванта, связан с квантовой эффективностью соотношением

$$\theta(E) = \eta(E) \times E / E_{pp}, \quad (2)$$

где E_{pp} - энергия образования одной пары электрон-дырка.

Для S_1 величина $E_{рп}$ практически не зависит от вида и энергии излучения и составляет 3,6 эВ [2]. Спектральная зависимость квантового выхода в диапазоне энергий 0...15 кэВ приведена на рис. 2, а, спектральная зависимость квантового выхода при энергиях до 1 МэВ для приборов, имеющих $\Delta = 50$ мкм, приведена на рис. 2, б.



Р и с. 2. Зависимость квантового выхода от энергии падающего излучения для S_2 ПЗС-детектора с поверхностным каналом, толщина затвора и диэлектрика по 0,1 мкм: а - для низких энергий, 1 - при $\Delta = 10$ мкм; 2 - при $\Delta = 75$ мкм; б - для высоких энергий, $\Delta = 50$ мкм

Из приведенного сравнительного анализа детекторов рентгеновского излучения видна перспективность использования ПЭС в качестве детекторов в системах сбора исходных данных РТС - чувствительность ПЭС в видимом участке спектра позволит создать multifunctionальные системы сбора исходных данных на основе ПЭС.

Существенное значение в томографии имеет эффект так называемого "ужесточения луча". Суть его состоит в том, что используемые в томографии рентгеновские лучи на самом деле не моноэнергетичны; ослабление в большинстве веществ при уровнях энергии рентгеновского излучения проявляется как действие фильтра верхних частот, который ослабляет высокие уровни энергии в меньшей степени, чем низкие. По мере прохождения луча через вещество фотоны низких энергий рассеиваются и поглощаются сильнее, чем фотоны высоких энергий, поэтому доля последних на выходе выше, чем на входе. Таким образом, луч становится жестче. Это по причине некорректной интерпретации данных о проекциях приводит к возникновению артефактов восстанавливаемого изображения.

Интенсивность пучка на выходе с учетом энергетической характеристики детектора, можно выразить следующим выражением:

$$I(x) = \int_{E_0}^{E_1} D(E) I_0(x, E) \exp\left[-\int_L \mu(x, y, E) dy\right] dE, \quad (3)$$

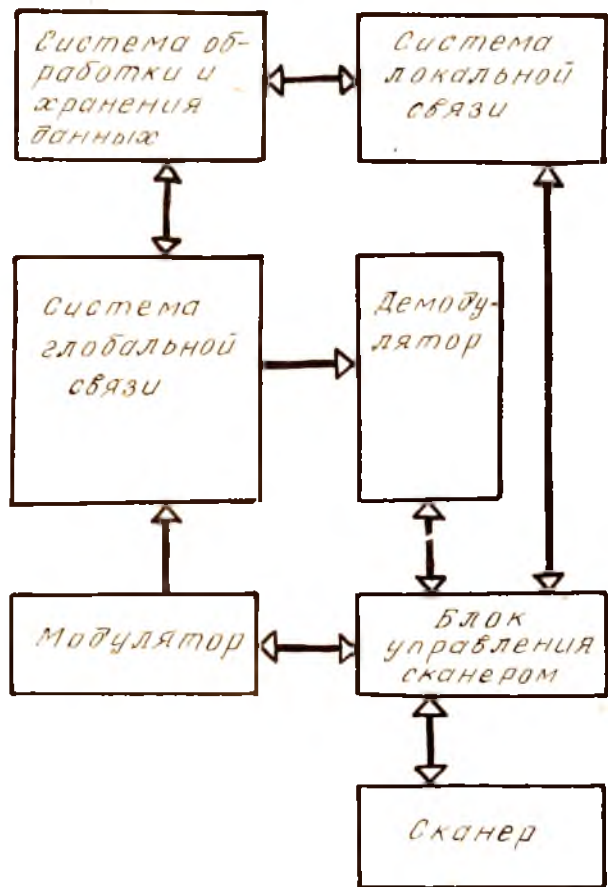
где $D(E)$ - энергетическая характеристика детектора; μ - коэффициент поглощения; L - отрезок просвечивания.

Используя предварительную обработку изображений в фоточувствительных ПЭС - линейках, основанную на перенесении ряда общих алгоритмов цифровой обработки изображений [3] на операции над зарядами в ПЭС, можно получить набор изображений, синтез которых численными методами позволит избавиться от артефактов некорректной интерпретации.

Основной составной частью распределенной томографической системы является устройство двумерного сканирования. Устройство в виде механизма точного перемещения обеспечивает программируемое позиционирование детектора излучения (ПЭС-линейку) по всему анализируемому полю. В состав двумерного сканирующего устройства входят прецизионный механизм привода, измерительные датчики координат. Все исполнительные механизмы управляются при помощи программируемого контроллера перемещений. Сигнал от детектора излучения поступает на устройство предварительной обработки, где осуществляется его программируемое усиление и приведение к цифровому виду. Для более гибкой работы детектора из-

лучения он оснащен контроллером, управляющим его функционированием, в число задач которого входит управление режимами работы ПЭС-линейки, поддержка функций анализа, совмещенных с детектированием излучения.

Полную работу томографа организует ЭВМ, которая собирает необходимую информацию для реконструкции послойных изображений и управляет работой всех блоков. Математическое обеспечение томографов достаточно развито, что позволяет производить множество процедур по обработке и преобразованию томограмм (рис. 3).



Р и с . 3. Функциональная схема томографа

Создание в будущем распределенных томографических систем, в частности использующих малоранурный подход в томографии, будет способствовать широкому внедрению томографических методов в практику научных исследований и появлению новых методов неразрушающего контроля для промышленного контроля.

Библиографический список

1. Корж В.И., Кусков В.Е., Стенин В.Я. Детекторы рентгеновского излучения на приборах с зарядовой связью// ПТЗ, 1982. № 3. С.7-19.
2. Вавилов В.С. Действие излучения на полупроводники. М.:Физматгиз, 1963.
3. Пратт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982.792 с.
4. Link R. et al. World Conference on Nondestructive Testing (11; 1985; Columbus). Proceedings. v.1, pp. 688 ... 692.

УДК 615.471:681.397

В.Ф.Явцев

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТОМОГРАФИЯ В ДИАГНОСТИКЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ

Рассматриваются перспективы создания устройств неразрушающего контроля газонефтепроводов на основе методов радиационной вычислительной томографии, а также возможность создания томографических систем на основе радиографии. Приводится описание разработанных устройств и алгоритмов малоранурной вычислительной томографии.

При прокладке и эксплуатации различного рода газо- и нефтепроводов возникает важная задача неразрушающего контроля (НК) сварных соединений труб, так как именно сварные швы являются наиболее вероятным источником возникновения технологических и усталостных дефектов, ко-

Вычислительная томография. Куйбышев, 1990
