

В.Г. ВОЛКОВ, научный сотрудник ИСМА НАН Украины, Харьков;
В.Д. РЫЖИКОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник ИСМА НАН Украины, Харьков;
А.Д. ОПОЛОНИН, зам. заведующего отделом ИСМА НАН Украины, Харьков;
Е.К. ЛИСЕЦКАЯ, канд. хим. наук, ст. научный сотрудник ИСМА НАН Украины, Харьков

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МУЛЬТИДЕТЕКТОРНЫХ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ

Анализ известных и разработка отдельных методов обработки сигналов сцинтилляционных детекторов в багатодетекторных цифровых радио – графических системах позволили повысить динамический диапазон на 10-20 дБ. это привело к уменьшению погрешности вычисления эффективного атомного номера в 0,2 единиц и к увеличению радиационной толщины вещества, сканированных в полтора раза.

Ключевые слова: обработка сигналов, помеха, сцинтилляционные детекторы, частотная фильтрация, динамический диапазон

Введение. Детектирующая система является ключевым элементом цифровых радиографических систем (интроскопов) с повышенным быстродействием, обнаружительной способностью и пространственным разрешением и определяет их эксплуатационные возможности в целом [1]. Свойства применяемых материалов определяют параметры детекторов. Для обеспечения высокой обнаружительной способности систем необходимы высокочувствительные детекторы, в которых должны применяться сцинтилляторы с максимальным световым выходом. Реализация потенциальных характеристик детекторов возможна при адекватном выборе структуры, элементной базы и методов обработки сигналов в усилительно-преобразовательном тракте.

Особенно важно оценить широко применяемые методы обработки сигналов по критерию «аппаратурные затраты - извлекаемая информация». Современная вычислительная техника имеет высокие характеристики и приемлемую стоимость. Это позволяют сместить центр тяжести в обработке сигналов сцинтилляционных детекторов с аналоговых методов на цифровые. По нашему мнению, можно добиться удешевления производства и повышения надежности систем, построенных на основе сцинтилляционных детекторов ионизирующих излучений. Для этого необходимо свести к минимуму предварительную аналоговую обработку, особенно в многоканальных системах, и достичь улучшения показателей системы в целом за счет применения более сложных алгоритмов цифровой обработки.

Постановка задачи. Целью работы является анализ существующих и разработка отдельных методов обработки сигналов сцинтилляционных детекторов в цифровых радиографических системах (ЦРС), использование которых приведёт к уменьшению погрешности вычисления эффективного атомного номера и увеличению радиационной толщины объекта сканирования.

Основная часть. Сигнал, поступивший с выхода сцинтилляционного детектора, содержит в себе информацию обо всех фазах переноса излучения (ПИ), наиболее важные из которых, на наш взгляд, следующие (в скобках - модулирующая информация):

1. Генерация излучения (параметры источника).
2. Распространение излучения (пространственная структура и физико-химический состав среды распространения).
3. Поглощение излучения в сцинтилляторе (параметры сцинтиллятора).
4. Распространение световых фотонов в световоде (параметры световода).
5. Поглощение световых фотонов в фотопреобразователе (параметры фотопреобразователя).

Целью обработки сигналов обычно является выделение **требуемой** информации. То есть, мы можем поставить задачу о выделении информации о любой из пяти выделенных фаз ПИ. В этом случае, содержащаяся информация о других фазах будет являться **помехой**.

Получение информации о пространственной структуре среды между источником излучения и детектором – основное назначение ЦРС, которые применяются в таможенном досмотре, медицине и технической диагностике. Двухэнергетические системы могут при этом дать грубую оценку эффективного атомного номера, то есть разделить органические и неорганические вещества. При применении мультэнергетического метода возможно определение эффективного атомного номера с точностью до десятых долей единицы. В сочетании с построением объемного изображения этот метод вплотную приближает нас к определению физико-химического состава среды рассеяния.

Определив вид интересующей нас информации, необходимо дать заключение о носителе этой информации в сигналах сцинтилляционных детекторов. Если найдена связь между параметром сигналов сцинтилляционных детекторов и полезной информацией (измеряемой физической величиной), то несложно выбрать оптимальный способ демодуляции сигналов.

Для реализации целей ЦРС в таблице указаны функциональные связи информации с параметрами сигналов. Авторами создан и исследован макет трёхэнергетической ЦРС. В системе использованы три линейки детекторов. Энергетические характеристики чувствительности детекторов в разных линейках значительно отличаются. Используя зависимость функции поглощения рентгеновского излучения (РИ) от эффективного атомного номера среды, были разработаны варианты алгоритмов его вычисления. В алгоритмах учтены особенности геометрии системы, влияние рассеянного излучения на сигналы, влияние фильтрации исходного излучения и т.д.

Таблица – Параметры среды

ПАРАМЕТРЫ СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ	
Информация	Параметр сигналов
Радиационная толщина среды распространения	Средний ток или скорость счёта
Эффективный атомный номер	Средние токи в каналах с различными функциями энергетической чувствительности
Нелинейные свойства среды распространения	Отношение спектрограмм до и после прохождения среды, анализ диаграммы направленности и спектра рассеянного излучения
Физико-химический состав среды распространения	Набор мультэнергетических сигналов в сочетании с томографическим сканированием

Чаще всего рентгеновские излучатели используют тормозное излучение, которое характеризуется непрерывным энергетическим спектром и диаграммой направленности излучения, причем в различных направлениях спектр может изменяться. В нашей модели допустимо представить излучение набором частичных потоков, в пределах которых энергии и направления распространения усредняются. Это обусловлено конечными размерами применяемых приёмников излучения – сцинтилляционных детекторов (детекторов типа сцинтиллятор-фотодиод). Сигналы на выходе сопряженных детекторов из трёх линеек, в общем случае, будут линейно зависимы. Это обусловлено характеристиками энергетической чувствительности детекторов и геометрией переноса излучения от излучателя сквозь объект к линейкам детекторов. Можно провести аналогию между характеристикой энергетической чувствительности комбинации фильтр излучения+детектор и электрическим полосовым фильтром. Нижняя частота среза определяется фильтрами излучения, которыми может быть оборудован излучатель и линейки детекторов. Верхняя частота полосы пропускания зависит (в первом приближении) от материала и толщины сцинтиллятора детектора. Варьируя спектр излучения, материал и толщину фильтров излучения, материал и толщину сцинтилляторов детекторов, можно получать различные соотношения линейной зависимости сигналов сопряженных детекторов трёх линеек описываемой ЦРС.

Методы обработки можно классифицировать как **аналоговые** и **цифровые**. В силу аналогового характера сигналов на электрическом выходе детектора, аналоговые методы целесообразно применять в первых каскадах усиления и преобразования сигналов. Зная спектральные характеристики сигналов детекторов, можно повысить отношение сигнал-шум путём **частотной фильтрации** в первом каскаде усиления. В этом случае, первый и последующие каскады не будут усиливать шумы в тех спектральных областях, где спектральная плотность полезного сигнала незначительна. Значения номиналов радиокomпонентов рассчитывают с учетом частоты и длительности опроса ка-

нала линейки детекторов. Обширные возможности применения **цифровых** методов обработки сигналов в многоканальных ЦРС, в реальном масштабе времени, появились в связи с массовым применением компьютерной техники с гигагерцовыми тактовыми частотами и многоядерными процессорами. Цифровая обработка позволяет использовать гораздо больший набор методов, сложных математических преобразований. Решение самых разнообразных задач лежит в области программного обеспечения. С аппаратной точки зрения необходимо лишь выбрать вычислительную машину с необходимыми характеристиками. Рассмотрение всех возможных вариантов цифровой обработки не является предметом настоящей работы.

Авторами был предложены **цифро-аналоговые** методы обработки сигналов в цифровой радиографической системе. В разработанном, по проекту НАТО SfP-982823, макете цифровой радиографической системе эти методы были реализованы.

Описание обозначений при моделировании сигналов. Рассмотрим простейший для моделирования случай. Выбираем такое соотношение параметров системы, что линейной зависимостью сигналов сопряженных детекторов и линейной зависимостью сигналов соседних детекторов от рассеянного излучения можно пренебречь. Эквивалентная электрическая схема фотодиода (как генератора сигнала детектора) – генератор тока. Физическая величина, линейно связанная с током – двойной интеграл потока фотонов по входному окну детектора и по спектру, взвешенный характеристикой спектральной чувствительности.

Обозначим пространство сигналов M линеек детекторов (по N детекторов в каждой) греческой буквой йота $I = (I_{mn})$. Для моделирования модуляции сигналов информацией об эффективном атомном номере объекта сканирования I удобно представить как совокупность из N векторов. Каждый из них имеет M проекций на базис пространства энергетических окон при мультиэнергетическом сканировании:

$$I = \{I_n\} = \{(I_{11}, I_{21}, \dots, I_{m1}), (I_{12}, I_{22}, \dots, I_{m2}), \dots, (I_{1n}, I_{2n}, \dots, I_{mn})\} \quad (1)$$

где I – пространство сигналов M -энергетической ЦРС;

I_n – n -ый вектор пространства сигналов системы, каждая из линеек которой состоит из N детекторов;

I_{mn} – m -тый компонент n -ного вектора пространства сигналов.

Размерность векторного пространства сигналов ЦРС, в общем случае равна $\dim I = MN$. Это утверждение базируется на том основании, что все детекторы всех линеек пространственно и спектрально разнесены. То есть, в идеальном случае, сигнал каждого детектора определяется спектрально и пространственно селективным частичным потоком от источника. Для рассматриваемой трёхэнергетической системы $M = 3$, а N зависит от размера входного окна детектора и ширины поля сканирования.

Каждый компонент i_{mn} n -ного вектора пространства сигналов состоит из «темнового» тока i_{mn}^D и «светового» тока $i_{mn}^L = k_{mn} \cdot j_{mn}^L$, который возникает при попадании во входное окно детектора РИ с интенсивностью j_{mn}^L :

$$i_{mn} = i_{mn}^D + k_{mn} \cdot j_{mn}^L \quad (2)$$

где k_{mn} – токовая чувствительность детектора (коэффициент, связывающий изменение интенсивности РИ с сигнальной частью изменения выходного тока детектора). Размерность k_{mn} будет зависеть от способа представления j_{mn}^L . Например, если $[j_{mn}^L] = \text{P/мин}$ (рентген в минуту), то $[k_{mn}] = \text{А} \cdot \text{мин}/\text{P}$ (ампер на рентген в минуту).

Обозначим матрицу набора сигналов латинской буквой $I = (i_{mn})$; матрицу «темновых» токов детекторов системы обозначим $I^D = (i_{mn}^D)$; матрицу коэффициентов преобразования РИ $K = (k_{mn})$. Считаем, что в выбранном режиме работы излучателя и в выбранной геометрии облучения системы детекторов все $\{j_{mn}^L\}$ равны между собой: $j_{11}^L = j_{12}^L = \dots = j_{ij}^L = \dots = j_{mn}^L = J(t) = \text{const}$ (в момент времени t). Запишем выражение (2) для всей системы в матричной форме:

$$I = I^D + K \cdot J(t) \quad (3)$$

Авторами был предложены и реализованы методы выравнивания сигналов детекторов в «темновом» и «световом» режимах. **Компенсация разброса «темновых» токов детекторов.** Разброс «темновых» токов («темновым» током детектора называют паразитный выходной ток при выключенном излучателе РИ) детекторов в многоканальных системах достаточно велик. Он может значительно снизить динамический диапазон приемно-усилительного тракта. В результате сужения динамического диапазона линейного усиления и преобразования сигналов уменьшается контрастная чувствительность и проникающая способность ЦРС, увеличивается погрешность вычисления эффективного атомного номера объекта сканирования. **Разброс рентгеночувствительности детекторов** в многоканальных системах снижает динамический диапазон приемно-усилительного тракта и ухудшает качество изображения. В упомянутой системе применён алгоритм аппаратной компенсации разброса рентгеночувствительности. Авторы применили цифро-аналоговый метод. Каскад компенсации разброса рентгеночувствительности схемотехнически расположен после каскада компенсации темновых токов. Это важно для получения оптимальных параметров калибровки. При обратном расположении каскадов дисперсия темновых токов увеличивалась бы каскадом компенсации разброса рентгеночувствительности. Такое расположение каскадов обусловлено различием в характере воздействия на сигнал. Если при корректировке смещения компенсация аддитивна, то при выравнивании чувствительности компенсация производится мультипликативно. В режиме «световой» калибровки, когда ли-

нейку детекторов сканируют при включенном рентгеновском излучателе без объекта контроля, компьютерная программа анализирует массив данных о максимальных уровнях сигналов в каждом канале всех детекторов линейки. Учитывая шаг и диапазон возможной корректировки усиления, для каждого канала вычисляется индивидуальный коэффициент, который фиксируется в каскаде памяти. При рабочем последовательном опросе сигнал каждого детектора корректируется на хранящуюся в памяти величину. Изложенный алгоритм называется аппаратной «световой» калибровкой. Аппаратные «темновая» и «световая» калибровки позволяют расширить динамический диапазон системы цифровой радиографии на 10÷20 дБ. В алгоритмах применен робастный метод оценивания - *усеченное среднее (Truncated mean)*, который относится к *линейным комбинациям порядковых статистик (L-оценки)*. Для его вычисления усредняются данные вариационного ряда выборки после удаления с обеих сторон определенной доли объектов (она находится в пределах от 5 до 25%).

В каждой из М линеек, сигнал, собранный мультиплексорами с N каналов детекторов, поступает на каскад масштабного усилителя с управляемым смещением. Такой способ работы схемы называют коммутацией с временным разделением каналов.

В режиме «темновой» калибровки компьютерная программа анализирует массив данных о смещениях в каждом канале всех детекторов линейки. Учитывая шаг и диапазон возможной корректировки смещения, для каждого канала вычисляется индивидуальный коэффициент, который фиксируется в каскаде памяти. При рабочем последовательном опросе сигнал каждого детектора корректируется на хранящуюся в памяти величину. Изложенный алгоритм называется аппаратной «темновой» калибровкой. Упрощенно алгоритм выглядит следующим образом. Выражение (3) в случае выключенного излучателя (поток излучения $J(t) = 0$) приобретает вид:

$$I = I^D + K \cdot 0 \quad (4)$$

1. Задаём количество выборок для анализа n.
 2. Анализ вариации массива выборок $\{I_i = I_i^D\}$ для детекторов системы.
 3. Определение неисправных детекторов по заданным критериям.
 4. Расчет массива индивидуальных коэффициентов $I^{Dk} = (i_{mn}^{Dk})$.
 5. Запись I^{Dk} в память каскада коррекции «темновых» токов.
- В результате коррекции выражение (4) приобретает вид:

$$I = I^D + I^{Dk} + K \cdot 0 \quad (5)$$

Следующим этапом проводится аппаратная «световая» калибровка. Ввиду разной спектральной чувствительности каждой линейки системы, «световая» калибровка проводится в пределах одной линейки. Тогда выражение (2) примет вид: $i_n = i_n^D + k_n \cdot j_n^L$.

1. Задаём количество выборок для анализа n .
2. Включаем рентгеновский излучатель, выражение (5) становится:

$$I = I^D + I^{Dk} + K \cdot J(t) \quad (6)$$

3. Анализ вариации массива выборок $\{I_i = I_i^D + I_i^{Dk} + K \cdot J_i(t)\}$.
4. Определение неисправных детекторов по заданным критериям.
5. Расчет массива индивидуальных коэффициентов $K^L = (k_n^L)$, которые записываются в диагональную матрицу $K^L = \text{diag}(k_1^L, k_2^L, \dots, k_n^L)$
6. Запись K^L в память каскада коррекции «световых» токов. Выражение (6) принимает вид:

$$I = (I^D + I^{Dk} + K \cdot J(t))K^L = (I^D + I^{Dk})K^L + K \cdot J(t)K^L \quad (7)$$

Первое слагаемое в выражении (7) не позволяет с первой итерации достичь требуемой точности. Поэтому в системе предусмотрено задание числа итераций автоматической калибровки.

К **цифровым** методам относится **программная** «темновая» и «световая» калибровки, которые также применены в упомянутой системе ЦР. Целью применения программной калибровки является повышение точности при реализации вычислительных операций над массивами данных. Программная калибровка манипулирует с сигналами после аналого-цифрового преобразования и не влияет на динамический диапазон системы. Однако она упрощает построение улучшенных изображений и повышает точность операций вычисления эффективного атомного номера (составных частей) сканируемого объекта.

Выводы. В результате анализа существующих методов обработки сигналов сцинтилляционных детекторов в ЦРС были предложены цифро-аналоговые методы: аппаратная «темновая» и «световая» калибровки сигналов, которые позволили увеличить динамический диапазон на 10-20 дБ.

В разработанном, по проекту NATO SfP-982823, макете цифровой радиографической системе предложенные методы были апробированы и показали высокую эффективность и робастность.

Разработанные методы и алгоритмы обеспечили уменьшение погрешности вычисления эффективного атомного номера до 0,2 единиц на «лёгких» веществах ($Z_{\text{eff}} = 7 \dots 8$) и увеличение радиационной толщины объекта сканирования в 1,5 раза.

Благодарность: эта работа была частично проведена при поддержке проекта NATO SfP-982823.

Список литературы. 1. Б.В. Гринёв, В.Д. Рыжиков, В.П. Семиноженко. Сцинтилляционные детекторы и системы контроля радиации на их основе. Киев «Наукова думка», 2007, 447 с. 2. Хьюбер П. Робастность в статистике. — М.: Мир, 1984.

Надійшла до редколегії 15.04.2013

Методы обработки сигналов мультidetекторных систем цифровой радиографии / В.Г. Волков, В.Д. Рыжиков, А.Д. Ополонин, Е.К. Лисецкая // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електрое-нергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 34 (1007). – С. 123–130. – Бібліогр.: 2 назв.

Аналіз відомих та розробка окремих методів обробки сигналів scintillaційних детекторів у багатодетекторних цифрових радіографічних системах дали можливість підвищити динамічний діапазон на 10-20 дБ. Це призвело до зменшення похибки обчислення ефективного атомного номера до 0,2 одиниць та до збільшення радіаційної товщини речовини, що сканують, у півтора рази.

Ключові слова: обробка сигналів, завада, scintillaційні детектори, частотна фільтрація, динамічний діапазон

An analysis of known is that development of separate methods of the signal of scintillation detectors processing in the digital radiographic systems of multidetectors enabled to promote a dynamic range on 10-20 dB. It resulted in diminishing of error of calculation of effective atomic number to 0,2 units and to multiplying a radiation thickness matters which scan, in one and a half the times.

Keywords: signal processing, nuisance, scintillation detectors, radio frequency filters, dynamic range