

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **036838**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.12.25

(51) Int. Cl. **G01N 23/08** (2006.01)
G01N 23/22 (2006.01)

(21) Номер заявки
201791200

(22) Дата подачи заявки
2015.11.28

(54) **СПОСОБ ПРОВЕРКИ ОДНОГО ИЛИ БОЛЕЕ ПРЕДМЕТОВ ГРУЗА ИЛИ БАГАЖА В СИСТЕМЕ ПРОВЕРКИ**

(31) **2014268284**

(56) **WO-A1-2011106463**
US-A-5394453
WO-A1-2004053472
US-A1-20040000645
WO-A1-2015105541

(32) **2014.11.30**

(33) **AU**

(43) **2017.09.29**

(86) **PCT/AU2015/050752**

(87) **WO 2016/082006 2016.06.02**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
САЗЕРН ИННОВЕЙШН
ИНТЕРНЭШНЛ ПТИ ЛТД (AU)

(72) Изобретатель:
Скуллар Пол, Маклин Кристофер,
Тониссен Шейн, Салим Сайед Хусро,
Оллман Брендан (AU)

(74) Представитель:
Медведев В.Н. (RU)

(57) Изобретение обеспечивает устройство (100) для проверки одного или более предметов (101, 1806) груза или багажа в отношении одного или более типов целевого материала, при этом устройство включает в себя источник (200, 201, 1800) падающего излучения (204, 206, 1804), выполненный с возможностью облучения одного или более предметов (101, 1806); множество детекторов (202, 209, 1807, 301), предназначенных для обнаружения порций излучения (205, 207, 1700), испускаемых изнутри или проходящих через упомянутые один или более предметов (101, 1806) в результате облучения падающим излучением (204, 206, 1804), при этом каждый детектор выполнен с возможностью выдачи электрического импульса (312), вызываемого обнаруженными порциями, имеющего характерные размер или форму, зависящие от энергии порций; один или более цифровых процессоров (203, 210, 303, 304, 306, 305), выполненных с возможностью обработки каждого электрического импульса для определения характерного размера или формы, генерации посредством этого энергетического спектра детектора для каждого детектора из энергий обнаруженных порций и характеристики материала, связанного с упомянутым одним или более предметами, на основании энергетического спектра.

B1

036838

036838

B1

Предпосылки изобретения

Настоящее изобретение относится к устройству для идентификации материала по изобретению с конкретным применением к досмотру груза или багажа в отношении одного или более типов материалов.

В рентгеновских системах, применяемых в проверке груза и багажа, используется генератор рентгеновского излучения широкого спектра для освещения предмета, который будет подвергаться проверке. Матрица детекторов на противоположной стороне предмета применяется для измерения интенсивности потока рентгеновского излучения, проходящего через предмет. Большие по размеру системы могут необязательно иметь два или более источников рентгеновского излучения с тем, чтобы получать две или более проекций через транспортный груз одновременно. Системы рентгеновской проверки используют дифференциальное поглощение рентгеновских лучей с низкой энергией и высокой энергией для создания очень грубой классификации проверенного материала и последующего использования этой грубой классификации для генерации изображения в "ложных цветах" для отображения. Небольшое число цветов (только 3 в большинстве существующих систем) используется для представления классификации материала.

Традиционные детекторы расположены в виде матрицы $1 \times N$, содержащей, как правило, фосфорные или Si-PIN диоды, в целях обеспечения получения изображения из N строк и M столбцов, захваченного строка-за-строкой в процессе прохождения предмета через сканирующую систему. Разрешение изображения, составляющее 1-2 мм, может быть достигнуто с помощью около 2000 детекторов в матрице. Однако эти системы просто выдают изображение, основанное на интегральной плотности (вдоль линии наблюдения между источником рентгеновского излучения и детектором) содержимого проверяемого предмета. Две различных матрицы детекторов используются для генерации единственного изображения, одна для генерации высокоэнергетического изображения и другая для генерации низкоэнергетического изображения. Это дает улучшенную оценку интегральной плотности и элементарную возможность идентифицировать предметы как органические или как металлические. В приложении проверки, в котором цель состоит в идентификации "контрабанды" или других интересующих предметов, диапазон материалов, которые неправильно попадают в "контрабандную" классификацию, является большим. Таким образом, может требоваться квалифицированный оператор для идентификации потенциально опасного материала среди большого числа ложных тревог.

Существует потребность в улучшенных системах проверки грузов и багажа.

Сущность изобретения

В соответствии с первым широким аспектом изобретения предоставлено устройство для проверки одного или более предметов груза или багажа, включающее в себя

источник падающего излучения, выполненный с возможностью облучения одного или более предметов;

множество детекторов, предназначенных для обнаружения порций излучения, испускаемых изнутри или проходящих через упомянутые один или более предметов в результате облучения падающим излучением, при этом каждый детектор выполнен с возможностью выдачи электрического импульса, вызываемого обнаруженными порциями, имеющего характерные размер или форму, зависящие от энергии порций;

один или более цифровых процессоров, выполненных с возможностью обработки каждого электрического импульса для определения характерного размера или формы и посредством этого генерации энергетического спектра детектора для каждого детектора из энергий обнаруженных порций, характеристики материала, связанного с упомянутым одним или более предметами, на основании энергетических спектров детектора.

В одном из вариантов осуществления каждая порция излучения представляет собой фотон, а упомянутое множество детекторов включает в себя один или более детекторов, каждый из которых состоит из сцинтилляционного материала, предназначенного для выдачи электромагнитного излучения посредством сцинтилляции от фотонов, и выдающего импульс элемента, предназначенного для выдачи электрического импульса из электромагнитного излучения. Выдающий импульс элемент может содержать чувствительный к фотонам материал, а упомянутое множество детекторов может быть расположено бок о бок в одной или более матрицах детекторов отдельных сцинтилляционных элементов из сцинтилляционного материала, каждый из которых охвачен отражающим материалом вокруг его сторон, размещен над чувствительным к фотонам материалом и оптически связан с ним. Сцинтилляционный материал может представлять собой лютеций-иттриевый оксиортосиликат (LYSO). Чувствительный к фотонам материал может представлять собой кремниевый фотоумножитель (SiPM). Отдельные сцинтилляционные элементы одной или более матриц детекторов могут предоставлять падающему излучению площадь поперечного сечения более $1,0 \text{ мм}^2$. Площадь поперечного сечения может составлять более 2 и менее 5 мм^2 .

В одном из вариантов осуществления один или более цифровых процессоров дополнительно выполнены с алгоритмом восстановления наложений, предназначенным для определения энергии, связанной с двумя или более перекрывающимися импульсами.

В одном из вариантов осуществления упомянутые один или более цифровых процессоров выполнены с возможностью вычисления эффективного атомного числа Z для каждого, по меньшей мере, из неко-

торых детекторов на основании по меньшей мере частично соответствующего энергетического спектра детектора. Один или более цифровых процессоров могут быть выполнены с возможностью вычисления эффективного атомного числа Z для каждого, по меньшей мере, из некоторых из детекторов посредством определения предсказанного энергетического спектра для материала с эффективным атомным числом Z с учетом оцененной толщины материала, выведенной из энергетического спектра детектора и контрольных данных ослабления на единицу массы для эффективного атомного числа Z ; и сравнения предсказанного энергетического спектра с энергетическим спектром детектора. Упомянутые один или более цифровых процессоров могут быть выполнены с возможностью вычисления эффективного атомного числа Z для каждого, по меньшей мере, из некоторых детекторов посредством определения предсказанного энергетического спектра для материала с эффективным атомным числом Z , с учетом калибровочной таблицы, сформированной путем измерения одного или более материалов с известным составом; и сравнения предсказанного энергетического спектра с энергетическим спектром детектора.

В одном из вариантов осуществления упомянутые один или более цифровых процессоров выполнены с возможностью осуществления этапа сравнения посредством вычисления целевой функции, зависящей от различия между энергетическим спектром детектора и предсказанным энергетическим спектром для материала с эффективным атомным числом Z .

В одном из вариантов осуществления калибровка усиления осуществляется на каждом детекторе отдельно для обеспечения согласованности определения энергии среди детекторов, а упомянутые один или более цифровых процессоров дополнительно выполнены с возможностью вычисления энергетического спектра детектора для каждого детектора с учетом калибровки усиления.

В одном из вариантов осуществления выполняется зависящая от скорости счета калибровка, включающая в себя подстройку энергетических спектров детектора для зависящего от скорости счета сдвига.

В одном из вариантов осуществления на энергетических спектрах детектора выполняется зависящая от системных параметров калибровка, включающая в себя подстройку по времени, температуре или другим системным параметрам.

В одном из вариантов осуществления упомянутые один или более цифровых процессоров дополнительно выполнены с возможностью сокращения полосы рабочих частот или использования памяти, связанного с обработкой или хранением энергетических спектров детектора, посредством осуществления быстрого преобразования Фурье энергетических спектров и удаления элементов дискретизации быстрого преобразования Фурье, имеющих низкий сигнал или отсутствие сигнала, с получением сокращенных преобразованных энергетических спектров детектора. Упомянутые один или более цифровых процессоров могут быть дополнительно выполнены с возможностью применения обратного быстрого преобразования Фурье на сокращенных преобразованных энергетических спектрах детектора для обеспечения реконструированных энергетических спектров детектора. Упомянутый один или более цифровых процессоров могут быть дополнительно выполнены с конкретным окном быстрого преобразования Фурье, оптимизированным для минимизации эффекта Гиббса быстрого преобразования Фурье.

В одном из вариантов осуществления упомянутые один или более цифровых процессоров дополнительно выполнены с алгоритмом удаления смещения базового уровня для удаления базового уровня цифрового сигнала из электрического импульса до дальнейшей обработки.

В одном из вариантов осуществления упомянутые один или более цифровых процессоров дополнительно выполнены с возможностью выдачи изображения упомянутых одного или более предметов, состоящего из пикселей, представляющего характеристику различных частей упомянутых одного или более предметов, выведенного из энергетических спектров детектора.

В одном из вариантов осуществления упомянутый один или более цифровых процессоров дополнительно выполнены с возможностью осуществления одного или более из разбиения, кластеризации, выделения контуров или скользящего среднего значения на основании эффективных атомных чисел, определенных для упомянутого множества детекторов.

В одном из вариантов осуществления упомянутый один или более цифровых процессоров дополнительно выполнены с возможностью осуществлять обнаружение угрозы на основании одного или более типов целевого материала.

Согласно второму широкому аспекту изобретения обеспечен способ проверки одного или более предметов груза или багажа, включающий в себя этапы:

облучение упомянутого одного или более предметов с использованием источника падающего излучения;

обнаружение порций излучения, испускаемых изнутри или проходящих через упомянутый один или более предметов в результате облучения падающим излучением с использованием множества детекторов, при этом каждый детектор выполнен с возможностью выдачи электрического импульса, вызываемого обнаруженными порциями, имеющего характерные размер или форму, зависящие от энергий порций;

обработка каждого электрического импульса с применением одного или более цифровых процессоров для определения характерного размера или формы;

генерация энергетического спектра детектора для каждого детектора из энергий обнаруженных порций;

характеризация материала, связанного с упомянутым одним или более предметами, на основании энергетических спектров детектора.

Везде в настоящей спецификации, включая формулу изобретения, если из контекста не следует иное, слово "включает в себя" и вариации, такие как "включают в себя" и "включающий в себя", будут пониматься как подразумевающие включение установленного целого числа, или этапа, или группы целых чисел или этапов, но не подразумевающие исключения любого другого целого числа, или этапа, или группы целых чисел или этапов.

Везде в настоящей спецификации, включая формулу изобретения, если из контекста не следует иное, слова "груз или багаж" охватывают бандероли, письма, посылки, личные вещи, перевозимый груз, коробки, содержащие потребительские или другие товары, и все другие транспортируемые товары, которые желательно или необходимо просканировать в отношении определенных типов материалов, включая, но не ограничиваясь указанным, контрабанду и опасные или взрывчатые материалы, которые могут быть размещены случайно или размещены сознательно вследствие криминального, террористического или военного действия.

Везде в настоящей спецификации, включая формулу изобретения, если из контекста не следует иное, термин "порции" в отношении падающего излучения включает отдельные безмассовые квантовые частицы, такие как рентгеновское излучение, гамма-излучение или другие фотоны, нейтроны или другие имеющие массу частицы; и также простирается в своих самых широких аспектах на любое другое корпускулярное излучение, для которого энергия каждой частицы может быть определена и обнаружена.

Везде в настоящей спецификации, включая формулу изобретения, если из контекста не следует иное, слова "энергетический спектр" в отношении конкретного детектора относятся к генерации значений энергии отдельных порций излучения, испускаемых из или проходящих через часть исследуемых предметов в соответствии с обнаруженным за интервал времени от конкретного детектора, при этом данные значения энергии могут включать в себя значения по диапазону, обычно непрерывному, и могут быть представлены как гистограмма отсчетов обнаружения против множества определенных значений дискретизации энергии, при этом число значений дискретизации представляет требуемую или достижимую разрешающую способность по энергии и составляет по меньшей мере 10 интервалов дискретизации, но предпочтительно более чем 50, 100 или 200 интервалов дискретизации.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1 и 10 показан общий обзор рентгеновской системы в форме, которая может применяться для проверки груза и багажа, согласно двум предпочтительным вариантам осуществления.

Фиг. 2 иллюстрирует примерную диаграмму внутреннего пространства рентгеновской камеры согласно варианту осуществления.

Фиг. 3 показывает более подробный вид системы обнаружения и электроники обработки согласно варианту осуществления.

Фиг. 4 иллюстрирует блок-схему последовательности операций способа обработки эффективного Z полных энергетических спектров, вычисленных электроникой обработки импульса, согласно варианту осуществления.

Фиг. 5 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую удаление наложения двух импульсов из спектра согласно варианту осуществления.

Фиг. 6 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую удаление наложения двух и трех импульсов из спектра и трех импульсов из спектра согласно другому варианту осуществления.

Фиг. 7 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую частичное удаление наложения двух и трех импульсов из спектра, при этом предполагается, что только 2 импульса имеют наложение согласно варианту осуществления.

Фиг. 8 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую форму сглаживающего спектр фильтра при использовании прямоугольного окна или окна синус-квадратного импульса согласно варианту осуществления.

Фиг. 9 иллюстрирует, каким образом данные организуются и создают изображение просканированного образца до начала последующей обработки и отображения изображения согласно варианту осуществления.

Фиг. 10 иллюстрирует беспроводной вариант системы с фиг. 1.

Фиг. 11 представляет собой график, иллюстрирующий неоткалиброванные принятые спектры от множества детекторов согласно варианту осуществления.

Фиг. 12 представляет собой график, иллюстрирующий множество коэффициентов усиления детектора, вычисленных на основании калибровочной процедуры согласно варианту осуществления.

Фиг. 13 представляет собой график, иллюстрирующий принятые спектры от множества детекторов после установки цифрового коэффициента усиления детекторов на основании коэффициентов усиления детектора, проиллюстрированных на фиг. 12.

Фиг. 14 иллюстрирует результаты эффективного процесса интерполяции Z для случая 10%-й передачи согласно варианту осуществления.

Фиг. 15 иллюстрирует значения эффективного Z, изображенные в зависимости от интенсивно-

сти (процент передачи) для диапазона образцов материала, протестированного согласно варианту осуществления.

Фиг. 16А, В, С иллюстрируют подсистему детектора, включающую в себя матрицу детекторов согласно вариантам осуществления, в которых линейная матрица сцинтилляционных кристаллов соединена с матрицей выдающих импульсы элементов в форме кремниевых фотоумножителей.

Фиг. 16D и E иллюстрируют подсистему детектора, включающую в себя единичные сцинтилляционные кристаллы, отдельно связанные с матрицей выдающих импульс элементов в форме кремниевых фотоумножителей посредством слоя оптической связи, вставленного между сцинтилляционными кристаллами и кремниевыми фотоумножителями, согласно варианту осуществления.

Фиг. 17 иллюстрирует подсистему детектора, преобразующую фотоны в импульсы напряжения для обработки импульсов, согласно варианту осуществления.

Фиг. 18 иллюстрирует систему проверки, применяющую гамма-лучи для идентификации материала, согласно варианту осуществления.

Фиг. 19 иллюстрирует пример формирования кластеров, в которых единичные плитки игнорируются, согласно варианту осуществления.

Фиг. 20 иллюстрирует пример этапов обработки эффективного Z согласно варианту осуществления

Фиг. 21 иллюстрирует таблицу, относящуюся к маске границ $L(c)$, проиндексированной в столбцах, согласно варианту осуществления.

Фиг. 22 иллюстрирует поведение скользящего среднего значения при его перемещении через границу согласно варианту осуществления.

Подробное описание вариантов осуществления

В настоящем раскрытии удобно описать изобретение относительно особенно предпочтительных вариантов осуществления. Однако изобретение является применимым к широкому диапазону способов и систем, и следует понимать, что другие конструкции и схемы также рассматривают как находящиеся в пределах объема изобретения. Различные модификации, изменения, вариации и/или дополнения к конструкции и схемам, описанным в настоящем раскрытии, также рассматривают как находящиеся в пределах формы и объема настоящего изобретения.

Настоящее изобретение относится к способу и устройству для идентификации материала с применением множества типов излучения для анализа. В частности, устройства и способы, иллюстрируемые в настоящем раскрытии, могут быть применены к проверке с помощью рентгеновского излучения, однако также следует понимать, что устройства и способы могли бы быть легко модифицированы для других типов падающего излучения, таких как нейтроны или гамма-лучи, или других типов испускаемого излучения, в частности путем замены на другую форму блока детектора, с тем, чтобы обнаружить, например, электромагнитное, нейтронное, гамма-излучение, световое, акустическое или другое излучение. Такие модификации находятся в пределах самого широкого аспекта изобретения.

В дополнение к тому, что рентгеновские лучи затухают при передаче через материю, рентгеновские лучи, проходящие через материю, взаимодействуют с этой материей через множество модальностей, включая рассеяние от кристаллографических плоскостей, вызывающее флуоресцентное рентгеновское испускание изнутри электронной структуры элементов; и рассеяние от наноразмерных структур в пределах сканируемого материала. Эти формы взаимодействия немного изменяют энергетический спектр переданного рентгеновского пучка, и посредством обнаружения и анализа этого изменения в энергетическом спектре можно вывести элементарную специфичную в отношении элемента информацию о предмете, через который прошел рентгеновский пучок.

Система по одному из вариантов осуществления, описанных ниже, обеспечивает систему обнаружения, способную к оценке энергии отдельных рентгеновских фотонов, принятых в детекторе. Указанное достигается посредством использования одной матрицы детекторов на источник рентгеновского излучения, при этом каждый из детекторов в матрице сконструирован из соответствующего материала детектора, соединенного с фотоумножителем, и выдает аналоговый сигнал, содержащий ряд импульсов - по одному импульсу для каждого обнаруженного рентгеновского излучения, которые могут накладываться или не накладываться друг на друга, когда принимаются в детекторе. Матрица детекторов может быть расположена аналогично системам проверки груза или багажа уровня техники в целях построения изображения характеристик предмета. В отличие от систем предшествующего уровня техники матрица детекторов способна измерять энергию каждого обнаруженного фотона.

Система обработки импульсов затем применяется для генерации гистограммы для каждого одиночного детектора. Данная гистограмма включает подсчет числа рентгеновских лучей, попадающих в каждый интервал дискретизации гистограммы в заданном временном интервале. Интервалы дискретизации гистограммы представляют диапазоны энергий принятых рентгеновских лучей, а гистограмма, следовательно, представляет собой энергетический спектр принятого рентгеновского пучка. Может иметься большое число интервалов дискретизации гистограммы, например до 512 отдельных энергетических полос или более, что представляет собой огромное улучшение по сравнению с грубым измерением в двух энергетических полосах в пределах существующих систем сканирования.

Система описанных вариантов осуществления использует этот полный энергетический спектр вы-

сокого разрешения, чтобы получить намного более точную оценку эффективного атомного числа проверяемого материала (эффективное Z), что позволяет получить намного более точную классификацию проверяемого материала.

Общий обзор

На фиг. 1 показан общий обзор системы рентгеновской проверки грузов и багажа согласно варианту осуществления изобретения.

Основные характеристики системы следующие.

1. Рентгеновская камера (100), в которой образец (101) подвергается сканированию. Камера спроектирована так, чтобы содержать источник(и) рентгеновского излучения и соответствующие технические средства детектора и гарантировать, чтобы рентгеновские лучи не выпускались за пределы камеры в целях обеспечения безопасности операторов.

2. Средство для вызывания относительного движения между образцом (101), подлежащим проверке, и рентгеновской камерой (100). В одном из вариантов осуществления оно будет включать в себя средство для транспортировки (102) образца, подлежащего проверке (101), в рентгеновскую камеру. В типовой системе оно может представлять собой конвейерную ленту, роликовый транспортер или аналогичное устройство, но система, описанная в настоящем раскрытии, будет функционировать одинаково хорошо с любыми средствами транспортировки. Один предпочтительный вариант осуществления заключается в прохождении образца через туннель, в котором источник(и) рентгеновского излучения и матрица(ы) детекторов расположены в зафиксированных положениях. Однако в альтернативном варианте осуществления источник(и) рентгеновского излучения и матрица(ы) детекторов могут перемещаться мимо образца.

3. В пределах рентгеновской камеры (100) находится следующее.

a) Один или более источников рентгеновского излучения (200, 201).

b) Одна или более матриц (202, 209) рентгеновских детекторов, при этом имеется по меньшей мере одна матрица детекторов для каждого источника рентгеновского излучения.

c) Матрицы рентгеновских детекторов (202, 209) могут быть дополнительно разделены на меньшие матрицы детекторов, если это требуется для реализации. Система, описанная в настоящем раскрытии, не зависит от конкретной схемы и/или подразбиения матрицы детекторов.

d) Цифровые процессоры (203, 210) для обработки принятых рентгеновских импульсов от матрицы детекторов (202, 209). В зависимости от архитектуры реализации цифровые процессоры могут

i) находиться на тех же самых платах, что и детекторная подсистема;

ii) находиться на отдельных технических средствах, размещенных внутри или снаружи корпуса рентгеновского сканера;

iii) являться частью хост-системы;

iv) или может иметь место комбинация указанного выше.

Как правило, имеются соответствующие средства, такие как главный компьютер (103), или, как показано на фиг. 10, система беспроводного управления и отображения (104), для управления и конфигурирования системы рентгеновской проверки и отображения и последующей обработки данных, полученных от системы рентгеновского сканирования.

В некоторых системных конфигурациях, в которых выполняется автоматизированное обнаружение угрозы, может не быть необходимости в подсистеме управления/отображения, но вместо этого могут требоваться некоторые средства сообщения об обнаруженных угрозах.

Фиг. 2 иллюстрирует типовую диаграмму внутренней части рентгеновской камеры, и на ней показано следующее.

1. Источники рентгеновского излучения (200) и (201), из которых рентгеновские лучи (204) и (206) падают на тестируемый образец (208).

2. Матрица детекторов (202) и (209) для обнаружения рентгеновских лучей (205) и (207), падающих на матрицу детекторов.

3. Сигналы от каждой матрицы детекторов соединены с цифровыми процессорами (203) и (210). Цифровые процессоры могут быть установлены внутри или снаружи рентгеновской камеры и могут быть частично объединены с хост-системой.

4. Выходные данные (211) от цифровых процессоров передаются на главный компьютер для отображения, при этом главный компьютер отправляет/принимает управляющие сигналы (212) к цифровым процессорам/от цифровых процессоров.

Расположение компонентов на фиг. 2 является только иллюстративным и не указывает конкретное требование для числа источников или детекторов и также не задает требования по размещению источников или детекторов. Система обнаружения и обработки, описанная в настоящем раскрытии, будет успешно работать с любым числом источников и матриц детекторов и независимо от того, как эти источники размещены. Ключевым пунктом является то, что рентгеновские лучи из источника 1 проходят через тестируемый образец и принимаются в матрице детекторов 1, а рентгеновские лучи из источников от 2 до N проходят через образец и принимаются в матрицах детекторов от 2 до N (то есть система может работать с любым числом источников и любым числом матриц детекторов, которое может быть или не

быть равно числу источников).

На фиг. 3 показан более подробный вид системы обнаружения и обработки. На данной фигуре показаны этапы для единственного детектора. Эффективное Z может использовать, и для последующей обработки изображений будет требоваться, доступ к спектрам от всех детекторов.

Для каждого детектора в каждой матрице детекторов имеется система обнаружения и электроника обработки, включающие в себя следующее.

1. Детекторная подсистема (301) для каждого отдельного детекторного элемента (с N такими подсистемами для матрицы детекторов $1 \times N$), включающая в себя следующее.

a) Материал детектора для обнаружения падающих рентгеновских лучей (300) и преобразования каждого обнаруженного рентгеновского излучения в световой импульс.

b) Фотоумножитель для приема и усиления импульсов падающего света в аналоговый сигнал, включающий в себя импульсы (312), которые могут перекрываться или не перекрываться.

c) Соответствующая аналоговая электроника, которая может включать в себя фильтрацию.

d) Необязательный усилитель с регулируемым усилением (302). Также может использоваться фиксированное аналоговое усиление или может быть желательным использование дополнительного усиления для фотоумножителя.

2. Аналого-цифровой преобразователь (303) для преобразования аналоговых сигналов в цифровые значения (313).

3. Регулируемое цифровое усиление (304) для соответствующей корректировки уровней цифрового сигнала до обработки.

4. Высокоскоростная обработка импульсов (305) для каждой детекторной подсистемы (301), например для систем обработки импульсов, раскрытых в патенте США № 7383142, патенте США № 8812268 и WO/2015/085372, включающая в себя следующее.

a) Отслеживание и удаление базового уровня или удаление фиксированного базового уровня.

b) Обнаружение входящих импульсов.

c) Вычисление энергии каждого обнаруженного импульса.

d) Накопление вычисленных значений энергии на энергетической гистограмме (энергетическая гистограмма 315).

e) Выдача накопленных значений гистограммы каждый раз, когда принимается стробирующий сигнал.

f) Сброс значений гистограммы перед следующим интервалом получения данных.

5. Источник стробирующего сигнала (306), который выдает стробирующий сигнал (314) через регулярные предварительно сконфигурированные интервалы.

a) Время стробирования представляет собой постоянный короткий интервал, который определяет период накопления гистограммы.

b) Это время стробирования также определяет шаг пикселя на получаемых в результате рентгеновских изображениях. Шаг пикселя задается временем стробирования, умноженным на скорость образца. Например, время стробирования 10 мс и перемещение образца на конвейере со скоростью 0,1 м/с дает шаг пикселя, составляющий 1 мм, в направлении перемещения.

6. При отсутствии источника стробирующего сигнала и стробирующего сигнала другое подходящее средство может применяться для управления и синхронизации продолжительности цикла получения энергетической гистограммы для всех детекторов. Например, имеющий подходящую точность сигнал сетевой синхронизации может использоваться вместо стробирующего сигнала.

7. Калибровочная система (307), которая принимает входные данные из соответствующих аналоговых и цифровых сигналов и затем передает требуемые калибровочные параметры обратно к различным блокам обработки. Калибровочная система выполняет:

a) идентификацию параметров импульса;

b) калибровку усиления;

c) энергетическую калибровку;

d) калибровку смещения базового уровня (если используется фиксированный базовый уровень);

e) зависящий от скорости счета сдвиг базового уровня.

8. Вычисление эффективного Z (308), в котором берут вычисленные энергетические спектры в каждом детекторе в течение каждого времени стробирования и определяют эффективное Z образца. Это, в свою очередь, приводит к выдаче изображения эффективного Z .

9. Формирование изображения интенсивности, включающее в себя:

a) изображение интенсивности (309), основанное на суммарной принятой энергии по энергетическому спектру;

b) изображение с высоким проникновением или высококонтрастное изображение (310), определенное путем интегрирования выбранных энергетических полос из полного энергетического спектра.

10. Последующая обработка и отображение изображения (311) с функциями, которые могут включать одно или более из следующего:

a) повышение контурной резкости изображения;

- b) выделение и/или повышение резкости края;
- c) фильтрация изображения;
- d) приложение цветовой карты эффективного Z для покраски пикселей изображения на основании идентифицированного материала.
- e) отбор, отображение и наложение 2-D изображений для каждой матрицы детекторов
 - i) эффективное Z ;
 - ii) интенсивность;
 - iii) изображения с высоким проникновением/высокой контрастностью;
 - f) отображение изображений на соответствующем мониторе или другом устройстве отображения.

Как описано выше и проиллюстрировано на фиг. 9, изображения, выданные для отображения, содержат ряд элементов данных, записанных для каждого из N детекторных элементов (501) и для каждого времени стробирования (500).

Данные, полученные для детектора i в течение времени стробирования j , используются при получении эффективного Z , интенсивности и изображений с высоким проникновением/высокой контрастностью, как показано на фиг. 9. Во время обработки ряд элементов записывают в каждый пиксель (502), включая один или более из

- 1) рентгеновских энергетических спектров;
- 2) вычисленного значения эффективного Z ;
- 3) значения интенсивности (суммирование полного спектра);
- 4) значений интенсивности с высоким проникновением/высокой контрастностью, вычисленных путем интегрирования одной или более энергетических полос.

Фиг. 9 иллюстрирует, каким образом эти данные организуются и встраиваются в изображение просканированного образца до начала последующей обработки и отображения изображения.

Детекторная подсистема

В детекторной подсистеме, используемой в обычных установках рентгеновского сканирования, как для промышленных приложений, так и для приложений безопасности, используется сцинтиллятор (такой как люминофор), соединенный с матрицей PIN-диодов, в целях преобразования переданного рентгеновского излучения в свет и впоследствии в электрический сигнал.

Для того чтобы достигнуть разрешения порядка 1-2 мм, используется более чем 2000 детекторных пикселей. Две отдельных матрицы детекторов (и электронных схем считывания) требуются для обнаружения низкоэнергетических рентгеновских лучей и высокоэнергетических рентгеновских лучей.

Когда рентгеновское излучение сталкивается с детектором, оно продуцирует в детекторе электронный заряд, пропорциональный энергии рентгеновского излучения, при этом чем больше энергия, тем больший заряд индуцируется в детекторе. Однако более подробное исследование матриц детекторов проиллюстрировало, что системы детекторов не обладают разрешением для обнаружения отдельных рентгеновских фотонов, и вместо этого они интегрируют весь заряд, продуцируемый пикселем детектора, по заданному периоду времени, и преобразуют его в цифровое значение. Когда мгновенный поток рентгеновских лучей на пикселе детектора является большим, выдается большое цифровое значение (яркий пиксель в изображении), и когда только несколько рентгеновских лучей сталкивается с детектором, выдается маленькое цифровое значение (темный пиксель в изображении).

Детекторная подсистема по данному варианту осуществления включает в себя

- a) материал детектора;
- b) материал фотоумножителя, соединенный с материалом детектора с использованием соответствующих средств;
- c) аналоговую электронику.

Материал детектора может иметь размеры $X \times Y \times Z$ или некоторую другую форму. Фотоумножитель может представлять собой кремниевый фотоумножитель (SiPM), а средства соединения могут иметь форму оптической смазки или оптического соединительного материала. Может требоваться использование формы кронштейна или фиксатора для удержания детектора в нужном положении относительно фотоумножителя. Фотоумножитель требует соответствующего электрического питания и напряжения смещения для генерации требуемого уровня усиления обнаруженного сигнала.

В приложении рентгеновского сканирования требуется большое число одноэлементных детекторных подсистем для производства каждой матрицы детекторов. Может быть желательной их группировка соответствующим способом в зависимости от конкретных требований рентгеновского сканирования. Отдельные элементы материала детектора могут группироваться в короткую матрицу из M детекторов. Небольшие группы из M детекторных элементов могут быть установлены на единственную плату детектора, например 2, 4 или больше групп из M элементов на плате. Полную матрицу детекторов затем составляют из нескольких плат детектора, требуемых для достижения общего числа N детекторных элементов на одну матрицу.

Детекторные подсистемы могут быть организованы во множестве различных конфигураций, включая линейные матрицы устройств $1 \times N$; квадратные или прямоугольные матрицы устройств $N \times M$; или L -

образные, расположенные в шахматном порядке, шевронные или чередующиеся матрицы. Одним из примеров устройства обнаружения, применяемого для преобразования фотонов падающего излучения в электрический сигнал, является комбинация сцинтилляционного кристалла, соединенного с кремниевым фотоумножителем (SiPM) или мультипиксельным счетчиком фотонов (MPPC).

В таком устройстве обнаружения сцинтилляционный кристалл, такой как LYSO (1701), применяется для преобразования фотона падающего излучения (1700) в УФ фотоны (1703). В случае сцинтилляционного материала LYSO пиковое испускание УФ фотонов происходит на 420 нм, при этом другие сцинтилляционные материалы, такие как приведенные в табл. 1, могут иметь другие пики испускания. После взаимодействия фотона излучения (1700) со сцинтилляционным кристаллом (1701) с выдачей УФ фотонов (1703) мультипиксельный счетчик фотонов, или кремниевый фотоумножитель (1704) с чувствительностью в УФ области (такой как имеющий рабочие характеристики, приведенные в табл. 2), может использоваться для обнаружения этих фотонов и выдачи электрического сигнала.

На фиг. 16А изображена линейная матрица сцинтилляционных кристаллов LYSO (1600), показывающая, как образом единичные устройства обнаружения могут быть объединены друг с другом в целях формирования линейной матрицы. В этом характерном примере отдельные кристаллы LYSO (1600) имеют поперечное сечение 1,8 мм и высоту 5 мм, при этом отдельные кристаллы LYSO (1600) обернуты вокруг своих сторон отражающим материалом, чтобы способствовать получению всех УФ фотонов. Шаг этой типовой матрицы составляет 2,95 мм, длина составляет 79,2 мм, а ширина матрицы составляет 2,5 мм.

На фигурах 16В и С изображена матрица детекторов на виде сверху и виде сбоку соответственно, содержащая линейную матрицу кристаллов LYSO, изображенную на 16А, соединенную с элементом выдачи электрического импульса (1604) на подложке (1605). Элемент выдачи электрического импульса может содержать кремниевый фотоумножитель (SiPM). Улучшенный зеркальный рефлектор (ESR) или алюминиевая или другая отражающая фольга (1601) размещается вокруг боковых поверхностей сцинтилляционных кристаллов с тем, чтобы направлять сцинтилляционные фотоны на кремниевый материал фотоумножителя (1604) и предотвратить утечку света (перекрестные помехи) между смежными устройствами обнаружения. Дополнительно оптический соединитель (1606) может быть помещен между кристаллами LYSO и SiPM и может содержать любое число известных соответствующих материалов, например тонкий слой оптически прозрачного клея.

В другом варианте осуществления сцинтилляционные кристаллы (1607) могут быть отдельно соединены с элементами выдачи электрического импульса (1604), как изображено на фигурах 16D и E. Соединение может быть достигнуто множеством способов, например посредством вставки оптически прозрачной липкой пленки (1609) или оптического соединительного материала между сцинтилляционными кристаллами (1607) и элементами выдачи электрического импульса (1604), при этом элементы выдачи электрического импульса (1604) могут содержать SiPM или MPPC. Соединение может быть выполнено сборочным механизмом-перекладчиком в целях выравнивания по отдельности и соединения компонентов соединительного материала. Сцинтилляционные кристаллы могут быть обернуты в отражающий материал, такой как фольга или материал ESR (1608), чтобы способствовать захвату фотонов.

В любом из вариантов осуществления кристаллы LYSO (1600, 1607) могут обычно иметь поперечное сечение (ширину), составляющее приблизительно 1-2 мм, глубину, составляющую приблизительно 1-2 мм, и высоту, составляющую приблизительно 3-5 мм, при этом отражающая пленка или пленка ESR (1601, 1608) имеет толщину приблизительно 0,05-0,1 мм. В предпочтительном варианте осуществления детекторов, показанных на фиг. 16D, поперечное сечение составляет 1,62 мм, глубина составляет 1,24 мм, высота составляет приблизительно 4,07 мм, а пленка ESR имеет толщину 0,07 мм. Площадь поперечного сечения материала сцинтиллятора предпочтительно превышает 1 мм² и может быть больше 2 и меньше 5 мм².

В то время как в примерной детекторной подсистеме используется сцинтиллятор, который является компактным, прочным, эффективным по затратам и негигроскопичным, в самом широком аспекте изобретения также могут рассматриваться другие детекторные подсистемы. Они включают в себя детекторные подсистемы, которые используют альтернативные неорганические или неорганические сцинтилляционные материалы, и характеристики некоторых таких материалов приведены в табл. 1. Другие механизмы для преобразования фотонов излучения в электрические сигналы также могут быть рассмотрены для детекторной подсистемы. Некоторые примеры других вариантов материалов детектора включают в себя следующее.

а) Германий высокой чистоты (HPGe): достигает разрешения 120 эВ, являющегося "золотым стандартом" для линии рентгеновского излучения Fe55 на 5,9 кэВ, детекторы могут быть сделаны с толщиной >10 мм, в результате чего они обнаруживают рентгеновские лучи с высокой энергией вплоть до многих сотен кэВ.

б) Кремниевый однопролетный лавинно-пролетный диод (SDD): детекторы SDD, измеряющие излучение с относительно низкой энергией. Для той же самой линии Fe55 на 5,9 кэВ детекторы SDD имеют разрешение приблизительно 130 эВ. Кроме того, эти детекторы могут функционировать с большими скоростями счета, чем детекторы HPGe, и при температуре немного ниже комнатной.

с) PIN-диоды: чувствительность обнаружения для рентгеновских лучей до 60 кэВ является существенно более высокой, чем у детекторов SDD, и снижается до приблизительно 1% для рентгеновских энергий выше 150 кэВ. Эти детекторы могут функционировать при комнатной температуре, однако разрешение улучшается при охлаждении, и разрешение для линий 5,9 кэВ составляет ~180 эВ.

д) Кадмиевый теллурид цинка: представляет собой твердотельный детектор излучения при комнатной температуре, применяемый для прямого обнаружения, имеющего среднюю энергию рентгеновского и гамма-излучения. Он имеет чувствительность обнаружения для 60 кэВ рентгеновских лучей, очень близкую к 100%, и даже для фотонов рентгеновских лучей с энергиями 150 эВ чувствительность обнаружения остается превышающей 50%.

е) Йодид цезия (CsI(Tl)): представляет собой сцинтилляционный материал, используемый для обнаружения рентгеновских лучей в приложениях медицинской визуализации и диагностики. Сцинтилляционный материал используется для преобразования рентгеновского излучения в фотоны света, которые обычно затем преобразуют в электрический сигнал с помощью любого фотоэлектронного умножителя. CsI представляет собой дешевый и плотный материал и имеет хорошую чувствительность обнаружения рентгеновских лучей и гамма-лучей до нескольких сотен кэВ.

Таблица 1. Свойства ряда сцинтилляционных материалов

Сцинтиллятор	Плотность	Макс. испускание (нм)	Показатель преломления	Время первичного затухания (нс)	Световой выход (Ф/МэВ)
NaI (Tl)	3,67	415	1,85	230	38000
CsI (Tl)	4,51	540	1,8	680	65000
CsI (Na)	4,51	420	1,84	460	39000
Лигий (Eu)	4,08	470	1,96	1400	11000
BGO	7,13	480	2,15	300	8200
CdWO ₄	7,9	470	2,3	1100	15000
PbWO ₄	8,3	500	---	15	600
GSO	6,71	440	1,85	56	9000
LSO	7,4	420	1,82	47	25000
LSYSO	7,2	420	1,52	42	28000
YAP (Ce)	4,56	370	1,82	27	18000
YAG	4,55	350	1,94	27	8000
BaF ₂ (быстрый)	4,88	220	1,54	0,6	1400
LaCl ₃ (Ce)	3,79	330	1,9	28	46000
LaBr ₃ (Ce)	5,29	350	---	30	61000
CaF ₂ (Eu)	3,19	435	1,47	900	24000
ZnS (Ag)	4,09	450	2,36	110	50000

Таблица 2. Данные рабочих характеристики для сцинтилляторов LYSO

Геометрические данные		
Активная площадь сенсора	3,0×3,0	мм ²
Размер микропикселя	50×50	мкм ²
Число пикселей	3600	

Геометрическая эффективность	63%	
Спектральные свойства		
Спектральный диапазон	300-800	нм
Пиковая длина волны	420	нм
PDE при 420 нм ²	>40%	
Усиление M ¹	~6×10 ⁶	
Темп. коэффициент ¹	$\left \frac{1}{M} \cdot \frac{\partial M}{\partial T} \right < 1\%$	°C ⁻¹
Число темных отсчетов ¹	<500	кГц/мм ²
Перекрестные помехи ¹	~24%	
Электрические свойства		
Напряжение пробоя	25±3	В
Рабочее напряжение	10-20%	Перенапряжение ¹

⁽¹⁾ При 20% перенапряжении и 20°C

⁽²⁾ Измерение PDE, основанное на статистике Пуассона с нулевым пиком; на значение не влияют перекрестные помехи и остаточная пульсация

Особым преимуществом варианта осуществления сцинтиллятора и фотоумножителя, описанного в настоящем раскрытии, является масштабируемость элементов обнаружения, обеспечивающая легкую приспособляемость к большим системам сканирования, таким как применяемые для грузов большого размера, которые могут иметь линейный размер два или более метров. Это является отличием от материалов прямого преобразования, таких как кадмиевый теллурид цинка, которые имеют неприемлемое время простоя при увеличении площади отдельного детекторного элемента.

Этапы обработки

В приведенных ниже разделах кратко описаны этапы, включаемые в обработку каждой конкретной стадии различных алгоритмов.

1. Калибровка

Система сканирования включает в себя большое число отдельных детекторов. Хотя каждый детектор и связанная с ним электроника в идеальном случае проектируются для выдачи идентичного отклика на падающее излучение, на практике это будет невозможно. Эти различия между детекторами приводят к вариациям в выходном энергетическом спектре от детектора к детектору. Посредством правильной и полной калибровки системы обнаружения выходные энергетические спектры от обрабатываемых импульсы цифровых процессоров могут быть соответственно откалиброваны таким образом, чтобы они представляли интенсивность принятых рентгеновских лучей в известных узких диапазонах дискретизации.

1.1. Калибровка импульса детектора

Калибровка импульса детектора применяется для идентификации характеристик импульса для каждого детектора, требуемых системой обработки импульса. Точные требуемые параметры могут отличаться в зависимости от системы обнаружения. Для типичных приложений, в которых применяется способ обработки импульсов, раскрытый в патенте США № 7383142 и патенте США № 8812268, импульсы моделируют как усредненную двойную экспоненту в форме:

$$p(t) = \int_{t-T_a}^t A [\exp(-\alpha(\tau - t_0)) - \exp(-\beta(\tau - t_0))] d\tau \quad (\text{Уравнение 1})$$

где α и β представляют собой константы времени спадающего фронта и нарастающего фронта соответственно, t_0 представляет собой время поступления импульса, T_a представляет собой окно усреднения импульса, и A представляет собой коэффициент масштабирования импульса, связанный с энергией импульса.

Для обработки требуется два параметра α и β и форма импульса $p(t)$, которая может быть получена через соответствующий способ калибровки, или из информации о конструкции подсистемы обнаружения. Соответствующий способ для оценки α , β и $p(t)$ по принятым импульсам описан ниже.

1.2. Калибровка усиления детектора

Каждая детекторная подсистема, объединенная с аналого-цифровым преобразователем, будет иметь немного отличающиеся характеристики вследствие производственных вариаций. В результате таких вариаций компонентов энергетические спектры будут масштабированы по-разному. Вариации, отличные от масштабирования усиления, обрабатываются в калибровке смещения базового уровня и калибровке по энергии.

Цель калибровки усиления состоит в том, чтобы достичь выравнивания энергетических спектров, выдаваемых электроникой обработки импульсов, по всем детекторам. Потребность в абсолютной точности может быть снижена или устранена, если применяется калибровка каждого детектора по энергии.

Калибровка усиления может быть достигнута множеством способов. Следующий подход может быть применен.

1. Подстроить известный источник рентгеновского излучения.
 - a) Материал со специфическими характеристиками может быть вставлен в пучок. Например, свинец (Pb) имеет известную границу полосы поглощения в 88 кэВ.
 - b) Использовать известное излучение материала детектора (например, LYSO), обнаруженное им самим (автоспектр).
2. Измерить энергетический спектр на каждом детекторе в соответствии с выдаваемым электроникой обработки импульсов.
3. Обеспечить получение достаточного объема данных в целях достижения гладкого спектра с минимальным шумом.
4. Выбрать характеристики или характеристику, по которым будет выполняться выравнивание. Например:
 - a) конкретный пик в спектре;
 - b) граница полосы поглощения (для случая Pb);
 - c) форма всего спектра (подходит для автоспектра LYSO).
5. Вычислить интервал дискретизации гистограммы, соответствующий положению характеристики для каждого детектора.
6. Вычислить медиану этих интервалов дискретизации положений характеристики для всех детекторов.
7. Требуемое усиление для каждого детектора затем вычисляют как отношение медианного положения к конкретному положению характеристики детектора. Замечание: выбирают медиану или другое соответствующее контрольное значение (например, максимум или минимум). Медиану выбирают с тем, чтобы некоторые каналы были усилены, а некоторые ослаблены, в отличие от ослабления всех каналов до минимальной амплитуды.
8. Усиление затем применяют к каждому каналу детектора. Усиление может быть применено как аналоговое усиление, цифровое усиление или комбинация обоих, в зависимости от функциональности конкретной системы. Для лучших результатов по меньшей мере часть усиления является цифровым усилением, при котором может быть достигнуто усиление с произвольно высокой точностью.
9. Повторно измеряют энергетический спектр в каждом детекторе и подтверждают, что заданное выравнивание было достигнуто.
10. Если требуется, вычисляют обновленную/усовершенствованную калибровку усиления для каждого детектора и применяют обновленную калибровку к каждому детектору.
11. Повторяют этапы 9 и 10 так часто, как требуется, чтобы достигнуть заданного соответствия между спектрами для всех детекторов.

Для способов вычисления эффективного Z , изложенных в настоящем раскрытии, было обнаружено, что спектральное выравнивание в пределах 1-2% может быть достигнуто и является желательным для получения точных и согласованных результатов для эффективного Z .

В практической реализации подсистемы обнаружения может иметься множество карт детекторов, каждая с множеством детекторов. Общее число детекторов может составлять несколько тысяч или больше. Результаты для одного из примеров такой платы представлены в настоящем раскрытии. Плата из примера содержит 108 детекторов, и в данном случае LYSO используется в качестве сцинтилляционного материала. Эти детекторы упакованы в линейные матрицы из 27 детекторов. Каждая плата детекторов, следовательно, использует 4×27 матриц детекторов, и суммарно достигается общее число, составляющее 108 детекторов.

Когда рентгеновские лучи падают на детектор, фотоны испускаются LYSO на основании энергии падающего рентгеновского излучения. Каждый детектор размещен выше SiPM, и именно SiPM обнаруживает и усиливает испущенные фотоны. Детекторы соединены с SiPM через оптическую смазку. Усиление каждого SiPM определяется приложенным напряжением смещения и пробивным напряжением SiPM. В результате вариаций в материале LYSO качестве соединения между LYSO и SiPM, а также вариаций в усилении SiPM и свойствах материала SiPM, может присутствовать значительное различие в энергии принятого импульса для заданной падающей рентгеновской энергии.

Следствием вариации в обнаруженной энергии импульса является то, что энергетические спектры не являются одинаковыми для всех детекторов. Это можно видеть на фиг. 11, где изображены неоткалиброванные принятые спектры от всех 108 детекторов. Эти энергетические спектры измерены, когда свинцовый (Pb) образец находился в рентгеновском пучке, и структура энергетического спектра свинца ясно видна. Можно заметить, что хвост энергетического спектра распределен в диапазоне приблизительно 150 интервалов дискретизации гистограммы. Это означает, что фактическая энергия на интервал дискретизации сильно отличается для каждого детектора.

Посредством следования процедуре калибровки усиления, изложенной выше, множество усилений детектора было вычислено, как показано на фиг. 12. На этой фигуре значение откалиброванного усиления находится в диапазоне приблизительно от 0,75 до 1,45.

После установки цифрового усиления равным усилениям детектора с фиг. 12 энергетические спектры от 108 детекторов были повторно измерены, как показано на фиг. 13. Очевидно, что энергетические спектры теперь хорошо выровнены, что показывает успешность калибровки усиления. Различные уровни амплитуды спектра отражают ряд факторов, обсуждаемых выше, которые могут повлиять на получаемый в результате энергетический спектр. В этом случае некоторые детекторы получают большее суммарное число рентгеновских лучей, чем другие, что показано более высокой амплитудой спектра. Тем не менее, выравнивание спектральных характеристик является очень хорошим, что и требуется.

1.3. Калибровка смещения базового уровня

Каждая детекторная подсистема может иметь немного отличающийся базовый уровень в соответствии с измеренным на выходе аналого-цифрового преобразователя. В целях того, чтобы электроника обработки импульсов точно оценивала энергию принятых импульсов, базовый уровень оценивают и удаляют. Любой соответствующий способ может быть применен, включая, например, следующее.

1. Проводят автономное измерение смещения базового уровня (с выключенными рентгеновскими лучами):

- a) сохраняют и усредняют последовательность образцов от детектора;
- b) используют это среднее значение в качестве смещения базового уровня, которое будет вычтено из всех данных.

2. Отслеживают в режиме онлайн смещение базового уровня и осуществляют подстройку:

- a) используют выходные данные обработки импульса, чтобы оценить и отследить смещение базового уровня;
- b) отфильтровывают (имеющие шум) отслеженные величины фона и обновляют регистр смещения базового уровня соответствующим образом;
- c) используют исходный период сходимости с выключенными рентгеновскими лучами, после которого проводится непрерывная подстройка с включенными рентгеновскими лучами.

1.4. Энергетическая калибровка

Электроника обработки импульсов будет выдавать энергетический спектр, который является неоткалиброванным. Таким образом, выходные данные будут содержать число отсчетов во множестве интервалов дискретизации гистограммы, но точная энергия этих интервалов дискретизации гистограммы неизвестна. Для того чтобы получить точные результаты для эффективного Z , требуется знание энергии каждого интервала дискретизации.

Это достигается следующим образом.

1. Используют источник с известными пиками спектра. Одним из подходящих примеров является источник $Ba133$ со спектральными пиками в 31, 80, 160, 302 и 360 кэВ.

2. Измеряют неоткалиброванный энергетический спектр.

3. Определяют интервалы дискретизации гистограммы, соответствующие известным пикам спектра.

Вместо использования единственного источника с соответствующими пиками также можно использовать узкополосный источник с переменной (но известной) энергией и измерять интервал дискретизации гистограммы как функцию энергии для диапазона энергий.

После того, как зависимость между интервалами дискретизации гистограммы и энергией была измерена, также возможно следующее.

1. Создать справочную таблицу для энергии каждого интервала дискретизации гистограммы.

2. Оценить параметры подходящей функциональной формы. Для комбинации LYSO/SiPM было обнаружено, что квадратичная модель очень хорошо соответствует наблюдаемым параметрам. Это дает результат в форме:

$$\text{Интервал дискретизации гистограммы} = A * \text{Energy}^2 + B * \text{Energy} + C \quad (\text{Уравнение 2})$$

где A , B и C представляют собой константы, определенные из измеренного спектра $Ba133$. Эта формула инвертируется в целях определения энергии как функции интервала дискретизации гистограммы, выраженной относительно тех же самых A , B и C .

Если вариация между детекторами является достаточно малой (для чего требуется хорошее соответствие компонентов и хорошая калибровка усиления), то единственная энергетическая калибровка может быть применена ко всем детекторам. В этом случае усреднение калибровочных параметров по числу детекторов, подвергнутых воздействию $Ba133$, будет давать верхнюю оценку параметров энергетической калибровки.

Альтернативно отдельная калибровочная таблица/калибровочные параметры могут быть сгенерированы для каждого детектора.

1.5. Зависящий от скорости счета сдвиг базового уровня

В зависимости от комбинации детектора/фотоумножителя может требоваться компенсация зависящего от скорости счета сдвига базового уровня. Следствием этого сдвига является сдвиг вправо энерге-

тического спектра с увеличением скорости счета. Для того чтобы должным образом применить энергетическую калибровку, спектр смещают обратно влево на заданное число интервалов дискретизации/энергию. Требуемая калибровка представляет собой одно из:

а) справочной таблицы, задающей сдвиг базового уровня для каждой скорости счета, где промежуточные результаты получены через интерполяцию;

б) функциональной формы, где смещение базового уровня выражено как функция скорости счета.

Любой соответствующий способ может применяться для этой калибровки, включая внесение известного исходного спектра с переменной скоростью счета и сохранение сдвига спектра с увеличением скорости счета. В идеальном случае источник имеет узкую энергетическую полосу с тем, чтобы сдвиг мог быть легко измерен, а также изменяющуюся энергию с тем, чтобы смещение могло быть откалибровано как функция энергии при необходимости.

Потребность в удалении зависящего от скорости счета сдвига базового уровня может быть уменьшена или даже устранена, если применяется отслеживание и удаление смещения базового уровня в режиме онлайн.

1.6. Калибровка остаточного спектра

Остаточный спектр измеряют с большой массой материала в пучке, достаточной для того, чтобы полностью блокировать рентгеновский пучок, такой как сталь большой толщины. На практике малый уровень энергии все еще достигает матрицы детекторов посредством рассеяния или других механизмов, и этот остаточный спектр должен быть измерен таким образом, чтобы он мог быть удален из принятых спектров во время нормального функционирования.

Остаточный спектр затем измеряют путем усреднения принятых спектров для множества интервалов стробирования с блокирующей массой в пучке.

1.7. Параметры наложения импульсов

Параметры наложения импульсов могут быть откалиброваны несколькими способами, например:

- а) оценка параметров наложения импульсов из природы принятых спектров;
- б) оценка параметров наложения импульсов на основании информации о сигнале, скорости счета принятого импульса, частоты дискретизации ADC и способа обнаружения импульса;
- в) измерение параметров наложения импульсов следующим образом:
 - i) используют узкий источник энергии, в котором энергия и скорость счета могут изменяться;
 - ii) измеряют принятый спектр при изменении энергии источника и скорости счета;
 - iii) непосредственно измеряют отношение наложения принятых 2 импульсов и 3 импульсов к пику главного сигнала;
 - iv) формируют справочную таблицу наложения с 2 импульсами и с 3 импульсами как функцию скорости счета и энергии.

2. Обработка импульсов высокой частоты

Система обработки импульсов высокой частоты (305), такая как раскрыта в патенте США № 7383142, патенте США № 8812268 или WO/2015/085372, выделена для каждой детекторной подсистемы в целях выполнения следующих операций на оцифрованном выходном импульсном сигнале от аналого-цифрового преобразователя.

- а) Отслеживание и удаление базового уровня или удаления фиксированного базового уровня.
- б) Обнаружение поступающих импульсов.
- в) Вычисление энергии каждого обнаруженного импульса.
- г) Накопление значений вычисленной энергии в энергетическую гистограмму (энергетическая гистограмма).
- д) Вывод значений накопленной гистограммы каждый раз при приеме сигнала стробирования или другого сигнала синхронизации.
- е) Сброс значений гистограммы для следующего интервала получения данных.

3. Изображение интенсивности

Величину интенсивности, или более конкретно значения передачи, вычисляют из энергетического спектра, сгенерированного для каждого детектора i в каждом интервале стробирования j согласно:

$$R(i,j) = \frac{\sum_B I(B)}{\sum_B I_0(B)} \quad (\text{Уравнение 3})$$

где суммирование выполняется по всем интервалам дискретизации гистограммы B (или эквивалентно по всем энергиям E), для принятых энергетических спектров ($I(B)$) и контрольных энергетических спектров ($I_0(B)$).

Элементы в пределах изображения интенсивности могут быть классифицированы как

- а) непроницаемый, если $R(i,j) < R_{low}$, и установлен на 0;
- б) пустой, или отсутствие в пучке, если $R(i,j) > R_{high}$, и установлен на 1.

Пороги R_{low} и R_{high} могут быть предварительно установлены или могут настраиваться пользователем.

4. Высококонтрастные изображения

Посредством использования полного энергетического спектра изображения интенсивности с переменным контрастом генерируются на основании интегрирования принятых спектров по различным энергетическим полосам. В существующих двухэнергетических рентгеновских сканерах система может использовать только широкий энергетический диапазон, свойственный материалу детектора. Когда доступен полный энергетический спектр, произвольные энергетические диапазоны могут использоваться для генерации соответствующих изображений интенсивности в этом энергетическом диапазоне. Конкретные энергетические диапазоны могут, следовательно, быть заданы в целях наилучшего выделения и отображения материалов конкретных типов, при этом энергетические диапазоны могут быть подстроены, например, для органического материала, неорганического материала или легких, средних или тяжелых металлов.

Изображения с высокой контрастностью/высоким проникновением генерируются для каждого детектора i в каждом интервале стробирования j согласно:

$$R_{E12}(i,j) = \frac{\sum_{E1}^{E2} I_1(E)}{\sum_{E1}^{E2} I_0(E)} \quad (\text{Уравнение 4})$$

где $E1$ и $E2$ представляют собой нижние и верхние пределы энергетического диапазона $E12$. Энергетическая полоса может быть определяемой пользователем или быть предварительно сконфигурированной. Одна, две или более различных энергетических полос могут быть сконфигурированы для обеспечения пользователю возможности выбора между интересующими изображениями.

5. Обработка эффективного Z

Эффективная обработка Z включает в себя использование полных энергетических спектров, вычисленных электроникой обработки импульсов, совместно с энергетической калибровкой для вычисления оценки эффективного Z материала образца. Обработка эффективного Z выполняется для каждого детектора и для каждого детектора происходит следующим образом (так для матрицы детекторов $1 \times N$ этот процесс повторяется N раз). В целях снижения затрат вычислительных ресурсов обработка эффективного Z выполняется только для принятых детекторов i и интервалов стробирования j , которые не объявлены непроницаемыми или пустыми.

5.1. Предварительные операции

1. Обратимся к фиг. 4; сжимают данные энергетического спектра (400) с использованием FFT и отбрасывают все, кроме первых N интервалов дискретизации (которые выбирают таким образом, чтобы отброшенные интервалы дискретизации содержали небольшой сигнал или не содержали сигнала). Замечание: этот этап является необязательным, но для системной конфигурации, в которой эффективное Z вычисляют на центральном компьютере, он обеспечивает значительное снижение использования канала связи. Передача 32 комплексных интервалов дискретизации FFT для 512-точечной гистограмм требует только 1/8 ширины полосы пропускания канала.

2. Выполняют интегрирование спектра (402) путем усреднения $2S+1$ принятых энергетических спектров, обработанных FFT. Это интегрирование спектра увеличивает время измерения, доступное для вычисления эффективного Z , не снижая пространственное разрешение, при котором вычисляют изображение интенсивности. Интегрирование выполняется по интервалам стробирования $j-S \leq j \leq j+S$ с тем, чтобы получить скользящее среднее значение, центрируемое по интервалу стробирования j . Если интегрирование не требуется, устанавливают $S=0$.

3. Выполняют сокращение наложения (403). FFT является первой стадией сокращения наложения, которое не требуется, если сжатие данных уже было достигнуто с применением FFT. Сокращение наложения может быть достигнуто с помощью соответствующего алгоритма, как описано ниже.

4. Если требуется, применяют фазовый сдвиг доменов FFT (404) в целях достижения требуемого бокового сдвига энергетического спектра. Этот этап, как было обнаружено, требовался, когда присутствовал специфичный для скорости счета сдвиг базового уровня. Замечание: умножение на линейно возрастающую (с интервалом дискретизации FFT) фазовую составляющую в домене FFT приводит к боковому сдвигу после iFFT. Степень бокового сдвига определяется наклоном линейного возрастания.

5. До iFFT применяют окно (405) частотной области. Это окно может использоваться для построения требуемого сглаживания энергетического спектра. Процесс построения окна изложен ниже. Хорошее окно было построено в целях достижения гладкой фильтрации энергетического спектра. Фильтрация шума в энергетическом спектре допускает возможность использования сокращенного числа энергетических интервалов дискретизации в вычислении эффективного Z , что обеспечивает общее улучшение вычислительной эффективности.

6. Дополняют нулями данные FFT, вставляют комплексно сопряженную величину во вторую половину буфера FFT (406) и применяют iFFT (407). В этой точке сглаженный энергетический спектр получают в форме гистограммы.

Дополнение нолями вставляет данные, которые были отброшены после FFT. Не обязательно вставлять ноли для всех отброшенных интервалов дискретизации. Например, вставка меньшего числа нолей может создать меньший буфер FFT, который является более эффективным в вычислительном отношении

для вычисления IFFT.

Для вещественного вектора x и размера FFT $2N$ элементы от $N+2$ до $2N$ выходных данных FFT представляют собой комплексно сопряженные величины элементов от 2 до N . Здесь $N+1$ будет являться одним из элементов, обнуленных посредством дополнения нолями.

7. Вычитают остаточный спектр для каждого детектора. Как было отмечено, в результате удаляется любой спектр, который присутствовал бы даже в присутствии полностью блокирующего материала.

8. Применяют кривую/функцию (408) энергетической калибровки для преобразования интервалов дискретизации гистограммы в значения энергии. Замечание: альтернативно энергетическая калибровка может быть применена внутри самой процедуры эффективного Z . На данном этапе выходными данными является гладкий откалиброванный энергетический спектр (409).

9. Если требуется, выполняют интегрирование спектра по смежным детекторам, то есть интегрирование по $2P+1$ энергетическим спектрам для детекторов $i-P \leq i \leq i+P$. В то время как интегрирование по интервалам стробирования может быть выполнено в домене FFT, интегрирование по смежным детекторам может быть выполнено только после того, как была применена энергетическая калибровка, так как необработанные интервалы дискретизации гистограммы смежных детекторов могут не соответствовать одной и той же энергии. Путем выполнения интегрирования 2-D спектра рабочие характеристики идентификации материала могут быть улучшены по сравнению с выполнением обработки эффективного Z на единственном пикселе.

5.2. Измерение контрольного спектра

Для того чтобы вычислить эффективное Z (и также изображения интенсивности/высококонтрастные изображения), контрольный спектр получают с включенными рентгеновскими лучами, но до того, как образец достигнет рентгеновского пучка. В пределах заданного проекта устройства будет присутствовать задержка между моментом времени включения рентгеновских лучей и моментом времени, когда образец достигнет рентгеновского пучка, во время которого может быть получен контрольный спектр. Процесс происходит следующим образом.

1. Включают рентгеновские лучи.

2. Ожидают стабилизации рентгеновского пучка. Это может быть достигнуто посредством запаздывания по времени или посредством фильтрации рентгеновских отсчетов, пока вариация не уменьшится ниже упомянутого порога.

3. Получают и суммируют N энергетических спектров рентгеновского излучения $I_0(E, n)$ (то есть получают энергетический спектр, записанный в конце N последовательных интервалов стробирования) на выходе электроники обработки импульсов.

4. Делят сумму спектров на N , чтобы вычислить средний контрольный спектр так что

$$I_0(E) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_0(E, n) \quad (\text{Уравнение 5})$$

где $I_0(E)$ представляет собой контрольное число отсчетов при энергии E , N представляет собой число интервалов стробирования и E представляет собой энергетический уровень рентгеновских лучей.

Если в любой момент во время контрольного сбора в рентгеновском луче обнаруживают образец, то накопление контрольных спектров прекращается и среднее значение по M полученным спектрам может использоваться в качестве контрольной точки, или измерение прекращается, если M является недостаточным.

5.3. Загрузка или создание таблицы констант ослабления на единицу массы

Константы ослабления на единицу массы для заданного эффективного Z и заданной энергии определяют степень, до которой заданный материал Z будет ослаблять рентгеновские лучи с энергией E . В частности, интенсивность принятых энергий в конкретной энергии задается как:

$$I(E) = I_0(E) \exp(-\mu_a(Z, E) \rho x) \quad (\text{Уравнение 6})$$

где $I(E)$ представляет собой принятое число отсчетов в энергии E , $I_0(E)$ представляет собой контрольное значение отсчетов при энергии E , $\mu_a(Z, E)$ представляет собой константу ослабления на единицу массы для материала с эффективным атомным числом Z при энергии E , ρ представляет собой плотность материала и x представляет собой толщину материала относительно контрольной толщины, использованной при создании данных по ослаблению на единицу массы.

Данные по ослаблению на единицу массы доступны для конечного (малого) числа энергий, возможно, для каждых 10, 20 или 50 кэВ, тогда как энергетические спектры, созданные посредством способа, раскрытого в настоящем раскрытии, могут быть сгенерированы для энергий с шагом 1 кэВ или даже меньше. На практике конечное число этих значений энергии будет выбрано для использования в вычислении эффективного Z .

В целях достижения гладкости таблицы ослабления на единицу массы при всех энергиях в энергетическом спектре данные для промежуточных энергий для каждого Z получают с применением кубической сплайн-интерполяции или другого соответствующего способа интерполяции. Значения ослабления на единицу массы как функцию энергии считают достаточно гладкими для того, чтобы кубические сплайны являлись хорошим методом интерполяции.

5.4. Вычисление эффективного Z

Обработку эффективного Z затем продолжают следующим образом.

1. Для каждого детектора и каждого интервала стробирования (заданный детектор в заданный интервал стробирования определяет пиксель в результирующем изображении) откалиброванный энергетический спектр будет измерен в соответствии с изложенным в разделе "предварительные операции". Обработка эффективного Z не выполняется для энергетических спектров, классифицированных как непроверяемые или пустые.

2. Определяют множество энергетических интервалов дискретизации, которые будут использоваться для вычисления эффективного Z .

а) На основании принятого спектра идентифицируют энергетическую область, где было получено достаточно отсчетов.

б) Они будут являться интервалами дискретизации спектра, где отсчеты превышают некоторый заданный предел.

в) Альтернативно определяют энергии, где передача (отношение принятого спектра к контрольному) превышает порог.

3. Для каждого значения Z , для которого данные по ослаблению на единицу массы доступны в каждом из энергетических интервалов дискретизации, выполняют следующие операции.

а) Оценивают толщину материала для предполагаемого Z . Одним из возможных способов является оценка толщины в одном значении энергии E согласно

$$\rho x(\bar{Z}) = -\log \left(\frac{I(E)}{I_0(E)} \right) \frac{1}{ma(Z, E)} \quad (\text{Уравнение 7})$$

где $I(E)$ представляет собой принятое число отсчетов при энергии E , $I_0(E)$ представляет собой контрольное число отсчетов при энергии E , $ma(Z, E)$ представляет собой константу ослабления на единицу массы для материала с эффективным атомным числом Z при энергии E , ρ представляет собой плотность материала и x представляет собой толщину материала относительно контрольной толщины, использованной при создании данных по ослаблению на единицу массы.

Улучшенная оценка толщины может быть получена путем усреднения оценки толщины для множества значений энергии в целях снижения влияния шума в единственной энергии. Не требуется оценивать x в явном виде, комбинированный параметр ρx является достаточным.

б) Вычисляют предсказанный спектр для этого Z на основании контрольного спектра, записанного ранее, параметра толщины и таблицы ma согласно

$$\hat{I}(Z, E) = I_0(E) \exp(\rho x(\bar{Z}) ma(Z, E)) \quad (\text{Уравнение 8}),$$

вычисленному во всех выбранных энергиях E , где $I(Z, E)$ представляет собой предсказанный спектр.

в) Вычисляют целевую функцию для этого Z как сумму квадратичных ошибок между принятым спектром и предсказанным спектром в предположении значения Z для материала

$$C(Z) = \sum_E w(E) [I(E) - \hat{I}(Z, E)]^2 \quad (\text{Уравнение 9})$$

где $C(Z)$ представляет собой целевую функцию и $w(E)$ представляет веса для каждой суммы квадратичных ошибок между принятым спектром и предсказанным спектром.

Веса $w(E)$ могут быть выбраны равными единице, или альтернативно $w(E)=I(E)$ будет приводить к целевой функции, которая дает более низкий вес областям принятого спектра там, где число отсчетов мало, и более высокий вес областям, где получено больше отсчетов.

4. Для этого пикселя (составляющего энергетический спектр, принятый от конкретного детектора в течение конкретного периода стробирования) вычисляют оценку эффективного Z как величину Z , которая минимизирует целевую функцию:

$$\hat{Z} = \min_Z C(Z) \quad (\text{Уравнение 10})$$

Следует отметить, что отсутствует конкретное требование того, чтобы эффективное Z было целым числом, и фактически таблица ослабления на единицу массы может содержать значения для не являющихся целыми значений Z , представляющих композитные материалы. Однако очевидно, что невозможно представить континуум возможных значений Z в конечной таблице. Для того чтобы вычислить Z с произвольной точностью, можно интерполировать целевую функцию до заданного разрешения, используя соответствующий алгоритм интерполяции. Выбранное значение Z , таким образом, является значением, которое минимизирует интерполированную целевую функцию. Целевая функция $C(Z)$ представляет собой гладкую функцию, и, следовательно, фактическое значение с плавающей запятой или непрерывное значение Z , которое минимизирует эту гладкую функцию, может быть достоверно предсказано по кривой через некоторую форму интерполяции.

Кроме того, также следует отметить, что приведенный выше этап 3 указывает, что целевую функцию вычисляют для всех доступных величин Z в таблице ослабления на единицу массы. На практике, в

зависимости от поведения целевой функции, эффективные способы поиска могут быть применены в целях снижения затрат вычислительных ресурсов. Такие способы включают один или больше следующего.

1. Градиентный поиск.
2. Поиск по первому наилучшему совпадению.
3. Некоторая форма поиска по шаблону.

Форма целевой функции была выбрана таким образом, чтобы быть относительно нечувствительной к шуму в спектре.

6. Обработка эффективного Z с применением калибровки материала.

На практике вследствие характеристик детектора и обработки, которые может быть трудно охарактеризовать, может быть трудно достичь точной энергетической калибровки по всем детекторам, всем скоростям счета и всем интервалам дискретизации спектра.

Был разработан альтернативный способ, посредством которого систему калибруют, используя образцы с меняющейся толщиной известных материалов. Цель состоит в том, чтобы откалибровать ожидаемые принятые спектры как функцию материала, толщины материала и энергетических интервалов дискретизации гистограммы. Это позволяет избежать требования по абсолютной энергетической калибровке и также в значительной степени позволяет избежать эффекта сдвига спектра со скоростью счета (при наличии). Необходимость устранения наложений также может быть исключена.

6.1. Процесс (авто)калибровки материала

В идеальном случае при хорошей калибровке усиления принятые спектры от всех детекторов согласуются друг с другом, и, таким образом, требуется получить калибровочные данные только в одном детекторе и можно использовать их для всех детекторов. На практике, вероятно, будет требоваться получение калибровочных данных для групп смежных детекторов или, возможно, для каждого детектора, в зависимости от согласованности между детекторами.

Первый этап в процессе калибровки состоит в получении контрольного спектра $I_0(B)$ в каждом интервале дискретизации гистограммы B , без материала в рентгеновском пучке для детектора(ов), который(е) будет(ут) подвергаться калибровке. Интервалы дискретизации гистограммы будут теперь обозначены B , а не E , чтобы указать отсутствие требования по калибровке интервалов дискретизации с точки зрения их точной энергии.

Таким образом, для калибровки каждого материала делают следующее.

1. Выясняют эффективное Z материала (или посредством независимого измерения или по спецификации чистоты материала).

2. Получают "ступенчатый клин" материала. То есть образец материала, который содержит ряд ступеней известной толщины x . Самая большая ступень в идеальном случае является достаточной для сокращения рентгеновского пучка до уровня, при котором она может считаться непроницаемой. Замечание: могут использоваться другие образцы материала, но такой ступенчатый клин является удобной формой для осуществления калибровки на нем.

3. Сканируют ступенчатый клин в требуемом положении детектора. Результат будет представлять собой ряд неоткалиброванных энергетических спектров, записанных вдоль каждой ступени материала (число спектров будет зависеть от размеров образца, скорости сканирования и интервала стробирования).

4. Суммируют спектры, полученные на каждом шаге, с тем, чтобы минимизировать шум в спектрах. Эти спектры обозначены $I(Z,B,x)$, так как они являются функцией материала, интервала дискретизации гистограммы и толщины материала. Следует отметить также, что $I(Z,B,0)$ представляет собой только контрольный спектр $I_0(B)$.

5. Вычисляют характеристику передачи для всех материалов, интервалов дискретизации гистограммы и толщины как

$$T_x(Z,B,x) = \frac{I(Z,B,x)}{I_0(B)} \quad (\text{Уравнение 11})$$

6. Вычисляют полную передачу как функцию Z и x как

$$R(Z,x) = \frac{\sum_B I(Z,B,x)}{\sum_B I_0(B)} \quad (\text{Уравнение 12})$$

Снова отметим, что $R(Z,0)=1$ для всех Z .

Таблицы $T_x(Z,B,x)$ и $R(Z,x)$ вместе формируют калибровочные таблицы, которые используются для оценки эффективного Z в каждом пикселе (детекторе/интервале стробирования). Как было указано ранее, они также могут являться или не являться функцией детектора, в зависимости от эквивалентности данных от всех детекторов.

Очевидно, что является желательным провести калибровку для образцов всех возможных материалов, однако на практике только подмножество полного континуума материалов и смесей может быть выбрано в качестве образцов. Для получения записей таблицы для промежуточных значений Z требуется выполнить интерполяцию функций T_x и R на промежуточные значения Z в целях расширения покрытия таблицы.

После получения калибровочных таблиц можно оценить эффективное Z для образца неизвестного

материала следующим образом.

6.2. Предварительные операции

Предварительные операции являются, по существу, такими же, как описаны выше, со следующими комментариями.

1. Может не требоваться выполнение удалений наложений.
2. Может не требоваться выполнение бокового сдвига спектра для компенсации существующего, зависящего от скорости счета сдвига базового уровня.
3. Окно частотной области все еще требуется до iFFT.
4. Кривая энергетической калибровки не применяется, поскольку в этом способе отсутствует требование абсолютной энергетической калибровки, но удаление остаточного спектра все еще может требоваться.

5. Интегрирование спектра может быть выполнено по интервалам стробирования и по детекторам, как описано ниже.

6. Принятый спектр будет обозначаться $I(B)$, интенсивность в ряду интервалов дискретизации гистограммы B . Использование B отличается от использования E для предыдущего раздела, где интервалы дискретизации гистограммы калибруются с точки зрения их фактической энергии.

6.3. Измерение контрольного спектра.

Контрольный спектр получают точно таким же способом, как описано выше, но теперь его обозначают $I_0(B)$, обозначая использование интервалов дискретизации гистограммы, а не энергии.

6.4. Вычисление эффективного Z

Обработка эффективного Z затем продолжается следующим образом.

1. Для каждого детектора и каждого интервала стробирования (заданный детектор в заданный интервал стробирования определяет пиксель на полученном в результате изображении) неоткалиброванный энергетический спектр $I(B)$ будет измерен в соответствии с изложенным в разделе "предварительные операции". Снова обработка эффективного Z не выполняется для энергетических спектров, классифицированных как непроницаемые или пустые.

2. Определяют множество интервалов дискретизации гистограммы, которые будут использоваться для вычисления эффективного Z

а) на основании принятого спектра идентифицируют область, где было получено достаточно отсчетов;

б) они будут являться интервалами дискретизации спектра, где отсчеты превышают некоторый заданный предел; выбирают $B: I(B) > I_{\min}$;

в) альтернативно определяют интервалы дискретизации, где передача (отношение принятого спектра к контрольному) превышает порог;

г) альтернативно используют все доступные интервалы дискретизации гистограммы и применяют взвешивание в целевой функции в целях удаления нежелательных интервалов из расчета значения функции;

е) замечание: в конечном счете сокращение общего числа обрабатываемых интервалов дискретизации гистограммы позволит достичь улучшения вычислительной эффективности, поэтому использование каждого интервала дискретизации не является идеальным.

3. Вычисляют общее число принятых рентгеновских лучей как отношение к контрольному значению.

$$R = \frac{\sum_B I(B)}{\sum_B I_0(B)} \quad (\text{Уравнение 13})$$

4. Для каждого значения Z , для которого имеются калибровочные данные, выполняют следующие операции.

а) Оценивают толщину материала для каждой принятой передачи R и значений калибровочной таблицы $R(Z, x)$ для этого материала Z . Это достигается через

i) интерполяцию кривой $R(Z, x)$ в измеренном значении R с целью получения соответствующего x^{\wedge} через, например, кубическую сплайн-интерполяцию;

ii) по откалиброванному $R(Z, x)$ получают функциональную форму $x=f(R, Z)$, чтобы вычислить x как функцию материала и передачи.

б) Из таблицы $R(Z, x)$ находят x_1 и x_2 таким образом, чтобы $R(Z, x_1) \leq R < R(Z, x_2)$. Следует отметить, что $x_1=0$ соответствует контрольному спектру и, если полученная передача R меньше, чем запись таблицы, то используют последние 2 записи для x_1 и x_2 , и результат будет являться экстраполяцией на более толстый материал.

в) Теперь используют таблицы откалиброванной передачи $T_x(Z, B, x)$, чтобы определить локальные коэффициенты ослабления на единицу массы для каждого интервала дискретизации гистограммы согласно:

$$\widehat{m}_a(Z, R, B) = \log \left(\frac{T_x(Z, B, x_2)}{T_x(Z, B, x_1)} \right) \quad (\text{Уравнение 14})$$

d) Затем вычисляют ожидаемый принятый спектр согласно

$$\hat{I}(Z, B) = \text{Tx}(Z, B, x_1) I_o(B) \exp \left(\left[\frac{\hat{x} - x_1}{x_2 - x_1} \right] \widehat{m\alpha}(Z, R, B) \right) \quad (\text{Уравнение 15})$$

Этот ожидаемый принятый спектр представляет собой интерполированный принятый спектр между двумя самыми близкими калибровочными спектрами, но он основан на другом ослаблении, наблюдаемом в каждом интервале дискретизации. Другие формы интерполяции между спектрами могут использоваться, но специфичная для материала интерполяция, используемая здесь, обеспечивает превосходящий результат интерполяции.

e) Вычисляют целевую функцию $C(Z)$ для этого Z как сумму квадратичных ошибок между принятым спектром и предсказанным спектром в соответствии с предположением о материале Z :

$$C(Z) = \sum_B w(B) [I(B) - \hat{I}(Z, B)]^2 \quad (\text{Уравнение 16})$$

Веса $w(B)$ могут быть выбраны равными единице или альтернативно $w(B)=I(B)$ будет приводить к целевой функции, которая дает более низкий вес областям принятого спектра там, где число отсчетов мало, и более высокий вес областям, где получено больше отсчетов.

5. Для этого пикселя (составляющего энергетический спектр, принятый от конкретного детектора в течение конкретного периода стробирования) вычисляют оценку эффективного Z как значение Z , которое минимизирует целевую функцию:

$$\hat{Z} = \min_Z C(Z) \quad (\text{Уравнение 17})$$

Следует отметить, что отсутствует конкретное требование того, чтобы эффективное Z было целым числом, и фактически таблица ослабления на единицу массы может содержать значения для не являющихся целыми значений Z , представляющих композитные материалы. Однако очевидно, что невозможно представить континуум возможных значений Z в конечной таблице. Для того чтобы вычислить Z с произвольной точностью, можно интерполировать целевую функцию до заданного разрешения, используя соответствующий алгоритм интерполяции. Выбранное значение Z , таким образом, является значением, которое минимизирует интерполированную целевую функцию. Целевая функция $C(Z)$ представляет собой гладкую функцию и, следовательно, фактическое значение с плавающей запятой или непрерывное значение Z , которое минимизирует эту гладкую функцию, может быть достоверно предсказано по кривой через некоторую форму интерполяции.

Та же самая форма эффективных методов поиска может использоваться для сокращения вычисления и избегания исчерпывающего поиска по всем материалам Z в калибровочной таблице.

6.5. Подстройка системы

Некоторые системные параметры будут изменяться с течением времени таким образом, чтобы система настраивалась в целях сохранения калибровки с течением времени.

1. Обновляют калибровки усиления.

a) Калибровочные спектры измеряют в течение периодов, когда рентгеновские лучи выключены.

b) Усиление обновляют согласно изменениям, наблюдаемым в измеренных спектрах.

c) Усиление равно $A * \text{старое усиление} + B * \text{новое усиление}$, где $A+B=1$, и B будет малой величиной, чтобы избежать шума и обеспечить медленную подстройку.

2. Обновляют калибровку импульсов.

a) Периодически может быть выполнена новая калибровка импульсов, хотя было обнаружено, что параметры импульсов остаются достаточно постоянными с течением времени, в результате чего повторная калибровка параметров импульсов может требоваться не чаще, чем раз в день, или, возможно, раз в неделю или раз в месяц.

3. Обновляют смещение базового уровня.

a) Это может быть сделано в течение периодов, когда рентгеновские лучи выключены, таким же образом, как выполняется исходная калибровка - короткий набор данных требуется для смещения базового уровня.

b) Подстройка производится непрерывно с помощью алгоритма отслеживания базового уровня, как описано ниже.

4. Энергетическая калибровка, зависящий от скорости счета сдвиг спектра, параметры наложения и остаточный спектр могут требовать периодической автономной повторной калибровки. Также может быть обнаружено, что для заданного устройства указанные калибровки требуются редко, если вообще требуются.

7. Пример обработки эффективного Z

Ниже приведен краткий обзор процесса, применяемого для калибровки плат детекторов, в частности реализующего процесс автокалибровки и с опцией использования вычисления эффективного Z с "плавающей запятой".

1. Получают ступенчатый клин известного материала, идеально чистого или близкого к чистым элементам. Для текущей калибровки использовались 3 материала:

- a) углерод ($Z=6$);
- b) алюминий ($Z=13$);
- c) нержавеющая сталь (Z приблизительно 26).

2. Размеры ступени выбирают с учетом следующего.

a) Ширина, составляющая 30 см, используется для обеспечения того, чтобы большое число детекторов могло быть откалибровано за 1 калибровочное сканирование.

i) Проекционный режим применяется для эффективного увеличения числа пикселей, которые могли быть откалиброваны.

ii) При 30 см ступенях 2 калибровочных высоты могут покрыть 5 плат детекторов с достаточным перекрытием, чтобы избежать краевых эффектов.

b) Высоты ступеней были определены таким образом, чтобы получить разумно однородные интервалы передачи от $<0,5$ до 95%.

i) Для углерода для достижения передачи менее чем 0,5% требуется около 300 мм материала.

ii) Для более тяжелых металлов для достижения 95%-ой передачи требовались очень тонкие образцы, 0,5 мм и меньше. Для металлов, таких как олово (не использовалось здесь) это было чрезвычайно трудным.

c) Длина ступени составляет 50 мм. При сканировании на 4% от нормальной скорости скорость сканирования составляет 8 мм/с, таким образом, приблизительно 6 с данных может быть получено с каждой ступени. Это необходимо, чтобы гарантировать очень точные калибровочные спектры, учитывая точность, требуемую для возможной обработки эффективного Z .

3. Ступени материала сканируют, и полученные в результате данные обрабатывают в режиме офлайн в Matlab следующим образом.

a) Для каждого пикселя каждого сканирования определяют положения начала и конца ступени.

b) Допускаются некоторые зазоры с тем, чтобы избежать возникновения каких-либо эффектов около краев ступени.

c) Для каждой идентифицированной ступени.

i) Извлекают двоичные данные, соответствующие измеренному спектру в каждом сечении ступени.

ii) Интегрируют все данные с тем, чтобы установить очень точный спектр ($s > 5$ с данных).

iii) Вычисляют соответствующую полную интенсивность (относительно установившегося среднего спектра источника, измеренного во время той же самой калибровки, запущенной при отсутствии объекта в пучке).

d) Создают таблицу для (интенсивности) каждой ступени каждого материала, содержащую следующее.

i) Отображение толщины ступени на интенсивность ступени. Эта таблица используется для того, чтобы интерполировать любой измеренный спектр в эквивалентную толщину материала.

ii) Ряд калибровочных спектров, включая контрольный спектр. Каждый спектр представляет толщину материала, из которой могут быть интерполированы спектры для промежуточных толщин материала.

Калибровочные данные для 3 материалов с $Z=6$, 13, 26 являются достаточными для создания трехцветных изображений, классифицирующих материал как органический (близко к $Z=6$), неорганический/легкий металл (близко к $Z=13$) или металл (близко к $Z=26$). Для того чтобы достигнуть основной цели, заключающейся в точной оценке эффективного Z для разделения материалов вплоть до $\pm 0,2 Z$ или лучше, необходимо получить калибровочные данные для намного большего набора материалов, из которых, следовательно, могла бы быть получена непрерывная оценка Z . Выполнение калибровочных сканирований для всех материалов от $Z=3$ до $Z=92$ является нецелесообразным на практике, поэтому диапазон дополнительных калибровочных наборов данных был получен посредством интерполяции. Калибровочные наборы для значений от $Z=3$ до $Z=13$ были получены посредством интерполяции/экстраполяции наборов данных для углерода и алюминия. Калибровочные наборы для эффективных Z от $Z=13$ до $Z=50$ могут быть получены посредством интерполяции наборов данных для алюминия и нержавеющей стали.

Для каждого пикселя в сканере процедура получения дополнительных калибровочных наборов данных следующая.

1. Для каждого из $Z=6$, 13, 26 интерполируют калибровочные спектры до нового набора интенсивностей. Для текущей демонстрации использовалась интенсивность (в процентах), составляющая: 95, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 15, 10, 6, 4, 2, 1, 0,5, 0,2. В этой точке уже имеется калибровочная таблица для каждого материала на едином наборе интенсивностей. Процесс теперь должен создать калибровочные таблицы для других материалов на том же самом наборе общих интенсивностей.

2. Для текущей демонстрации набор требуемых материалов состоит из $Z=3$, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 30, 35. Спектр для материала Z , на гистограмме B , при толщине x (которая здесь соответствует одному из заданных уровней передачи) обозначен $I(Z, B, x)$. Для каждого заданного материала, для каждой интенсивности, новый интерполированный спектр материала получают следующим образом.

- a) Если $Z_{\text{new}} \leq 13$

$$I(Z_{\text{new}}, B, x) = I(6, B, x) \frac{(13 - Z_{\text{new}})}{7} + I(13, B, x) \frac{(Z_{\text{new}} - 6)}{7}$$

b) Если $Z_{\text{new}} > 13$

$$I(Z_{\text{new}}, B, x) = I(13, B, x) \frac{(26 - Z_{\text{new}})}{13} + I(26, B, x) \frac{(Z_{\text{new}} - 13)}{13}$$

3. Новые таблицы затем включают в полный набор калибровочных данных, используемый для обработки эффективного Z .

4. Все калибровочные таблицы сохраняют в формате файла, подходящем для ввода в программное обеспечение PoCC.

Есть некоторые важные моменты, которые следует отметить.

1. Для $Z < 6$ процесс представляет собой экстраполяцию, а не интерполяцию - один из коэффициентов становится отрицательным, в то время как другой больше 1. Хотя оказалось, что это приемлемо работает до $Z=3$, следует применять экстраполяцию с осторожностью, поскольку она может быстро расходиться.

2. Аналогично для $Z > 26$ процесс представляет собой экстраполяцию. Здесь было бы лучше включить калибровочные данные для олова Sn и затем для свинца Pb, чтобы заполнить доступные калибровочные данные. Сложность с этими имеющими более высокое Z материалами состоит в получении осмысленных калибровочных кривых при 90%-ной передаче - образец материала должен быть очень тонким, чтобы достигнуть этой передачи.

3. При включении величин Z ниже 3 целевая функция ведет себя достаточно хорошо в интересующей области около $Z=6$. Это гарантирует, что процесс для вычисления непрерывного/с плавающей запятой эффективного Z сможет правильно определить значения Z около 6, практически избегая аномалий на краях или по меньшей мере перемещая их к величинам Z вне интересующего диапазона.

4. Более сложная интерполяция может потребоваться для того, чтобы избежать общей точки пересечения - это является приемлемым для низких Z , но перестает быть правильным при движении к металлам. Может быть необходимым интерполировать несколько спектров, чтобы получить каждый новый интерполированный материал.

5. Общая производительность несколько ограничена использованием только 3 фактически измеренных материалов. Фактически примечательно, что такая превосходная производительность была достигнута, принимая во внимание интервалы между калибровочными материалами.

6. Материалы с более высоким Z , такие как свинец Pb, имеют края полосы поглощения и, таким образом, некоторое внимание в конечном счете должно быть уделено этим материалам, если точные рабочие характеристики при высоком эффективном Z должны быть достигнуты. До настоящего момента границы полосы поглощения не были специфично встроены в модель.

Целевая функция $C(Z)$ является гладкой функцией, и, следовательно, фактическое значение с плавающей запятой или непрерывное значение Z , которое минимизирует эту гладкую функцию, может быть предсказано по кривой через некоторую форму интерполяции.

Результаты процесса интерполяции показаны на фиг. 14 для случая 10%-ной передачи. Можно заметить, что происходит очень гладкое продвижение через все материалы, и именно это обеспечивает разделяющую способность обработки эффективного Z . Любой измеренный материал в эффективном диапазоне Z может быть помещен где-либо в этом семействе кривых, при этом точное смещение от калибровочных кривых используется для определения очень точной оценки эффективного Z материала.

Реализация эффективного Z с плавающей запятой была основана на квадратичной интерполяции, с использованием значений целевой функции в значении Z , которое минимизирует целевую функцию, и значение Z по любую сторону от него, при некотором специальном рассмотрении на краях. Этот подход позволил получить результаты для эффективного Z , которые (с достаточным интегрированием спектра) точно разделили материалы, для которых известная разность эффективного Z составляла менее чем 0,2.

Процесс для вычисления непрерывного/оценки с плавающей запятой эффективного Z выполняют следующим образом.

1. Вычисляют целевую функцию $C(Z)$ при каждом значении Z из калибровочной таблицы.
2. Находят значение Z , для которого $C(Z)$ минимально.
3. Находят значения Z и соответствующие значения целевой функции для Z оценивают по любую сторону от величины Z , которая минимизирует $C(Z)$.
4. Оценивают коэффициенты квадратичной модели, где модель в области минимума представляет собой:

$$C(Z) = a_0 + a_1 Z + a_2 Z^2 + n$$

где n представляет собой шум в целевой функции. Это, в свою очередь, моделируют в форме матричного уравнения для 3 значений Z Z_1 , Z_2 и Z_3 и связанных значений целевой функции C_1 , C_2 и C_3 , где $C = Na + n$

и где

$$H = \begin{pmatrix} 1 & Z_1 & Z_1^2 \\ 1 & Z_2 & Z_2^2 \\ 1 & Z_3 & Z_3^2 \end{pmatrix}$$

$$a = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix}$$

и решение получают через обращение матрицы как

$$\hat{a} = (H'H)^{-1}H'C$$

Общая форма $\text{inv}(H'H)H'C$ используется для покрытия случая, когда более 3 значений Z и C используются для оценки квадратичных коэффициентов.

5. Вычисляют значение Z , которое минимизирует квадратичную функцию. Значение Z , в котором находится экстремальная точка, задается просто как

$$\hat{Z} = \frac{-a_1}{2a_2}$$

Специально одно из значений Z (обычно Z_2 , за исключением краев) является минимумом, с тем чтобы можно было предполагать, что получаемое в результате оптимальное Z является минимумом, а не максимумом. На краях могут быть проблемы, но они должны обрабатываться отдельно.

В раскрытом варианте осуществления сделаны следующие наблюдения.

1. Специально одно из значений Z (обычно Z_2 , за исключением краев) является минимумом с тем, чтобы можно было предполагать, что получаемое в результате оптимальное Z является минимумом, а не максимумом. На краях могут быть проблемы, но они должны обрабатываться отдельно.

2. Если значение Z , который минимизирует целевую функцию, находится на любом из краев, то необходимо использовать 2 значения с одной стороны минимального значения Z . Вычисления с плавающей запятой могут, следовательно, стать экстраполяцией к точке вне диапазона величин Z в калибровочной таблице. Когда это происходит, оценка Z может быстро отклониться, таким образом, следует позаботиться о том, чтобы наложить ограничение на оценку максимального или минимального значения Z (то есть насколько разрешается экстраполировать).

3. Включение значений Z ниже 6 и выше 26 разработано в целях обеспечения того, чтобы краевые эффекты, описанные выше, не оказывали негативного влияния на оценки Z , особенно в интересующей области около $Z=6$.

4. Вероятно, существуют более эффективные в вычислительном отношении способы получения квадратичных коэффициентов и соответствующей оценки минимума. Это не исследовалось на данном этапе.

5. Фактически для заданного множества значений Z все необходимые матрицы и инверсии могут быть вычислены офлайн и сохранены в целях более эффективного использования, так как они зависят только от значений Z и интервалов между значениями Z , а не от измеренного спектра и целевой функции.

6. Квадратичная модель является приемлемой, когда целевая функция является стабильной, гладкой и относительно свободной от шума. Если очень короткие времена интегрирования используются для получения гистограмм энергетического спектра, целевая функция может стать зашумленной и может сходиться на локальном минимуме вследствие шума. В этом случае и в общем случае более сложная модель интерполяции может потребоваться для сглаживания целевой функции и избегания влияния шума. Она может включать более 3 точек в процесс интерполяции.

Квадратичная модель является только моделью для обеспечения получения согласованных значений эффективного Z для конкретного материала. Не предполагается, что она является точной функциональной моделью поведения целевой функции, и это не считают необходимым. Принципиальная цель состоит в том, чтобы получить оценку эффективного Z , которая является согласованной для конкретного материала и обеспечивает надежное разделение близко расположенных материалов. Квадратичная модель достигает этой цели.

Алгоритм эффективного Z с плавающей запятой был проверен на ряде образцов материалов и также был всесторонне протестирован на портфеле. Было сделано несколько наблюдений о производительности.

1. При высоких значениях передачи - соответствующих очень тонким образцам/образцам с низким ослаблением - целевая функция могла стать зашумленной, и также калибровочные кривые для более высоких Z часто плохо интерполировались до $>90\%$ -ной передачи. В результате выход имел тенденцию к чрезмерному подчеркиванию более высоких значений Z .

2. При очень низкой передаче и вблизи больших изменений в уровнях передачи, например около края металлических блоков, некоторый разброс мог присутствовать в принятом спектре, что приводило к отклонению выходных данных в сторону органики, даже там, где было известно, что материал является металлом.

3. Априорное знание вероятного эффективного Z дало следующую эвристику.

а) Высокая передача более вероятно будет соответствовать органическому материалу или материалу с низким Z , поскольку он очень большой.

б) Низкая передача, более вероятно, будет соответствовать материалу с более высоким Z , так как потребовались бы очень большие толщины для материала с низким Z .

В результате этих наблюдений было введено взвешивание $v(Z, I)$ с целью подстройки целевой функции как функции и интенсивности, и Z . Эти веса целевой функции настраивают в целях обеспечения того, чтобы выходное эффективное Z было таким, как требуется, для известных тестовых образцов. В PoSS реализация была ограничена 3 дискретными областями.

1. Высокая передача, $I >$ верхнего порога.

Для высокой передачи было обнаружено, что выход несколько отклонен в сторону высоких Z , когда сканировались достаточно тонкие органические материалы. Следовательно, веса целевой функции были низкими для органики и увеличивались при более высоких Z .

2. Средняя передача, нижний порог $< I <$ верхний порог.

В среднем диапазоне передачи выход обычно соответствовал ожидаемому эффективному Z , таким образом, применялось только очень небольшое тонкое взвешивание целевой функции.

3. Низкая передача, $I <$ нижнего порога.

При очень низкой передаче было найдено, что материалы с более высоким Z иногда были неверно идентифицированы как материалы с низким Z . Это было особенно верно около краев металлических блоков, где рассеивание могло позволить избытку низкоэнергетических рентгеновских лучей достичь детектора. В результате при низкой передаче веса целевой функции были разработаны таким образом, чтобы понизить значение целевой функции для материалов с низким Z , с тем чтобы выдавать более высокие Z с большей стабильностью. Один из побочных эффектов этого подхода состоит в том, что очень толстые органические материалы начинают идентифицироваться как металлы при низкой передаче. Это может быть реально преодолено только путем удаления основного источника ошибочной идентификации, представляющего собой избыток низкоэнергетических рентгеновских лучей в принятом спектре.

8. Реализация обработки эффективного Z

В следующих разделах изложены более подробно отдельные этапы и алгоритмы обработки. На фиг. 20 показан краткий обзор различных дополнительных стадий обработки, которые могут быть реализованы в настоящем способе.

8.1. Разбиение

Алгоритм разбиения фактически представляет собой функцию блочного усреднения. Цель алгоритма разбиения состоит в усреднении изображения эффективного Z с плавающей точкой по площади (мм^2), которая представляет наименьший по размеру предмет, который должен быть обнаружен при постоянной интенсивности и составе материала. Алгоритм разбиения генерирует плитки с 50%-ным перекрытием, чтобы гарантировать, что мы всегда захватываем интересующий предмет. Алгоритм разбиения оценивает среднее значение и стандартное отклонение по прямоугольным плиткам на изображении эффективного Z с плавающей точкой. Ширина и высота плитки задаются пользователем. Плитки перекрываются на 50% и в вертикальном, и в горизонтальном измерениях. При заданном размере изображения N_r на N_c пикселей и размере плиток T_r на T_c пикселей число плиток в вертикальном измерении составляет нижнюю целую часть от $(N_r/T_r)*2$. Размеры плитки должны иметь четные значения, чтобы гарантировать 50%-ное перекрытие. Алгоритм разбиения выполняет цикл, который проходит по каждой плитке и вычисляет среднее значение и стандартное отклонение для всех пикселей в плитке. Выбор размеров плитки, по существу, сводится к компромиссу между

1) размерами наименьшего предмета, который должен быть обнаружен, и

2) требуемым разрешением эффективного Z ; было обнаружено, что разброс эффективного Z снижался почти линейно с увеличением числа усредняемых пикселей эффективного Z , таким образом, большие области дают лучшее разрешение эффективного Z .

Кроме того, идея разбиения и кластеризации применялась, чтобы избежать необходимости в реализации сложной сегментации изображения в этом случае. Считалось, что для получения точных измерений эффективного Z будут в любом случае требоваться большие непрерывные блоки однородного материала, таким образом, подход разбиения и кластеризации был бы только незначительно хуже сегментации полного изображения. Тем не менее, сегментация изображения может, в конечном счете, оказаться выгодной для имеющих большую нерегулярность форм, особенно когда некоторые более сложные под-

ходы распознавания предмета могут применяться вместе с измерением эффективного Z .

8.2. Кластеризация

Алгоритм кластеризации группирует плитки, которые имеют общее эффективное Z и соединены в пространстве. Цель алгоритма кластеризации состоит в обнаружении предметов, которые перекрывают области, большие чем минимальный размер предмета, в соответствии с определяемыми размерами плитки, см. раздел 2.1. Связность задают вдоль краев. Соединенным плиткам присваивают общий ID кластера. Выходными данными алгоритма кластеризации являются карта кластеров и таблица кластеров. Карта кластеров представляет собой матрицу соединенных плиток с соответствующими ID кластера. В таблице кластеров приведена информация о каждом ID кластера, включая число плиток в кластере, и вертикальную и горизонтальную протяженность каждого кластера.

Алгоритм кластеризации выполняет строчное сканирование разделенного на плитки изображения. Если плитка $P(r,c)$ соединена с плиткой в множестве $A = \{P(r,c-1), P(r-1,c+1), P(r-1,c), P(r-1,c-1)\}$, то ей присваивают ID кластера. Если $P(r,c)$ не соединена с множеством A , но соединена с плиткой в множестве $B = \{P(r,c+1), P(r+1,c-1), P(r+1,c), P(r+1,c+1)\}$, то плитке присваивают новый ID кластера. В случае связности с плитками в множестве A возможно, что $P(r-1,c+1)$ будет иметь отличающийся ID кластера относительно других плиток в множестве. В этом случае выполняют слияние кластеров. Это достигается простой заменой одного ID кластера на другой, при этом конкретный порядок является неважным. Множества A и B настраивают по восьми граничным условиям, четырем вдоль краев изображения и четырем вдоль вершин изображения.

На фиг. 19 изображено формирование кластеров, в котором единичные плитки игнорируют.

8.3. Обнаружение угрозы

Алгоритм обнаружения угрозы представляет собой классификатор на основе метода "ближайших соседей". Алгоритм классифицирует отдельные плитки. В алгоритме имеется два этапа, обучения и классификации. На этапе обучения создается справочная таблица, отображающая нормализованную интенсивность на эффективное Z с плавающей точкой для ряда материалов, которые называются "угрозами". Эта терминология не имеет никакого значения. Справочная таблица просто содержит интересующие материалы. В текущей реализации справочная таблица аппроксимирована как квадратичная аппроксимация, для которой хранятся только квадратичные коэффициенты (см. threat.cpp).

В течение этапа классификации входные данные представляют собой нормализованную взвешенную интенсивность плитки (I_{meas}), измеренное для плитки эффективное Z с плавающей точкой (Z_{meas}) и максимальную ошибку классификации эффективного Z (ΔZ). Для каждого материала в обучающем множестве классификатор объявляет положительную классификацию, если

$$abs(C_i(I_{meas}) - Z_{meas}) < \Delta Z,$$

где C_i - квадратичная функция, связанная с I^m материалом угрозы.

Использование и интенсивности, и эффективного Z в профиле угрозы является важным аспектом этого подхода. Эффективное Z обычно не является постоянным при изменении толщины материала, и поэтому включение интенсивности (связанной с толщиной) предоставляет двумерный критерий с намного более лучшим разделением, чем только эффективное Z .

На фиг. 15 показано эффективное Z в зависимости от интенсивности для ряда протестированных образцов материалов, вместе с квадратичной интерполяцией. Здесь очевиден разброс эффективного Z в зависимости от интенсивности.

8.4. Выделение края

Цель алгоритма выделения края состоит в обеспечении того, чтобы окно скользящего среднего значения из раздела 2.5 не заходило на границы материалов. Выделение края использует переходы амплитуды на изображении интенсивности, чтобы обозначить края материала. Входными данными для алгоритма выделения края является изображение интенсивности. Края обнаруживают только в горизонтальном измерении. Причина того, чтобы не обнаруживать края в измерении по вертикали, состоит в том, что окно скользящего среднего функционирует только в горизонтальном измерении. Края на изображении интенсивности вычисляют для каждого детектора. Оператор градиента первого порядка используется для обнаружения краев. Ширина маски оператора градиента и порог градиента задаются пользователем. Для следующей маски краев $L(c)$, проиндексированной в столбцах в соответствии с изображенным на фиг. 23, градиент представляет собой $G = \text{сумма}(L(c) * Inorm(c))$, где $Inorm$ представляет собой нормализованную интенсивность, см. раздел 2.6. Край выявляется, когда $abs(G) > g$, где g представляет собой заданный пользователем порог.

8.5. Скользящее среднее

Цель алгоритма скользящего среднего состоит в фильтрации гистограммы интенсивности для каждого детектора с тем, чтобы увеличить фактическое отношение сигнал-шум. Алгоритм генерирует фильтрованную гистограмму интенсивности в сечении k для каждого детектора путем усреднения измеренных гистограмм интенсивности по симметричному окну, центрированному на сечении k . Детектор края играет важную роль в обеспечении того, чтобы окно скользящего среднего значения не покрывало разные материалы. Если окно перекрывает край, то среднее вычисляют только до границ края. Ширина окна может быть установлена пользователем. На краях усреднение не выполняется. Фиг. 22 иллюстрирует

поведение скользящего среднего при его переходе через край.

Одним из вариантов осуществления, который может являться более эффективным в вычислительном отношении, является подход адаптивного скользящего среднего.

1. Вычисляют эффективное Z в каждом сечении в присутствии краев.

2. Вычисляют эффективное Z , основанное на 50% перекрытии окон скользящего среднего (например, каждые 5 пикселей для длины МА 11 пикселей).

Этот алгоритм может обеспечить 3-5-кратное улучшение скорости вычислений в зависимости от точной конфигурации.

Дополнительные детали

1. Вариант осуществления гамма-радиографии.

Другим вариантом осуществления изобретения является вариант осуществления с гамма-радиографией. В таком приложении источник гамма-лучей (1800), таких как кобальт-60, может использоваться для облучения туннеля сканера (1801) фотонами гамма-лучей. Источник гамма-лучей (1800) может быть экранирован (1802), и коллиматор (1803) может также использоваться для создания веерного пучка гамма-лучей (1804). Система вращающихся роликов (1805) или другие устройства, такие как конвейеры, могут применяться для передачи груза (1806), пакетов, мешков или другие интересующих предметов через веерный пучок гамма-лучей (1804). Фотоны гамма-лучей будут взаимодействовать с грузом (1806) через ряд взаимодействий, включая поглощение, рассеяние и отдачу.

Гамма-кванты, которые проходят через груз, могут быть обнаружены с другой стороны сканера детекторной подсистемой. Такая детекторная подсистема (1807) может представлять собой матрицу сцинтилляционных детекторов, соединенных с кремниевыми фотоумножителями в целях выдачи электрического сигнала. Альтернативно матрица может состоять из полупроводникового материала, такого как германий высокой чистоты (HPG), который способен напрямую преобразовывать фотоны гамма-лучей в электрический заряд.

2. Обработка быстропротекающих импульсов

В принципе любой соответствующий способ обработки быстропротекающих импульсов может использоваться в пределах вариантов осуществления, описанных в настоящем раскрытии. Однако высокий рентгеновский поток, присутствующий в типовых системах рентгеновской проверки, приводит к высокой скорости счета импульса и высокой вероятности получения перекрывающихся рентгеновских импульсов.

Наложение импульсов долго представляло собой задачу, с которой приходилось сталкиваться в пределах приложений высокоинтенсивной радиационной спектроскопии. В традиционных подходах к формированию импульсов используются линейные фильтры в целях сокращения длительности импульса, которая может значительно понизить SNR и, следовательно, ограничена выходной частотой в несколько сотен кГц/с. Альтернативный подход к обработке данных от радиационных детекторов основан на идее математического моделирования данных, поврежденных наложением импульсов, и нахождении требуемых параметров модели. Посредством восстановления вместо отбрасывания данных, поврежденных наложением импульсов, данная методика обеспечивает высокую производительность, обработку импульсов с низким временем простоя без традиционных потерь в разрешающей способности по энергии.

Раскрытия международных патентных публикаций WO 2006029475, WO 2009121130, WO 2009121131, WO 2009121132, WO 2010068996, WO 2012171059 и WO 2015085372 полезны в настоящем изобретении для достижения обработки быстропротекающих импульсов со сниженной отбраковкой перекрывающихся импульсов, и все включены в настоящее раскрытие посредством ссылки во всей их полноте как полезные в вариантах осуществления настоящего изобретения, как если бы были повторены в настоящем раскрытии дословно, и заявитель оставляет за собой право включать любую терминологию и понятия, раскрытые в указанных выше международных патентных публикациях, в будущие исправления формулы изобретения для настоящей заявки.

Приведенный ниже обзор содержит выборку из методик, раскрытых в указанных выше международных патентных публикациях, адаптированных к настоящему изобретению, но специалистам в данной области техники будет понятно, что все эти методики потенциально являются полезными, и выбор среди альтернативных подходов определяется удовлетворением различных конкурирующих ограничений рабочих характеристик, включая скорость обработки, точность определения энергии и максимальную скорость счета.

2.1. Основанная на модели высокопроизводительная обработка импульсов - способ 1.

Алгоритм, кратко описанный в настоящем раскрытии, и более подробно в WO 2006029475 (включена по ссылке), для обработки данных от радиационных детекторов представляет собой основанный на модели алгоритм обработки сигналов в реальном времени, который характеризует выход радиационного детектора у $[n]$ как показано ниже:

$$y[n] = \sum_{i=1}^N \alpha_i x[n - \tau_i] - \omega[n] \quad i = 1, 2, 3, \dots, N$$

(Уравнение 18)

Оцифрованный временной ряд радиационного детектора (y) смоделирован как сумма неизвестного числа радиационных событий (N), со случайными временами появления (τ) и амплитудами (α), взаимодействующих с радиационным детектором, которые имеют ожидаемую форму импульса (h), и с процессом шума (ω).

Следовательно, для того, чтобы полностью охарактеризовать оцифрованный выход радиационного детектора, требуется оценить: ожидаемую импульсную характеристику детектора; число событий в оцифрованном временном ряду детектора; время появления каждого из этих радиационных событий; и отдельные энергии каждого события. Как только эти параметры были определены, оцифрованные данные детектора могут быть точно разложены на отдельные компоненты события и энергию каждого определенного явления.

Характеризация системы

Калибровка детектора представляет собой первый этап алгоритма; для нее берут в качестве входа данные временного ряда детектора и определяют реакцию на единичный импульс детектора (ожидаемая форма импульса от детектора). См. раздел "калибровка параметров импульса" в отношении более подробного изложения процесса калибровки импульса.

Локализация импульса

После того, как реакция на единичный импульс детектора была определена, она используется на этапе локализации положения импульса для определения числа событий в оцифрованном потоке данных детектора и их ТОО друг относительно друга.

Обнаружение событий в оцифрованной форме колебаний сигнала детектора выполняют путем подгонки экспоненциальной модели к фиксированному числу точек данных. После этапа характеристики системы экспоненциальное затухание хвоста импульса является хорошо охарактеризованным. Метрику обнаружения (сигнал, используемый в конечном счете для принятия решения относительно того, поступил ли импульс или нет) формируют путем подгонки экспоненциальной кривой к конкретному числу точек данных. Это "окно обнаружения" фиксированной длины проходит непрерывно по оцифрованным данным детектора и вычисляют сумму квадратов ошибок (это может также считаться суммой квадратов погрешностей подгонки). Эта операция приводит к трем различным операциям.

1. Базовая операция: обработка выборок данных при отсутствии сигнала. Поскольку данные могут быть достаточно точно смоделированы экспонентой, сумма квадратов ошибок находится в минимуме и остается достаточно постоянной.

2. Обнаружение событий: когда радиационное событие входит в окно обнаружения, данные больше не могут быть точно смоделированы как экспонента (данные могли бы считаться недифференциальными в $T=0$, точное время появления радиационного события). Следовательно, сумма квадратов ошибок возрастет. Эта метрика обнаружения будет продолжать возрастать, пока радиационное событие не будет помещено в середине окна обнаружения.

3. Операция обработки хвоста: при обработке данных в хвосте радиационного события точки данных достаточно точно моделируются как экспонента. Следовательно, сумма квадратов ошибок возвращается на тот же уровень, что и в режиме базовой операции.

Применение такой операции подгонки импульса к экспоненте на оцифрованном детекторе производит идеальную метрику обнаружения. Она остается низкой для базового уровня, быстро возрастает в ответ на наступление события и быстро убывает после того, как спадает нарастающий фронт радиационного события. Кроме того, путем увеличения числа выборок ADC в окне обнаружения фиксированной длины, можно подавить шумы детекторов и точно обнаружить события с очень низкой энергией. Однако, ширина метрики обнаружения (в выборках) изменяется пропорционально с окном обнаружения. Следовательно, поскольку окно обнаружения становится более широким, способность отличить два близко отделенных импульса снижается.

Обнаружение квадратичного пика

Заключительной etapом локализации импульса является принятие решения о точном количестве и времени появления каждого из радиационных событий в потоке данных детектора. Один из подходов состоит в применении простого порога к метрике обнаружения и объявления поступления импульса в ближайшей выборке к пересечению порога. Однако простое пересечение порога восприимчиво к шуму и обеспечивает точность только $\pm 0,5$ выборки в определении времени поступления импульса. Для того, чтобы иметь более точное время поступления импульса и быть малочувствительным к шуму (имеет особое значение при работе с низкочастотными сигналами вблизи минимального уровня шума), может применяться алгоритм обнаружения квадратичного пика. В таком подходе осуществляется подгонка квадратичной функции к скользящему окну из N выборок метрики обнаружения (N может быть равно 5). Для того, чтобы пик был объявлен, мы исследуем разложение и объявляем пик, если кривизна находится в пределах разрешенного диапазона, константа превышает порог, и линейный член имеет изменение с положительного на отрицательное значение. Коэффициенты могут также использоваться для определения времени поступления внутри выборки.

Оценка энергии импульса

На этапе оценки энергии импульса определяют энергию всех радиационных событий в потоке данных детектора. В качестве входных данных используют: априорное знание реакции на единичный импульс детектора; число событий; и их отдельные данные времени появления. Оцифрованные данные детектора из уравнения 1 ($y[n]$) могут также быть записаны в матричной форме как:

$$y = Ax - b \quad (\text{Уравнение 19})$$

где A представляет собой матрицу $M \times N$, элементы которой заданы как

$$A(n, i) = \begin{cases} h(n - \tau_i) & \tau_i \leq n < \min(m, \tau_i + T - 1) \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

(Уравнение 20)

Таким образом, столбцы матрицы A содержат множество версий реакции на единичный импульс детектора. Для каждого из отдельных столбцов начальная точка формы сигнала задана временным положением сигнала. Например, если сигналы в данных поступают в положениях 2, 40, 78 и 125, то в столбце 1 матрицы A будет находиться '0' в первой строке, 1-я точка данных реакции на единичный импульс будет находиться во второй строке, 2-я точка данных реакции на единичный импульс будет находиться в 3-й строке, и т.д. Во втором столбце будут '0' вплоть до строки 39, после чего будет находиться форма сигнала. В третьем столбце будут '0' вплоть до строки 77; в четвертом столбце будут '0' вплоть до строки 124, и затем форма сигнала. Следовательно, размер матрицы A определяется числом идентифицированных сигналов (которое становится числом столбцов), в то время как число строк зависит от числа выборок во 'временных рядах'.

Как только системная матрица была создана, можно решить для требуемых энергий каждого радиационного события посредством вычисления псевдообратной матрицы A :

$$x = \text{inv}(A' \cdot A) \cdot A' \cdot y \quad (\text{Уравнение 21})$$

Проверка допустимости данных

Конечным функциональным этапом алгоритма обработки сигналов в реальном времени является этап проверки допустимости. На данном этапе все параметры, которые были оценены на предыдущих этапах алгоритма (форма импульса, число событий, время поступления и энергия события) объединяют в целях восстановления 'свободной от помех' модели данных детектора.

Путем вычитания данной модели данных детектора из фактического оцифрованного временного ряда детектора может быть определена точность оцененных параметров. Аналогично исследованию остатка от подгонки прямой линией для множества данных, если величина остатков небольшая, то параметры хорошо описывают данные. Однако если наблюдаются большие остатки, то данные детектора были оценены плохо, и эта часть данных может быть отброшена.

2.2. Основанная на модели высокопроизводительная обработка импульсов - способ 2.

Алгоритм, кратко описанный в настоящем раскрытии и более подробно в WO 2010068996 (включенной посредством ссылки), для обработки данных от радиационных детекторов представляет собой основанный на модели алгоритм обработки сигналов в реальном времени, в котором обработка сигналов, по меньшей мере частично, проводится в пространстве преобразования.

В одном из вариантов осуществления способ для разложения отдельных сигналов в выходных данных детектора включает в себя:

прием или выражение выходных данных детектора в форме цифрового ряда (такого как цифровой временной ряд или оцифрованный спектр);

получение или определение формы сигнала (или эквивалентно импульсной характеристики) сигналов, присутствующих в данных;

формирование преобразованной формы сигнала путем преобразования формы сигнала в соответствии с математическим преобразованием;

формирование преобразованного ряда путем преобразования цифрового ряда в соответствии с математическим преобразованием, при этом упомянутый преобразованный ряд содержит преобразованные сигналы;

оценку функции, по меньшей мере, преобразованного ряда и преобразованной формы сигнала (и необязательно по меньшей мере одного параметра преобразованных сигналов) и посредством этого предоставление выходной функции;

моделирование выходной функции согласно модели (такое как моделирование выходной функции как множества синусоид);

определение по меньшей мере одного параметра выходной функции на основании модели; и

определение параметра сигналов на основании по меньшей мере одного определенного параметра выходной функции.

Специалисту в данной области техники будет понятно, что отдельные сигналы в выходных данных детектора могут также быть описаны как отдельные импульсы в выходе детектора или в выходном сигнале детектора (в этом случае форма сигнала может называться формой импульса).

Форма сигнала может в целом рассматриваться как характеристика взаимодействия между детекто-

ром и излучением (или другим обнаруженным входом), которое было использовано или используется для получения данных. Она может быть определена или, если известна из предыдущих измерений, калибровки и т.п., получена из (например) базы данных.

В некоторых вариантах осуществления преобразование цифрового ряда в соответствии с математическим преобразованием включает в себя формирование модели цифрового ряда и преобразование модели цифрового ряда в соответствии с математическим преобразованием.

В определенных вариантах осуществления способ включает в себя определение множества параметров преобразованных сигналов, таких как частота и амплитуда.

В определенных конкретных вариантах осуществления преобразование является преобразованием Фурье, таким как быстрое преобразование Фурье или дискретное преобразование Фурье, или преобразование элементарных волн. Фактически в определенных вариантах осуществления преобразование может быть применено немного по-разному к форме сигнала и цифровому ряду соответственно. Например, в одном из вариантов осуществления математическое преобразование является преобразованием Фурье, но форму сигнала преобразуют с помощью дискретного преобразования Фурье, а цифровой ряд преобразуют с помощью быстрого преобразования Фурье.

В одном из вариантов осуществления преобразование является преобразованием Фурье, и функция может быть представлена как

$$Y(k)=X(k)/H(k) \quad \text{Уравнение 22}$$

где $X(k)$ представляет собой преобразованный ряд и $H(k)$ представляет собой преобразованную форму сигнала.

Таким образом, этот способ пытается определить параметр сигналов и, следовательно, как можно больший объем данных, но следует понимать, что может быть невозможно выполнить это для некоторых данных (которые, следовательно, называют "поврежденными данными"), как описано ниже. Будет подразумеваться, что термин "сигнал" в этом контексте является взаимозаменяемым с "импульсом", если он относится к выходу, соответствующему отдельным событиям обнаружения, а не к полному выходному сигналу, включающему в себя сумму отдельных сигналов. Также следует понимать, что временное положение (или синхронизация) сигнала может быть измерено или выражено различными способами, например, согласно времени (или положению на оси времени) максимума сигнала или переднего края сигнала. Обычно это описывается как время поступления ("время прибытия") или время обнаружения.

Будет также подразумеваться, что термин "данные детектора" относится к данным, которые были получены из детектора и были впоследствии обработаны связанной или другой электроникой в пределах детектора или вне него.

Форма сигнала (или импульсная характеристика) может быть определена посредством процесса калибровки, который включает в себя измерение импульсной характеристики детектора (такой как отклик в области времени или отклик в области частот) для одного или более обнаружений единичных событий с целью выведения из этих данных формы сигнала или импульсной характеристики. Функциональная форма этой формы сигнала может затем быть получена посредством интерполяции данных (или подгонки к данным) соответствующей функции, такой как многочлен, экспонента или сплайн. Фильтр (такой как обратный фильтр) может затем быть создан из этой формы сигнала детектора. Исходная оценка параметров сигнала может быть сделана посредством свертки выходных данных детектора с помощью фильтра. Параметры сигнала, представляющие особый интерес, включают в себя число сигналов и временное положение (или время поступления) каждого из сигналов.

Конкретные интересующие параметры сигнала могут затем подвергаться дополнительной очистке.

Точность оценки параметров может быть определена или "проверена" путем сравнения модели потока данных детектора (созданной из параметров сигнала и информации об импульсной характеристике детектора) и фактического выхода детектора. Если этот процесс проверки допустимости определяет, что некоторые параметры являются недостаточно точными, эти параметры отбрасываются. В спектральном анализе с применением этого способа энергетические параметры, которые считают достаточно точными, могут быть представлены как гистограмма.

Данные могут включать в себя сигналы различных форм. В этом случае способ может включать в себя определение, где это возможно, формы сигнала для каждого из сигналов.

В одном из вариантов осуществления способ включает в себя прогрессивное вычитание из данных тех сигналов, которые приемлемо соответствуют последующим формам сигнала из множества форм сигнала, и отбрасывание тех сигналов, которые не соответствуют приемлемо ни одной из множества форм сигнала.

2.3. Основанная на модели высокопроизводительная обработка импульсов, способ 3.

Алгоритм, кратко описанный в настоящем раскрытии, а более подробно в WO 201217105 (включенной по ссылке), для обработки данных от радиационных детекторов представляет собой основанный на модели алгоритм обработки сигналов в реальном времени, в котором определения положения и амплитуды импульсов в пределах сигнала достигают путем подгонки функции к выходным данным детектора.

Способ может также включать в себя обнаружение импульса или импульсов в упомянутых выходных данных детектора посредством

скольжения окна через данные к последующим местоположениям окна;
идентификации возможных импульсов посредством выполнения подгонки импульсов к данным в окне в каждом положении окна;

определения, какие из возможных импульсов имеют начало импульса, попадающее до и вблизи начала соответствующего положения окна и пиковую амплитуду, превышающую стандартное отклонение шума в окне в соответствующем положении окна;

идентификации в качестве импульсов, или вывода, тех из упомянутых возможных импульсов, которые имеют начало импульса, попадающее в пределах одной, двух или трех выборок до начала соответствующего положения окна, и пиковую амплитуду, превышающую стандартное отклонение шума в окне в соответствующем положении окна.

Во многих вариантах осуществления одна или более функций являются функциями времени.

В некоторых из этих вариантов осуществления, однако, специалисту будет понятно, что одна или более функций могут не являться функциями исключительно времени.

Способ может включать в себя предоставление выходных данных детектора в цифровой форме или преобразование выходных данных детектора в цифровую форму до подгонки одной или более функций к выходным данным детектора.

В одном из вариантов осуществления одна или более функций имеют форму:

$$f(t) = av(t) - be^{-\alpha t} \quad (\text{Уравнение 23})$$

В этом варианте осуществления $v(t)$ может быть вычислено численно по формуле

$$v(t) = e^{-\alpha t} \sum_{k=0}^{t-1} e^{-(\beta-\alpha)k} \quad (\text{Уравнение 24})$$

для $t = 0, 1, 2, \dots$ (при $v(0)=0$).

Хотя математически

$$v(t) = \frac{1}{1 - e^{-(\beta-\alpha)}} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}),$$

когда $\beta \neq \alpha$, указанная выше формула может использоваться, чтобы найти значение величины $v(t)$ численно. Кроме того, указанная выше формула остается корректной даже когда $\alpha = \beta$, сокращаясь в этом случае до $v(t) = te^{-\alpha t}$.

В одном из вариантов осуществления одна или более функций имеют форму:

$$f(t) = av(t) - be^{-\alpha t} \quad (\text{Уравнение 25})$$

и способ включает в себя определение положения и амплитуды импульса с помощью способа, включающего в себя:

определение контрольного импульса $p(t)$ как свертки $e^{-\alpha t}u(t)$ с $e^{-\beta t}u(t)$ (как далее обсуждается в приложении),

определение положения τ и амплитуды A для $f(t)$ из $f(t) = Ap(t-\tau)$, с $\tau \leq 0$.

Специалисту будет понятно, что данный аспект изобретения предполагает другие, но математически эквивалентные выражения в этом подходе.

Специалисту также будет понятно, что:

$$p(t) = \frac{1}{\beta - \alpha} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) u(t), \text{ когда } \alpha \neq \beta$$

$$p(t) = te^{-\alpha t}, \text{ когда } \alpha = \beta.$$

Расширение $f(t) = Ap(t-\tau)$ дает два уравнения:

$$\frac{1 - e^{-(\beta-\alpha)\tau}}{\beta - \alpha} = \gamma \frac{-b}{a}, \quad (\text{Уравнение 26})$$

$$A = \gamma^{-1} e^{-\beta\tau} a, \quad (\text{Уравнение 27})$$

где

$$\gamma = \frac{1 - e^{-(\beta-\alpha)\tau}}{\beta - \alpha}.$$

В пределе, когда β становится равным α , константа γ становится равной 1, и уравнение (1) превращается в

$$\tau = \frac{-b}{a}.$$

Эта форма является, следовательно, подходящей для использования в численно устойчивом способе для вычисления τ .

Если $|\beta - \alpha|$ очень мало, следует вычислять γ с осторожностью. Это может быть сделано путем суммирования первых нескольких членов разложения Тейлора:

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2!}(\beta - \alpha) + \frac{1}{3!}(\beta - \alpha)^2 - \dots \quad (\text{Уравнение 28})$$

Решение уравнения (1) может быть выполнено численно, например с помощью метода половинного деления, в частности, поскольку левая сторона является монотонной в τ . Определение левой стороны для различных величин τ может быть сделано посредством любой подходящей методики, такой как использование разложения в ряд Тейлора для малой величины τ . (На практике величина τ обычно будет малой величиной, поскольку шум обычно мешает точной характеристике импульса, который начался в удаленном прошлом.)

Линейная аппроксимация в τ уравнения (1) дает

$$\tau = \gamma \frac{-\gamma}{\alpha},$$

и равенство является точным, если $\beta = \alpha$. Точным общим решением (теоретически) является

$$\tau = \frac{-1}{\beta - \alpha} \ln \left(1 + \gamma(\beta - \alpha) \frac{\beta}{\alpha} \right),$$

разложение в ряд Тейлора для которого дает:

$$\tau = \gamma \frac{-\gamma}{\alpha} \left(1 - \frac{1}{2}x + \frac{1}{3}x^2 - \frac{1}{4}x^3 + \dots \right), \quad x = \gamma(\beta - \alpha) \frac{\beta}{\alpha} \quad (\text{Уравнение 29})$$

что является верным при $|x| < 1$.

Способ может включать ограничение τ путем требования того, чтобы $\tau \in [\tau^*, 0]$ Таким образом, поскольку левая часть уравнения является монотонной в τ , ограничение $\tau \in [\tau^*, 0]$ эквивалентно ограничению на a и b : $0 \leq b \leq sa$, где скаляр s задается как

$$c = -\gamma \frac{1 - e^{-(\beta - \alpha)\tau^*}}{\beta - \alpha} \quad (\text{Уравнение 30})$$

$$= \frac{e^{-(\beta - \alpha)\tau^*} - 1}{1 - e^{-(\beta - \alpha)}} \quad (\text{Уравнение 31})$$

$$c = 1 - e^{-(\beta - \alpha)}$$

Действительно, если $\tau^* = -1$, то

Таким образом, можно обеспечить оптимизацию с ограничениями.

Это ограничение может быть реализовано с ограничениями, что α и β являются неотрицательными и $\alpha > \beta$.

Способ может также включать в себя ограничение амплитуды импульса. Это может использоваться, например, в целях предотвращения того, чтобы подогнанный импульс был слишком малым или слишком большим. Действительно, обратимся к приведенному выше уравнению (2); если τ ограничено диапазоном между -1 и 0 , то A лежит между $\gamma^{-1}\alpha$ и $\gamma\alpha\beta$. Ограничение α , следовательно, ограничивает амплитуду A .

Согласно другому конкретному варианту осуществления функция f находится в форме функции с тремя экспонентами. В определенном примере этого варианта осуществления постоянные времени τ_1, \dots, τ_3 являются известными и несходными (с тем, чтобы возникло меньше проблем с численной неточностью) и способ включает в себя подгонку кривой:

$$A_1 e^{-\tau_1 t} + \dots + A_3 e^{-\tau_3 t} \quad (\text{Уравнение 32})$$

В другом примере этого варианта осуществления постоянные времени τ_1, \dots, τ_3 известны и находятся в порядке возрастания, то есть $\tau_1 \leq \tau_2 \leq \tau_3$, и подгонка функции f включает в себя использование базисных векторов:

$$v_1(t) = e^{-\tau_1 t} \sum_{k=0}^{t-1} e^{-(\tau_2 - \tau_1)k} \sum_{l=0}^{k-1} e^{-(\tau_3 - \tau_2)l} \quad (\text{Уравнение 33})$$

$$v_2(t) = e^{-\tau_1 t} \sum_{k=0}^{t-1} e^{-(\tau_2 - \tau_1)k} \quad (\text{Уравнение 34})$$

$$v_3(t) = e^{-\tau_1 t} \quad (\text{Уравнение 35})$$

Для контроля, если постоянные времени отличаются, то

$$v_1(t) = \frac{\gamma_{31} - \gamma_{21}}{\gamma_{32}} \frac{1}{\gamma_{31}\gamma_{21}} e^{-\tau_1 t} - \frac{1}{\gamma_{32}\gamma_{21}} e^{-\tau_2 t} + \frac{1}{\gamma_{32}\gamma_{31}} e^{-\tau_3 t}$$

$$v_2(t) = \frac{1}{\gamma_{21}} (e^{-\tau_1 t} - e^{-\tau_2 t}), \text{ и } v_3(t) = e^{-\tau_1 t}.$$

где

$$\gamma_{ji} = 1 - e^{-(\tau_j - \tau_i)}$$

Однако следует отметить, что, в отличие от предыдущего "двойного экспоненциального" случая, в котором было два неизвестных (то есть положение и амплитуда импульса) и два уравнения (получаемые из двух базисных векторов), в этом "тройном экспоненциальном" случае имеется два неизвестных, но три уравнения. Таким образом, имеется много различных способов инвертировать эти уравнения (посредством чего можно восстановить положение и амплитуду импульса), и обычно это будет стратегией, которая является устойчивой к шуму.

В другом конкретном варианте осуществления функция f имеет форму:

$$f(t) = ae^{-\alpha t} - be^{-\beta t}, \quad (\text{Уравнение 36})$$

в которой α и β представляют собой скалярные коэффициенты и способ включает в себя определение α и β .

Этот подход может не быть подходящим в приложениях, в которых

$$\alpha \cong \beta,$$

но в некоторых приложениях может быть известно, что это вряд ли произойдет, что делает этот вариант осуществления приемлемым.

В одном из примеров этого варианта осуществления, определение положения включает в себя определение положения $t_*(a, b)$, где:

$$t_*(a, b) = \frac{\ln \alpha - \ln \beta}{\alpha - \beta} - \frac{\ln a - \ln b}{\alpha - \beta}. \quad (\text{Уравнение 37})$$

Следует понимать, что этот вариант осуществления, который использует $e^{-\alpha t}$ и $e^{-\beta t}$, имеет недостаток, заключающийся в том, что эти члены сходятся, когда β приближается к α (в отличие от членов $v(t)$ и $e^{-\alpha t}$ в вышеописанном варианте осуществления, которые остаются различными). Действительно, можно сказать, что $e^{-\alpha t}$ соответствует хвосту импульса, который возникает в ∞ (тогда как $v(t)$ представляет импульс, возникающий в момент времени 0).

Функция f может представлять собой суперпозицию множества функций.

Способ может включать в себя определение амплитуды импульса путем оценки $f=f(t)$ в $t=t_*(a, b)$.

Таким образом, настоящее изобретение в общем относится к способу и устройству для оценки положения и амплитуды суммы импульсов от зашумленных наблюдений выходных данных детектора. Оно представляет оценку максимального правдоподобия в качестве сравнительного теста (которая эквивалентна оценке минимальной среднеквадратической ошибки, поскольку шум является аддитивным белым Гауссовым шумом).

Способ может включать в себя фильтрацию низких частот в данных до подгонки к одной или более функциям.

В одном из вариантов осуществления, однако, способ включает в себя адаптацию одной или более функций для учета низкочастотного артефакта в выходных данных детектора. Это может быть сделано в одном из примеров путем выражения одной или более функций как линейной комбинации трех экспоненциальных функций (такой как $f(t) = ae^{-\alpha t} - be^{-\beta t} - ce^{-\gamma t}$).

В определенном варианте осуществления способ включает в себя обеспечение того, чтобы любые оценки, имеющие импульс, начинающийся в пределах окна, начинались на границе окна.

В конкретном варианте осуществления способ включает в себя максимизацию размера окна или изменение размера окна.

В одном из вариантов осуществления способ включает в себя преобразование выходных данных детектора с помощью преобразования до подгонки одной или более функций к выходным данным детектора, подвергнутых преобразованию.

Этот подход может требоваться в приложениях, в которых анализ упрощается, если проводится в пространстве преобразования. В таких ситуациях способ может также включать в себя последующее применение обратного преобразования к одной или более функциям, хотя в некоторых случаях может быть возможно получить требуемую информацию в пространстве преобразования.

Преобразование может представлять собой преобразование Лапласа, преобразование Фурье или

другое преобразование.

В одном из вариантов осуществления оценка положения пика включает в себя минимизацию смещения между началом окна и началом импульса.

В конкретном варианте осуществления способ также включает в себя обнаружение импульса или импульсов в данных посредством

скольжения окна по данным к последующим положениям окна;

идентификации возможных импульсов путем выполнения подгонки импульса к данным в окне в каждом положении окна;

определения, какие из возможных импульсов имеют начало импульса, попадающее до и вблизи начала соответствующего положения окна и пиковой амплитуды, превышающей стандартное отклонение шума в окне в соответствующем положении окна; и

идентификации в качестве импульсов, или вывода, тех из упомянутых возможных импульсов, которые имеют начало импульса, попадающее в пределах одной, двух или трех выборок до начала соответствующего положения окна, и пиковую амплитуду, превышающую стандартное отклонение шума в окне в соответствующем положении окна.

Согласно второму широкому аспекту изобретение предоставляет способ для локализации импульса в выходных данных детектора, включающий в себя

подгонку множества функций к данным;

определение функции с наилучшей подгонкой, которая является той функцией из упомянутых функций, которая оптимизирует выбранную метрику при моделировании упомянутых данных; и

определение положения и амплитуды пика упомянутого импульса по упомянутой функции с наилучшей подгонкой.

В одном из вариантов осуществления каждая из одной или более функций представляет собой суперпозицию множества функций.

2.4. Основанная на модели высокопроизводительная обработка импульсов, способ 4.

Алгоритм, кратко описанный в настоящем раскрытии, и более подробно в WO 2015085372 (включенной по ссылке), для обработки данных от радиационных детекторов представляет собой основанный на модели алгоритм обработки сигналов в реальном режиме времени, в котором выделение отдельных сигналов в выходных данных детектора включает в себя преобразование данных с целью получения дискретных данных, или использование данных, которые уже находятся в дискретной форме, и обнаружение по меньшей мере одного сигнала и оценку параметра сигнала на основании, по меньшей мере частично, дискретных данных.

Способ включает в себя преобразование выходных данных детектора с целью получения дискретных данных или интегральных данных, обнаружение по меньшей мере одного события и оценку энергии импульса, связанной с событием.

В некоторых вариантах осуществления обнаружение по меньшей мере одного события происходит посредством подгонки ожидаемой формы импульса к сегменту скользящего окна преобразованных данных формы импульса.

В некоторых вариантах осуществления способ также включает в себя этап обнаружения пиков в сигнале, при этом метрику обнаружения применяют к преобразованным данным. В некоторых вариантах осуществления метрику обнаружения сравнивают с простым порогом - если метрика меньше порога, то считается, что импульсы отсутствуют, и если она превышает порог, то могут присутствовать один или более импульсов. Объявление значимых пиков в метрике обнаружения выполняется, когда наклон пика, меняющийся с положительного на отрицательный, указывает наличие события.

Следует понимать, что может быть невозможно адекватно охарактеризовать все данные (неохарактеризованные данные называют "поврежденными данными"); такие поврежденные данные могут, но не обязательно, быть отброшены. Будет подразумеваться, что термин "сигнал" является взаимозаменяемым в данном контексте с "импульсом", если он относится к выходу, соответствующему отдельным событиям обнаружения, а не к полному выходному сигналу, включающему в себя сумму отдельных сигналов. Также следует понимать, что временное положение (или синхронизация) сигнала может быть измерено или выражено различными способами, например, согласно времени (или положению на оси времени) максимума сигнала или переднего края сигнала. Обычно это описывается как время поступления (время прибытия) или время обнаружения.

Будет также подразумеваться, что термин "данные детектора" относится к данным, которые были получены из детектора и были впоследствии обработаны связанной или другой электроникой в пределах детектора или вне него.

Способ необязательно включает в себя удаление выборок в пределах установленного окна вокруг нарастающего фронта в целях обеспечения того, чтобы краевая область каждого импульса, где фактические преобразованные данные импульса отличаются от идеально преобразованного импульса, была исключена из расчетов.

Способ необязательно включает в себя оценку разброса энергетических оценок в данных и проверку допустимости смоделированных данных.

Способ может включать в себя построение модели данных по обработанным выходным данным и определение точности моделирования на основании сравнения между выходными данными детектора и моделью.

В одном типовом варианте осуществления способа 4 способ включает в себя создание модели выхода детектора с использованием параметров сигнала в комбинации с импульсной характеристикой детектора. В другом типовом варианте осуществления способ может включать в себя выполнение обнаружения ошибок путем сравнения фактического выхода детектора с моделью выхода детектора, например с применением метода наименьших квадратов.

Способ может включать в себя отбрасывание оценок энергии, которые считаются недостаточно точными. В одном из вариантов осуществления способ включает в себя представление всех достаточно точных энергетических оценок на гистограмме.

3. Сокращение наложений импульсов.

Даже когда применяется соответствующий способ обработки быстропротекающих импульсов, все еще будут иметься ситуации, когда будет невозможно различить близко расположенные поступления импульсов. Такая ситуация возникает, когда множество импульсов поступает в пределах окна, в котором алгоритм обнаружения импульса способен определить поступление различных импульсов. В зависимости от частоты дискретизации ADC, статистики поступления импульсов и электроники детектора суммарный объем наложения может составлять порядка 5% при 1 Мциклов/с. Наложение может являться результатом обнаружения 2 импульсов как единственного импульса, однако обнаружение 3 импульсов как 1 импульса также возможно, тогда как обнаружение 4 или более импульсов как 1 импульса также возможно, но гораздо менее вероятно.

3.1. Решение проблемы - удаление наложения двух импульсов.

Если лежащий в основе рентгеновский энергетический спектр обозначен x , то спектр с наложением двух импульсов представляет собой:

$$y = x + k_1 x * x \quad (\text{Уравнение 38})$$

где $*$ обозначает свертку и k_1 представляет собой коэффициент наложения, который оценивают по наблюдаемым данным или вычисляют из теории. Для того чтобы оценить лежащий в основе спектр x , выполняют следующий процесс.

1. Берут FFT каждой стороны, при этом свертка теперь становится умножением, таким образом,

$$Y(n) = X(n) + k_1 X(n)^2 \quad (\text{Уравнение 39})$$

2. В каждом интервале дискретизации n FFT решают квадратное уравнение

$$k_1 X(n)^2 + X(n) - Y(n) = 0 \quad k_1 X(n)^2 + X(n) - Y(n) = 0 \quad k_1 X(n)^2 + X(n) - Y(n) = 0,$$

принимая во внимание, что и $X(n)$, и $Y(n)$ являются комплексными. Решение представляет собой

$$\hat{X}(n) = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - 4k_1 Y}}{2k_1} \quad (\text{Уравнение 40})$$

3. Правильным решением, которое нужно взять, является "положительное" решение. Оно также полагается на взятие правильного значения комплексного квадратного корня.

4. Теперь вычисляют спектр без наложения путем взятия обратного FFT для \hat{X}

$$\hat{x} = IFFT(\hat{X}) \quad (\text{Уравнение 41})$$

Используя правильный коэффициент наложения, показывают, что наложение было полностью удалено.

3.2. Решение проблемы - удаление наложения двух и трех импульсов. На практике для спектров, измеренных на системе рентгеновского сканирования, когда удаляли только наложение двух импульсов, было замечено, что на более высоких энергиях все еще присутствовало некоторое остаточное наложение. Это указывает, что на более высоких энергиях имелось некоторое неудаленное наложение трех (или более) импульсов. В целях удаления некоторого и, возможно, всего остаточного наложения модель теперь расширяют для включения наложения 3 импульсов, в результате чего принятый спектр задается как:

$$y = x + k_1 x * x + k_2 x * x * x \quad (\text{Уравнение 42})$$

где $*$ обозначает свертку и k_1 и k_2 представляют собой коэффициенты наложения для наложения двух и трех импульсов соответственно. Для того чтобы оценить лежащий в основе спектр x , выполняют следующий процесс.

1. Берут FFT каждой стороны, при этом свертка теперь становится умножением, таким образом:

$$Y(n) = X(n) + k_1 X(n)^2 + k_2 X(n)^3 \quad (\text{Уравнение 43})$$

2. Для каждого из N интервалов дискретизации в FFT решают кубическое уравнение

$$k_2 X(n)^3 + k_1 X(n)^2 + X(n) - Y(n) = 0 \quad (\text{Уравнение 44}),$$

принимая во внимание, что и X , и Y являются комплексными. Как и для квадратного уравнения, имеется решение в аналитическом виде, однако решение кубического уравнения является значительно

более сложным, а именно:

а) делят обе части на k_2 , в результате чего каждое уравнение, теперь имеет форму

$$X(n)^3 + aX(n)^2 + bX(n) + c(n) = 0 \quad (\text{Уравнение 45}),$$

при этом следует отметить, что $X(n)$ и $c(n)$ являются комплексными.

б) вычисляют

$$\begin{aligned} Q &= \frac{a^2 - 3b}{9} \\ R &= \frac{2a^3 - 9ab + 27c}{54} \end{aligned} \quad (\text{Уравнение 46})$$

с) вычисляют

$$P = \sqrt{R^2 - Q^3} \quad (\text{Уравнение 47})$$

д) проверяют P и инвертируют при необходимости; если $\text{Re}(\text{conj}(R).P) < 0$, то $P = -P$; это должно обеспечить получение правильных кубических корней на следующем шаге;

е) вычисляют

$$A = -\sqrt[3]{R + P} \quad (\text{Уравнение 48})$$

ф) вычисляют

$$\begin{aligned} B &= 0 \quad \text{если } A = 0 \\ B &= \frac{Q}{A} \quad \text{иначе} \end{aligned} \quad (\text{Уравнение 49})$$

г) вычисляют 3 решения кубического уравнения:

$$\begin{aligned} r_1 &= (A + B) - \frac{a}{3} \\ r_2 &= -\frac{A+B}{2} - \frac{a}{3} + i\frac{\sqrt{3}}{2}(A-B) \\ r_3 &= -\frac{A+B}{2} - \frac{a}{3} - i\frac{\sqrt{3}}{2}(A-B) \end{aligned} \quad (\text{Уравнение 50})$$

3. Выбирают решение для присвоения $X(n)$. Корректное решение представляет собой решение, имеющее меньший модуль, из r_2 и r_3 .

$$\begin{aligned} \hat{X}(n) &= r_2 \quad \text{если } |r_2| \leq |r_3| \\ \hat{X}(n) &= r_3 \quad \text{если } |r_2| > |r_3| \end{aligned} \quad (\text{Уравнение 51})$$

4. Теперь вычисляют спектр без наложения путем взятия обратного FFT для \hat{X}

$$\hat{x} = \text{IFFT}(\hat{X}) \quad (\text{Уравнение 52})$$

При использовании правильных коэффициентов наложения на фиг. 6 показано, что наложение было полностью удалено. Если те же самые данные обрабатывают с помощью квадратичного алгоритма, который предполагает наложение только двух импульсов, то, как можно видеть на фиг. 7, в спектре все еще имеется остаточное наложение при более высоких значениях энергии и небольшое искажение спектра при более низкой энергии.

4. Разработка оптимального спектрального окна сглаживания.

Сглаживание энергетического спектра является особенно полезным в системах рентгеновской проверки, в которых продолжительность измерения спектра может быть очень короткой, для достижения высокого пространственного разрешения на изображении образца. Было обнаружено, что типичные энергетические спектры, выдаваемые системой рентгеновского сканирования с широким энергетическим диапазоном, имеют тенденцию к наличию практически исключительно низкочастотных компонентов. Исходно в целях сокращения полосы рабочих частот канала связи, но также и снижения затрат вычислительных ресурсов и обеспечения дополнительного преимущества сглаживания спектра данные спектра пропускают через FFT.

После FFT большинство интервалов дискретизации FFT отбрасывают, поскольку необходимо сохранить только приблизительно 1/8 интервалов дискретизации

FFT для того, чтобы точно восстановить энергетический спектр. Например, если имеется 512 вычисленных интервалов дискретизации гистограммы, то сохраняют только 32 комплексных интервала дискретизации FFT. Последние 32 комплексных интервала дискретизации FFT представляют собой только комплексно сопряженные версии этих интервалов дискретизации, и остальные 448 интервалов (практически) не содержат информации.

Результат отбрасывания этих интервалов дискретизации FFT состоит в:

- 1) обеспечении подавления шума;
- 2) фильтрации восстановленного спектра (после iFFT).

Однако если применяют прямоугольное окно FFT, после iFFT измеренный спектр существенно сворачивается функцией кардинального синуса. Это является нежелательным вследствие большой протяженности и большого закливания функции кардинального синуса.

Для того, чтобы улучшить схему функции окна FFT, был принят следующий подход.

1. Определяют требуемое окно "временной области". В этом примере используется импульс приподнятого косинуса.

2. Берут FFT требуемого окна (сделанное симметричным относительно 0, чтобы обеспечить только вещественные выходные данные FFT).

3. Умножают этот результат только на существующее прямоугольное окно.

4. Далее умножают результат на окно, которое имеет небольшое сужение на краю с тем, чтобы дополнительно снизить зацикливание, возникающее вследствие умножения на прямоугольное окно.

Фиг. 8 иллюстрирует достигнутый результат. Прямоугольное окно при использовании само по себе приводит к тому, что измеренный спектр является свернутым функцией кардинального синуса, с шириной в середине амплитуды, составляющей приблизительно 10 выборок, но имеющий значимые колебания около 22% в первом отрицательном пике. Путем аккуратного определения пользовательского окна w можно достичь отклика во "временной" области, которая является приблизительно приподнятым косинусом по своей природе, с очень небольшой колеблемостью - около 0,2%. Однако ширина в середине амплитуды возрастает до около 20 выборок.

В то время как FFT и усечение данных использовались для сокращения нагрузки передачи и вычислительной нагрузки, дополнительная выгода должным образом разработанной функции окна состоит в том, что принятые энергетические спектры сглаживают перед обработкой, что дает значительное сокращение шума в оценках эффективного Z и потенциально дает возможность использовать меньше интервалов дискретизации в оценке эффективного Z , при этом достигая аналогичного результата.

5. Калибровка параметров импульса.

Ниже приведен подходящий способ для калибровки параметров α и β принятых импульсов для импульсов в форме:

$$p(t) = \int_{t-T_a}^t A [\exp(-\alpha(\tau - t_0)) - \exp(-\beta(\tau - t_0))] d\tau \quad (\text{Уравнение 53})$$

где α и β представляют собой константы времени спадающего фронта и нарастающего фронта, соответственно, t_0 является временем поступления импульса, T_a является окном усреднения импульса и A является коэффициентом масштабирования импульса, связанным с энергией импульса.

Параметры импульса могут быть оценены из захваченного временного ряда оцифрованного сигнала детектора следующим образом.

1. Получают множество выборок оцифрованного сигнала детектора, полученного в течение периода с включенными рентгеновскими лучами, и когда суммарная частота импульсов является достаточно низкой для того, чтобы изолированные импульсы могли быть извлечены. В зависимости от параметров импульса для быстрых импульсов может являться подходящим использование приблизительно 500000 выборок на частоте дискретизации 100 МГц, при скорости счета до 500000 импульсов в секунду.

2. Извлекают блок выборок длины ($\text{numpr0} \times \text{sampleRate} / \text{nominalCountRate}$). Для $\text{numpr0}=40$, частоты дискретизации 100 Мвыб./с, номинальной скорости счета 100 кциклов/с он содержит 40000 выборок.

3. Вычисляют порог шума nthr .

а) Строят гистограмму для блока данных - интервалы дискретизации гистограммы является целыми числами в диапазоне выборочных данных $\pm 2^{13}$ для 14-битных данных со знаком.

б) Находят интервал дискретизации с самой высокой величиной. Он является оцененным средним значением для шума.

в) Находят интервал дискретизации, где уровень падает до 0,63 от пика. Разность с пиком является оцененным стандартным отклонением (сигмой) для шума

д) Устанавливают порог шума на 2 сигмы от среднего. $\text{nthr} = \text{среднее значение шума} + 2 \times \text{сигма шума}$. Коэффициенты, отличные от 2, могут также использоваться, в зависимости от приложения.

4. Вычисляют порог сигнала sthr .

а) Фильтруют блок данных с помощью "скачкового" фильтра формы [-1-1-10111].

б) Устанавливают порог обнаружения равным nthr , и шаг возрастания равным $4 \times \text{сигма шума}$.

в) Применяют порог к фильтрованным данным и определяют число серий, где данные превышают sthr . "Серия" представляет собой непрерывную последовательность выборок, все из которых превышают sthr , ограниченную на каждом из концов выборкой ниже sthr .

д) Продолжают повышать порог обнаружения, пока на шаге k не станет число серий (k) - число серий $(k-1) \geq -1$. То есть до тех пор, пока число серий не прекратит уменьшаться. (Замечание: этот критерий останова может выдать пессимистический порог при более высоких скоростях счета).

е) Устанавливают sthr в качестве текущего порога на шаге k .

5. Оценивают скорость счета как $\text{pruns}(k) / (\text{длина буфера} / \text{частота дискретизации})$.

6. Дополнительный этап: если оценка скорости счета составляет менее чем половину или более чем две номинальных скорости счета, то повторяют вычисление порогов шума и сигнала с длиной буфера данных, вычисленной из оценки скорости счета, с тем, чтобы подойти ближе к обнаруженным импульсам numpr0 .

7. Реализуют конечный автомат для обнаружения импульсов. Во-первых, обнаруживают $nump1=50$ импульсов с целью оценки длительности импульса $lenp$ (первоначально устанавливают $lenp$ равной 0). Затем обнаруживают $nump2=600$ импульсов для полной оценки параметров и оптимизации. Конечный автомат для обнаружения импульсов реализован следующим образом.

- a) Входит в состояние "seekPulse" (поиск импульса).
- b) Когда величина превышает $sthg$, входит в состояние "detPulse".
- c) В состоянии "detPulse" (обнаружение импульса) ищет значение ниже $sthg$. Входит в состояние "seekEndPulse" (поиск конца импульса).
- d) В состоянии "seekEndPulse"
- i) если значение $> sthg$, то новое обнаружение произошло перед концом импульса; входит в состояние "pulsePileUp" (наложение импульсов);
- ii) если значение $< nthr$ и $pulseLength > lenp$, то обнаружен конец допустимого импульса - сохраняет параметры начало/конец/длина импульса и повторно входит в состояние "seekPulse".
- e) В состоянии "pulsePileUp" ищет значение ниже $sthg$, затем входит в состояние "seekEndPileup" (поиск конца наложения).
- f) В "seekEndPileup" изменяет состояние
 - i) если значение $> sthg$, новое обнаружение произошло до конца события наложения, что указывает дополнительное наложение; возвращается к состоянию "pulsePileUp";
 - ii) если значение $< nthr$ и $pulseLength > lenp$, конец события наложения был достигнут, сохраняет детали импульса и помечает его как наложение, с тем чтобы он не использовался в калибровке; на практике все детали об этом событии импульса могли бы быть отброшены, поскольку оно не будет использоваться в калибровке.

8. Для первых $nump1$ допустимых (изолированных) импульсов выполняют следующее.

- a) Вычисляют время поступления (t_0), экспоненту нарастающего фронта (бета), экспоненту убывающего фронта (альфа), время усреднения (T_α), максимальный сигнал (S_{max}), время максимума (t_{max}), энергию импульса (E).
- b) Некоторые импульсы могут быть отброшены в этой точке, если окажется, что фактически присутствует более одного импульса (необнаруженное наложение) - это обозначено множественными пересечениями нуля в производной фильтрованных данных (нулевая производная=положение локального максимума/минимума).
- c) Устанавливают оценку длительности импульса равной $7/\text{медиана(альфа)}$. Это дает приближенное значение для выборки, в которой импульс будет спадать до 0,001 от пикового значения. Более точное вычисление может быть получено с использованием альфы и беты при необходимости, но порог, составляющий 0,001, является до некоторой степени произвольным в любом случае и в хвосте импульса медленно сходится к нулю.

9. Возвращаются к шагу 8 и получают $nump2$ импульсов. Использовалось $nump2=600$, но это является до некоторой степени произвольным и основано на том, сколько импульсов фактически присутствовало в экспериментальных данных. Только половина этих импульсов будет в конечном счете использоваться в калибровке, поэтому $nump2$ должно быть в два раз больше числа импульсов, которые требуются (являются желательными) в калибровочном процессе.

10. Для каждого из импульсов $nump2$ следующее.

- a) Вычисляют время поступления (t_0), экспоненту нарастающего фронта (бета), экспоненту убывающего фронта (альфа), время усреднения (T_α), максимальный сигнал (S_{max}), время максимума (t_{max}), энергию импульса (E). Снова некоторые импульсы могут быть отброшены, если они окажутся представляющими собой необнаруженное наложение.
- b) Сортируют импульсы по возрастанию энергии.
- c) Вычисляют верхний и нижний квартили значений энергии, отбрасывают импульсы в верхнем и нижнем квартилях. Это фактически удаляет являющиеся выбросами значения энергии из выборки, хотя в смеси энергий импульса это, возможно, не является лучшим решением. Фактически может быть лучше сортировать по альфе, бете, или целевой функции на основе наименьших квадратов и отбрасывать импульсы на основе этого. В настоящий момент сортировку по энергии считают подходящей.
- d) Для остальных импульсов в количестве, составляющем теперь только половину $nump2$ (то есть около 300, если $nump2=600$) следующее.
 - i) Вычисляют оценку формы импульса на основании параметров альфа, бета, T_α , t_0 .
 - ii) Нормализуют фактически принятый импульс по его энергии.
 - iii) Вычисляют целевую функцию=сумма квадратов ошибок между оцененными и фактическими импульсами (оба нормализованы и являются номинальной единичной энергией).
 - iv) Выполняют итерационную оптимизацию наименьших квадратов, чтобы получить оптимальные оценки альфы, беты, T_α , наряду с конечной целевой функцией и числом итераций для сходимости оптимизатора наименьших квадратов. Замечание: был реализован приближенный LS оптимизатор Гаусса-Ньютона. Вместо полного якобиана 3×3 вычислялся ряд ID якобианов в каждом измерении. Они являют-

ся численными производными, поэтому могут быть подвержены существенной погрешности. Это означает, что траектория не всегда находится в оптимальном направлении, с большим риском расхождения, если функция не является стабильной. Не рекомендуется использовать функцию в этой форме, но если эффективный LS-оптимизатор недоступен, может быть обеспечена более надежная реализация.

11. Из оптимизированных по методу наименьших квадратов результатов устанавливают окончательные значения альфы, беты, T_α . Они могут представлять собой медианные или средние значения оптимизированных параметров. Значение t_0 может быть установлено произвольно таким образом, чтобы или а) $t_0=0$ (и импульс, таким образом, имел некоторый сигнал для выборки $k<0$), или б) $t_0=\text{потолок}(T_\alpha)$, и в этом случае импульс равен нулю в $k=0$ и имеет положительное значение, начиная с $k\geq 1$.

12. Форма импульса $p(t)$ может быть вычислена непосредственно по формуле с использованием оцененных T_α , α и β .

6. Способ для отслеживания базового уровня.

Для того чтобы правильно определить энергию импульсов, желательно учесть смещение DC (или базового уровня сигнала, используются взаимозаменяемо) в сигнале от детектора. Это смещение DC может возникать из различных источников, включая уровни смещения аналоговой электроники, аналого-цифрового преобразования и самого детектора. Теория управления предполагает, что ошибку смещения DC можно отследить и снизить до нуля посредством генерации сигнала обратной связи, который является пропорциональным интегралу сигнала - однако имеется существенная проблема в случае обработки импульса. Импульсы вносят дополнительные характеристики в сигнал, который имеет ненулевое среднее значение. Это вносит смещение, зависящее от энергии импульса, скорости счета и формы импульса, что повреждает сигнал обратной связи и препятствуют успешному удалению смещения DC с помощью отслеживания с петлей регулирования.

Для того чтобы преодолеть эту проблему, выходной сигнал детектора обрабатывают в цифровой форме с тем, чтобы удалить эффекты формирования импульсов, вносимые аналоговой электроникой. Когда смещение DC отсутствует, этот обработанный сигнал дает форму сигнала, которая имеет постоянное значение в областях между поступлениями импульса, и быстрое изменение значения, куда импульсы поступают. Если остаточное смещение DC присутствует в сигнале детектора, то обработанный сигнал изменяется линейно со временем в областях между поступлениями импульса. Сигнал обратной связи по рассогласованию, который пропорционален крутизне сигнала, может быть сформирован путем взятия разности между двумя выборками. Эти выборки не должны быть последовательными, но могут быть отделены 'N' выборками по времени. Путем выбора подходящего значения для 'N' сигнал с соответствующим отношением сигнал-шум может быть найден для управления петлей обратной связи.

В целях снижения влияния отклонения, вносимого появлениями импульсов, петлю отслеживания базового уровня не обновляют, когда импульс поступил между двумя выборками, используемыми для генерации сигнала ошибки обратной связи.

Влияние отклонения можно еще больше снизить путем предотвращения обновления петли отслеживания базового уровня, когда импульс поступил в пределах защитной области по обе стороны от выборок, используемых для генерации сигнала ошибки обратной связи.

Следует отметить, что вследствие отклонения, вызванного поступлением импульса, значение обработанного сигнала детектора повышается всякий раз, когда поступает импульс. Это в конечном счете вызывает переполнение внутренних регистров, используемых для хранения значения сигнала. Значение обработанного сигнала контролируют, и когда обнаруживают переполнение, предотвращают обновление петли отслеживания базового уровня до тех пор, пока эффекты переполнения не пройдут.

Обозначим обработанный импульсный сигнал в выборке n как $x(n)$; приведенные ниже шаги кратко излагают процедуру для вычисления обновления оценки смещения DC, обозначенной $DC(n)$.

1. Вычисляют разность между выборками сигнала, отстоящими друг от друга на N выборок.
2. Определяют, должно ли быть применено обновление. Не применяют обновление DC, если
 - а) поступление импульса обнаружено в выборке между выборками n и $n+N$;
 - б) переходный процесс от предыдущего обнаруженного импульса не затух; можно считать, что переходный процесс продолжается M выборок после того, как импульс был обнаружен;
 - в) обработанный сигнал $x(n)$ близок к достижению положительного переполнения и заклинивается около большого отрицательного значения; не выполняют обработку, если $x(n)$ находится в пределах порога Δ положительного или отрицательного переполнения.

3. Если обновление DC должно быть применено, то вычисляют обновление смещения DC как

$$DC(n) = DC(n-1) + k[x(n) - x(n-N)] \quad (\text{Уравнение 54}),$$

где $k \ll 1$ представляет собой усиление обновления и выбирается таким образом, чтобы достичь требуемого баланса между быстрым откликом и шумом в оценке DC.

Наконец, те же самые технические средства могут применяться для отслеживания множества смещений базового уровня во множестве каналов в схеме с временным уплотнением. Значения для переменных цикла отслеживания для каждого канала сохраняют/загружают при переключении между каналами. Предотвращают обновление петли отслеживания уровня базового уровня до тех пор, пока не пройдут

переходные эффекты изменения канала детектора.

7. Коллимация.

Очень плотная коллимация может использоваться в пределах сканера в целях минимизирования влияния разброса на измеренный спектр. Это особенно важно, когда возникают переходы от высокой к низкой и от низкой к высокой интенсивности. Общие результаты для системы показали, что разброс в значительной степени нивелировался путем включения плотной коллимации.

8. Контрольный расчет.

Цель контрольного расчета состоит в установлении средней интенсивности для каждого детектора. Это значение используется для масштабирования всех гистограмм интенсивностей на единичную энергию. Этот процесс обычно называют нормализацией. Контрольную интенсивность вычисляют для каждого детектора. Контрольную интенсивность вычисляют как среднюю интенсивность по первым N сечениям при сканировании. Интенсивность представляет собой 1-й интервал дискретизации в FFT или сумму всех имеющих комплексное значение элементов в векторе FFT.

Также имеется контрольная гистограмма, вычисленная таким же образом - путем усреднения гистограмм измеренных энергий для первых N сечений. Контрольная гистограмма используется для нормализации всех измеренных гистограмм в целях обеспечения того, чтобы вариации в рентгеновском потоке между запусками не влияли на вычисление эффективного Z .

Контрольную точку измеряют в течение интервала, в котором:

1) рентгеновские лучи стабилизированы, то есть, рентгеновский поток не изменяется и не будет изменяться в течение сканирования (на практике источник Смита реально изменяется - особенно при отказах - и это может повлиять на результаты),

2) перед поступлением образца для тестирования.

Текущая реализация использует продолжительность, измеряемую в сечениях. Это может привести к возникновению проблем, когда скорость сечений замедляется, например, до менее 5 мс - получение контрольной точки может попасть в тестируемый образец. Это должно быть исправлено 2 способами для полной надежности.

1. Используют сконфигурированные скорости сечений и скорость сканирования с тем, чтобы вычислить продолжительность, в течение которой получают контрольную точку, а не установленное число сечений.

2. Вносят сигнал обнаружения предмета для обеспечения того, что получение контрольной точки сразу останавливается, если образец был обнаружен до завершения периода получения контрольной точки - пользователь должен быть предупрежден, когда это происходит, поскольку производительность не будет гарантироваться.

Более точное и согласованное эффективное Z может быть получено, если используется более продолжительный период получения контрольной точки.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ проверки одного или более предметов груза или багажа в системе проверки, содержащей источник падающего излучения, область облучения и множество детекторов, включающий этапы калибровки системы проверки путем помещения в область облучения различных калибровочных материалов с известным атомным числом Z в качестве первого этапа калибровки;

облучения упомянутого одного или более предметов груза или багажа с использованием источника падающего излучения;

обнаружения порций излучения, испускаемых изнутри или проходящих через упомянутый один или более предметов груза или багажа в результате облучения падающим излучением, с использованием множества детекторов, при этом каждый детектор выполнен с возможностью выдачи вызываемого обнаруженными порциями электрического импульса, имеющего характерные размер или форму, зависящие от энергии порций;

обработки каждого электрического импульса с использованием одного или более цифровых процессоров с определением характерных размера или формы;

генерации проверочного энергетического спектра детектора для каждого детектора из энергий обнаруженных порций;

измерения эффективного атомного числа Z неизвестного материала, связанного с упомянутыми одним или более предметами груза или багажа, на основании проверочных энергетических спектров детектора в сравнении с калибровочными измерениями, выполненными во время этапа калибровки;

отличающийся тем, что

этап калибровки содержит проведение измерений, получаемых при облучении образцов переменной толщины различных калибровочных материалов с известным атомным числом Z , для создания калибровочных энергетических спектров $I(Z, x, V)$ детектора в зависимости от Z , толщины x калибровочного материала и интервалов дискретизации V гистограммы.

2. Способ по п.1, в котором этап калибровки содержит проведение калибровочных измерений на

одном детекторе для использования на всех детекторах.

3. Способ по п.1, в котором этап калибровки содержит проведение отдельных калибровочных измерений для использования в различных группах смежных детекторов или отдельных измерений в каждом детекторе для использования в каждом детекторе.

4. Способ по любому из пп.1-3, в котором этап калибровки дополнительно включает получение контрольного спектра $I_0(B)$ для материала нулевой толщины; вычисление калибровочных характеристик $T_x(Z, B, x)$ передачи в зависимости от Z , толщины x материала и интервалов дискретизации B энергетической гистограммы путем деления калибровочных энергетических спектров $I(Z, x, B)$ детектора на контрольный спектр $I_0(B)$; вычисление калибровочных отношений $R(Z, x)$ полной передачи с использованием суммы по интервалам дискретизации B энергетической гистограммы калибровочных энергетических спектров $I(Z, x, B)$ детектора, деленной на сумму по интервалам дискретизации B энергетической гистограммы контрольного спектра $I_0(B)$;

при этом этап измерения эффективного атомного числа Z неизвестного материала содержит использование калибровочных характеристик передачи и калибровочных отношений полной передачи в виде калибровочных таблиц для оценки эффективного атомного числа Z материала, связанного с упомянутыми одним или более предметами, по проверочным энергетическим спектрам детектора.

5. Способ по п.4, в котором этап измерения эффективного атомного числа Z неизвестного материала содержит

получение принятого спектра $I(B)$ из проверочного энергетического спектра детектора для каждого детектора или интегрированного по интервалам стробирования или по детекторам;

вычисление отношения R полной передачи неизвестного материала к контрольному спектру;

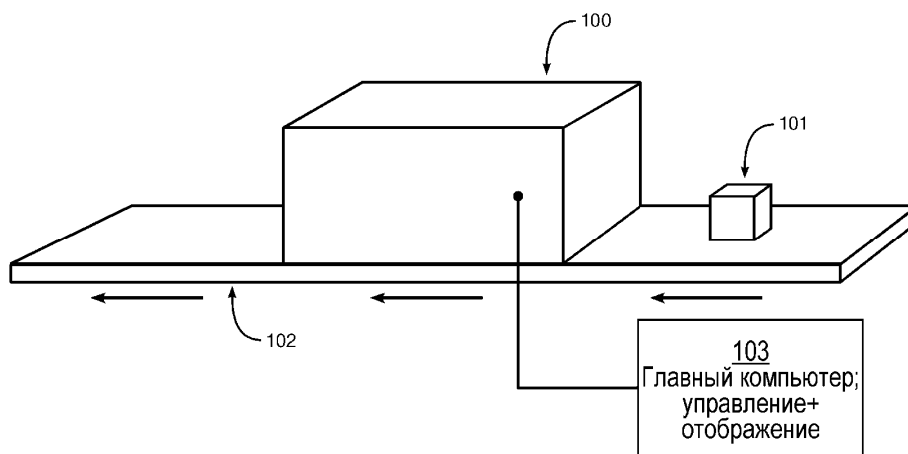
для каждого значения Z из калибровочной таблицы оценку соответствующей толщины материала по калибровочным отношениям полной передачи и вычисление ожидаемых принятых спектров для соответствующей толщины материала; и

вычисление эффективного атомного числа Z в виде значения Z , которое минимизирует целевую функцию $C(Z)$ ожидаемых принятых спектров.

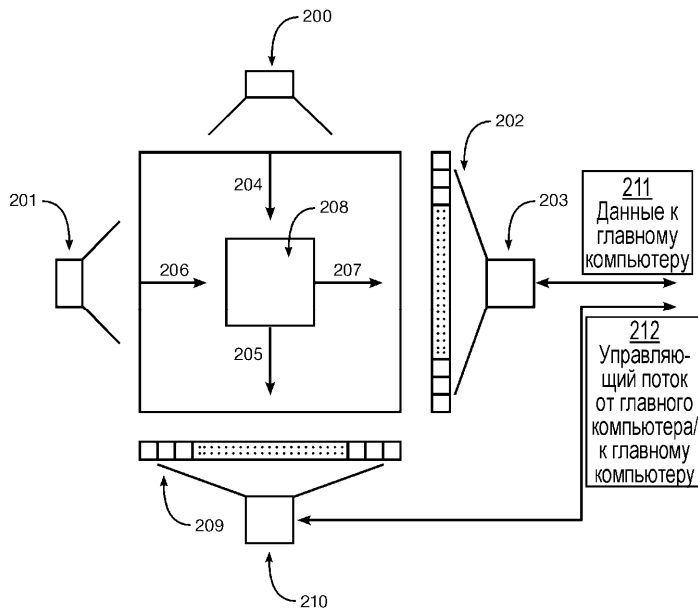
6. Способ по п.5, в котором целевая функция интерполируется между значениями Z из калибровочной таблицы, обеспечивая произвольную точность эффективного атомного числа Z .

7. Способ по любому из пп.4-6, в котором калибровочные таблицы, определяемые при различных толщинах, дополняются путем интерполяции между различными толщинами с обеспечением калибровочной таблицы для каждого калибровочного материала в общем наборе отношений полной передачи.

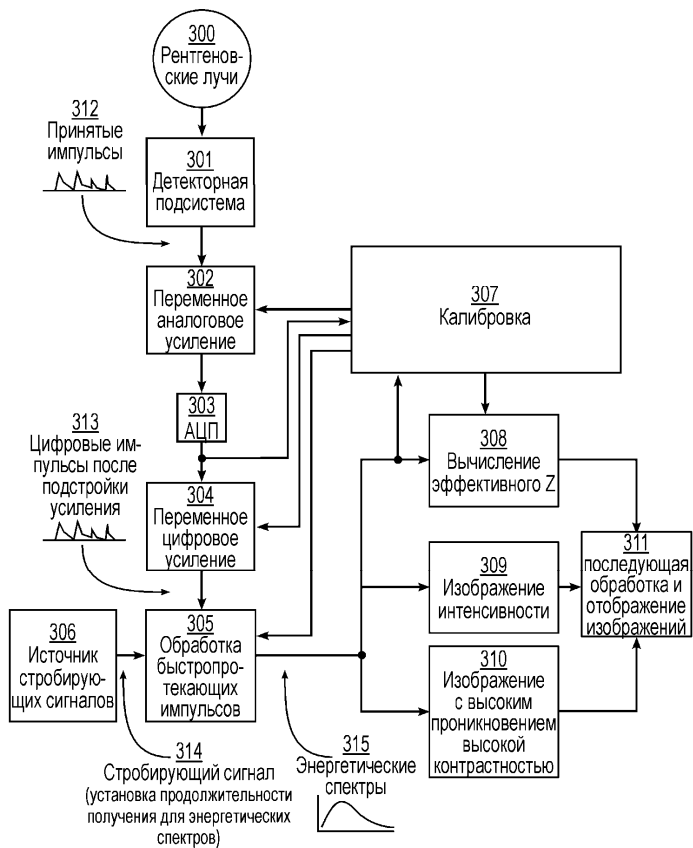
8. Способ по любому из пп.4-7, в котором калибровочная таблица для каждого калибровочного материала в общем наборе отношений полной передачи дополняется путем интерполяции для промежуточных значений Z между известными атомными числами Z образцов или экстраполяции выше и ниже известных атомных чисел Z образцов.



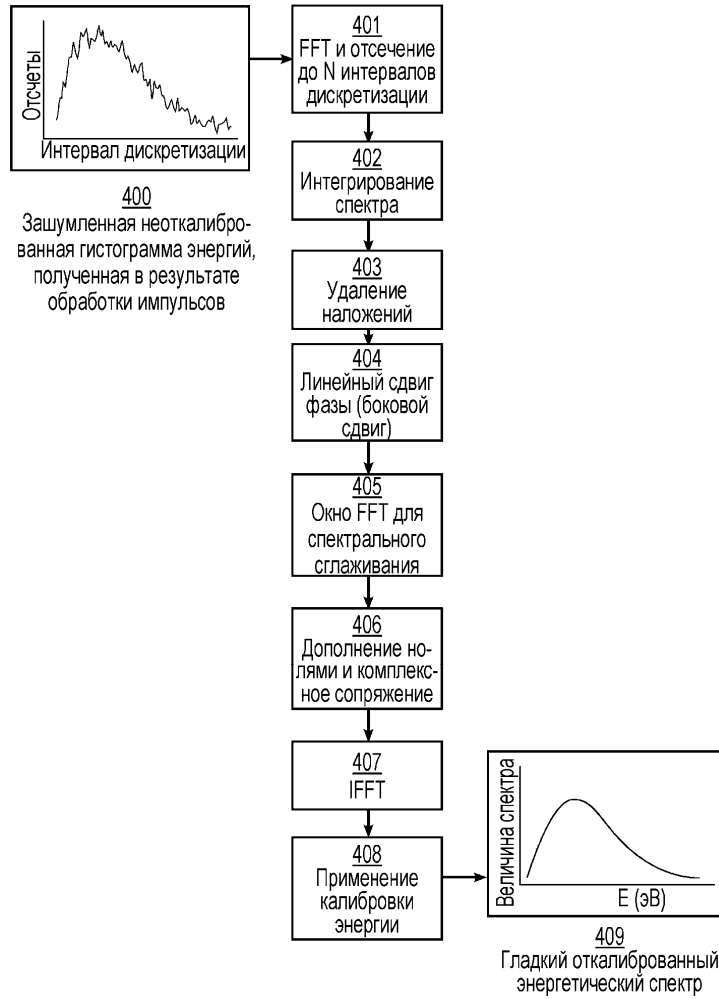
Фиг. 1



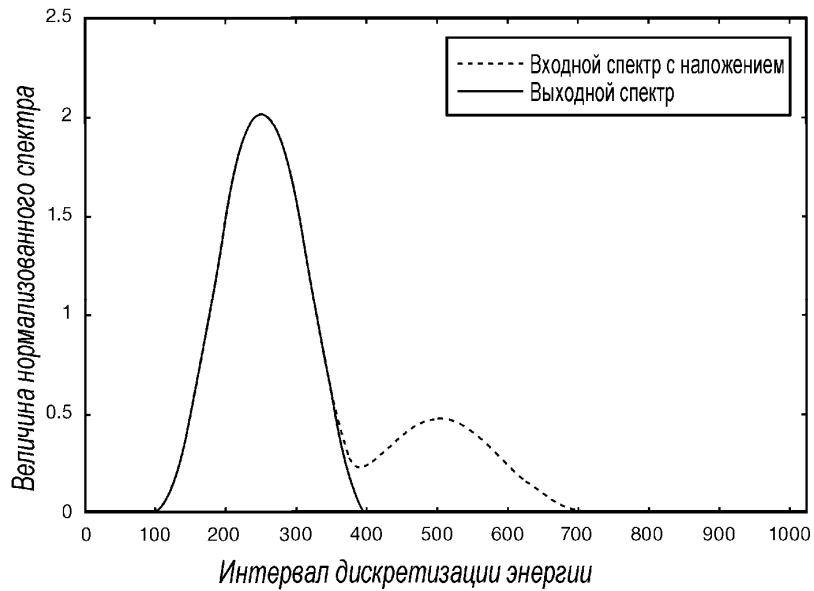
Фиг. 2



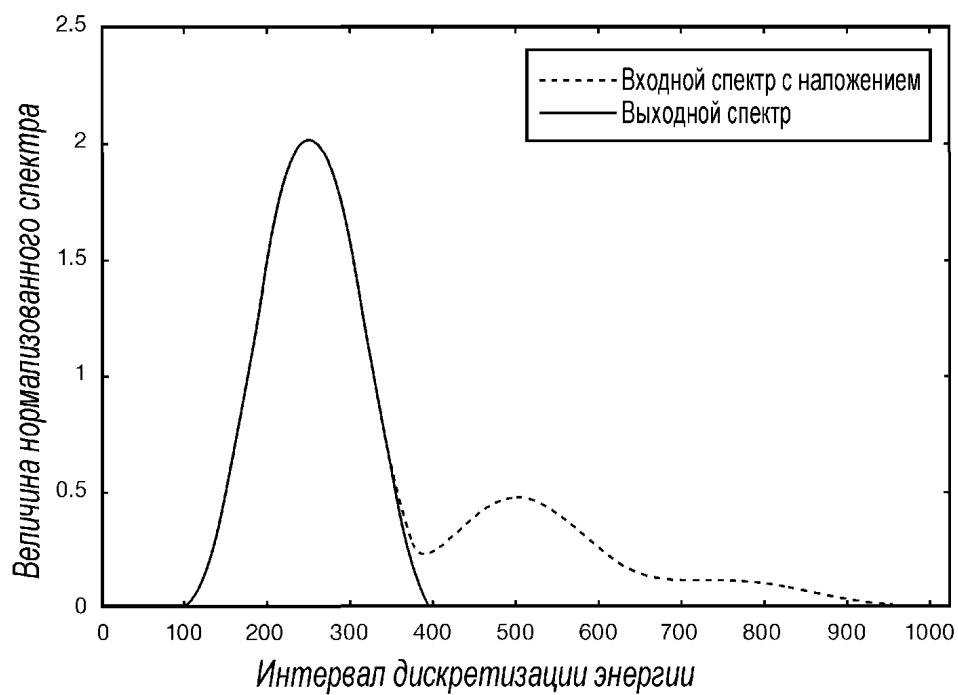
Фиг. 3



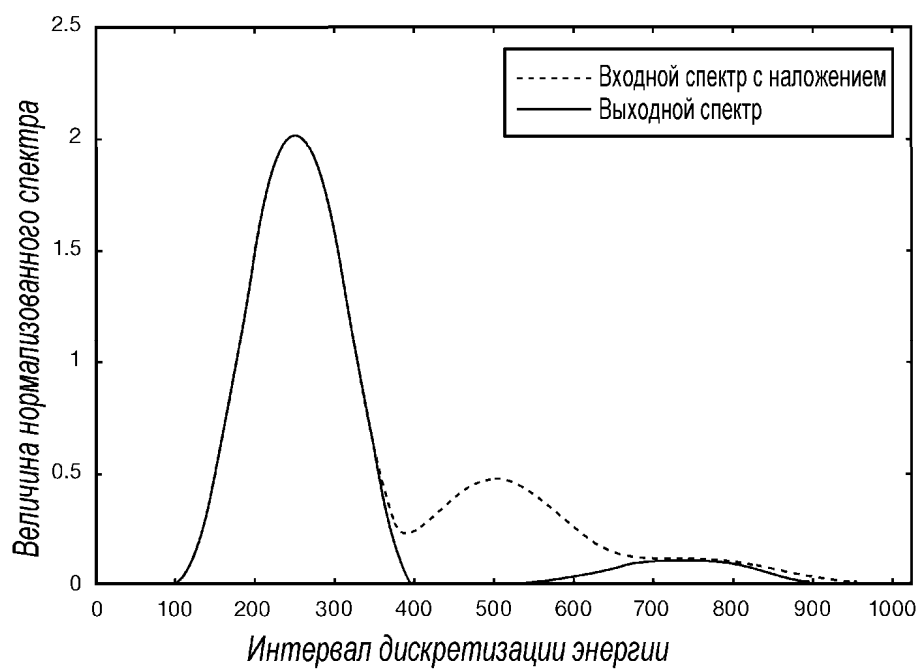
Фиг. 4



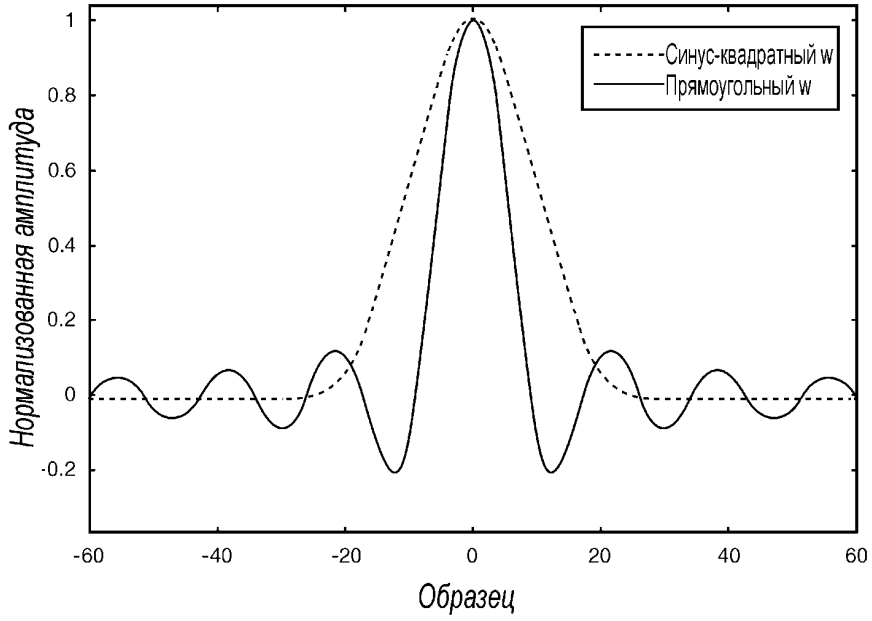
Фиг. 5



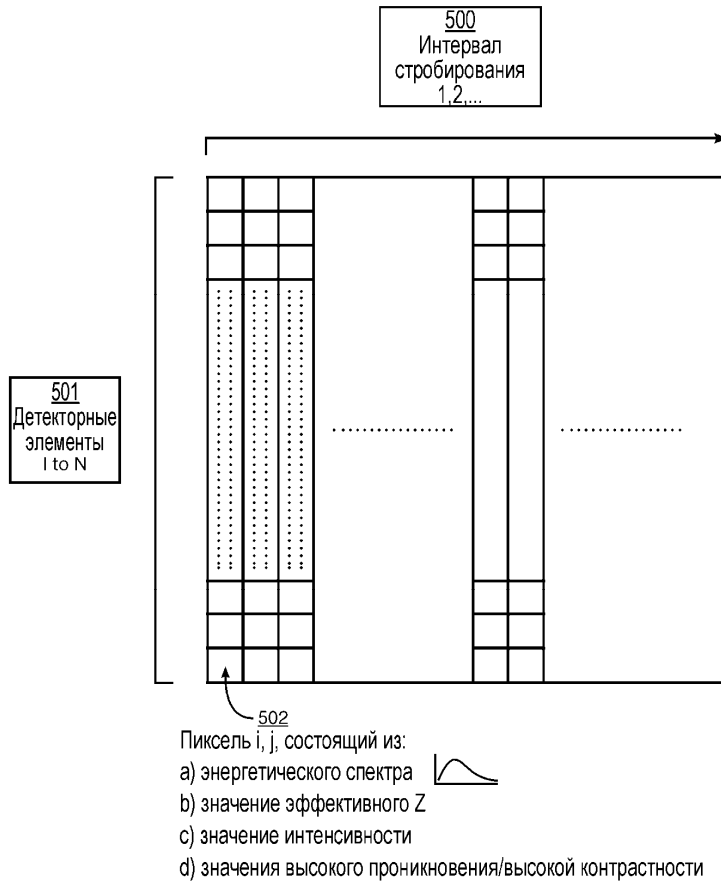
Фиг. 6



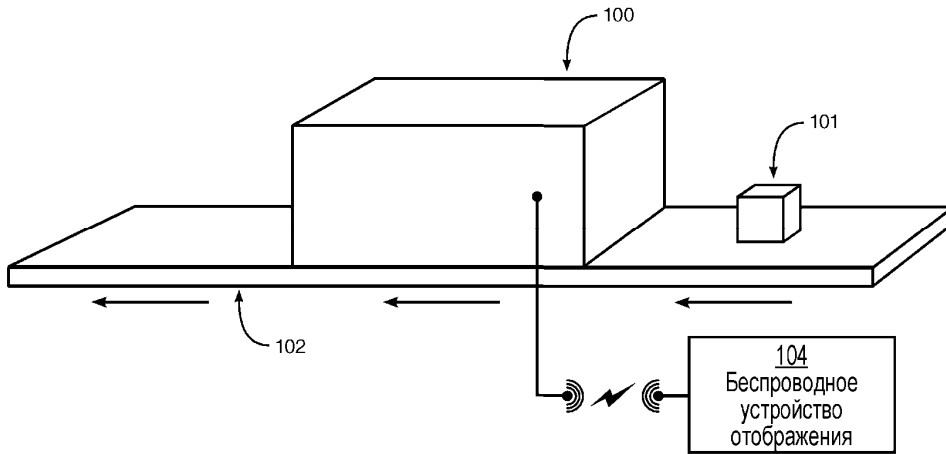
Фиг. 7



Фиг. 8

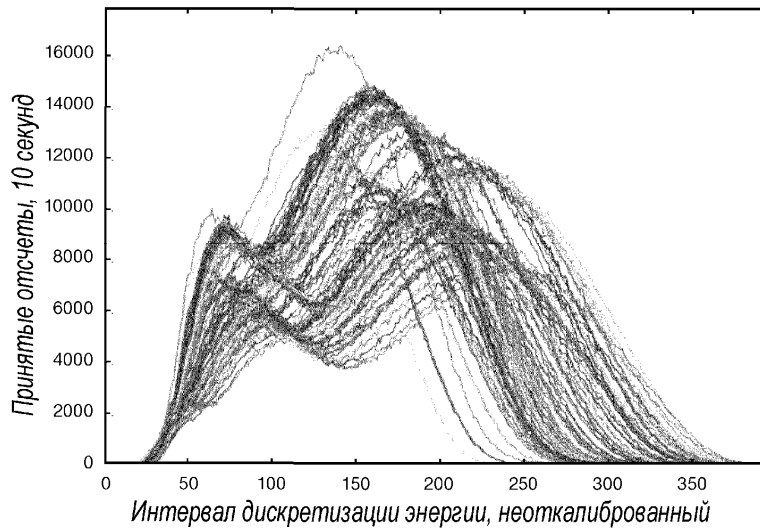


Фиг. 9

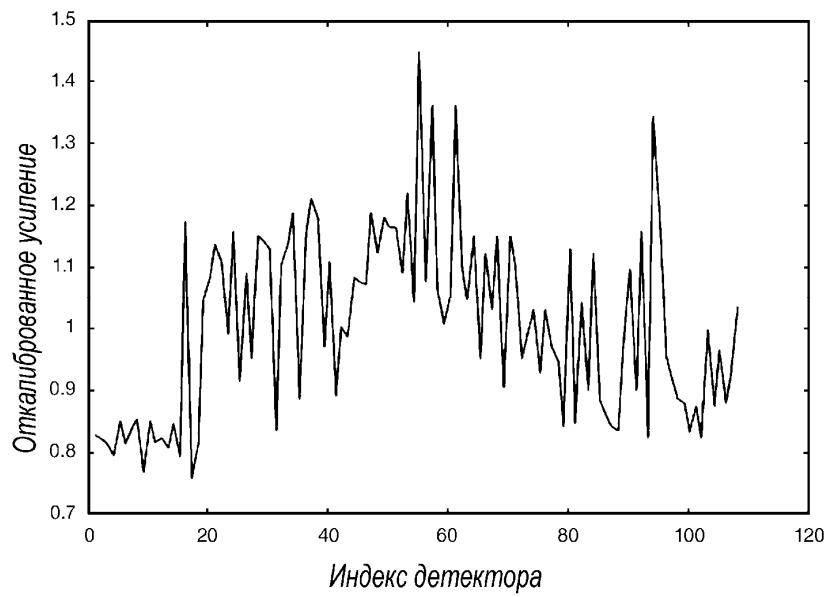


Фиг. 10

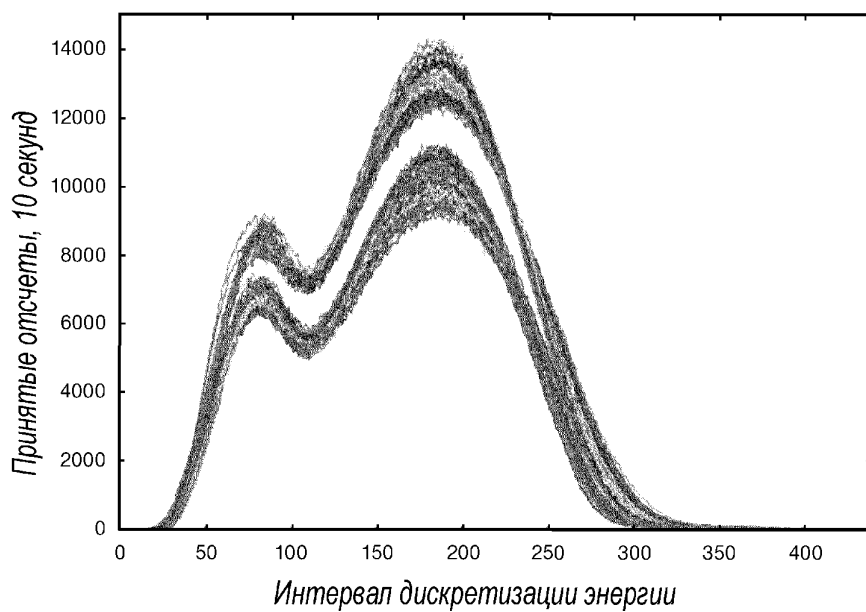
Неоткалиброванные энергетические спектры, 108 детекторов



Фиг. 11

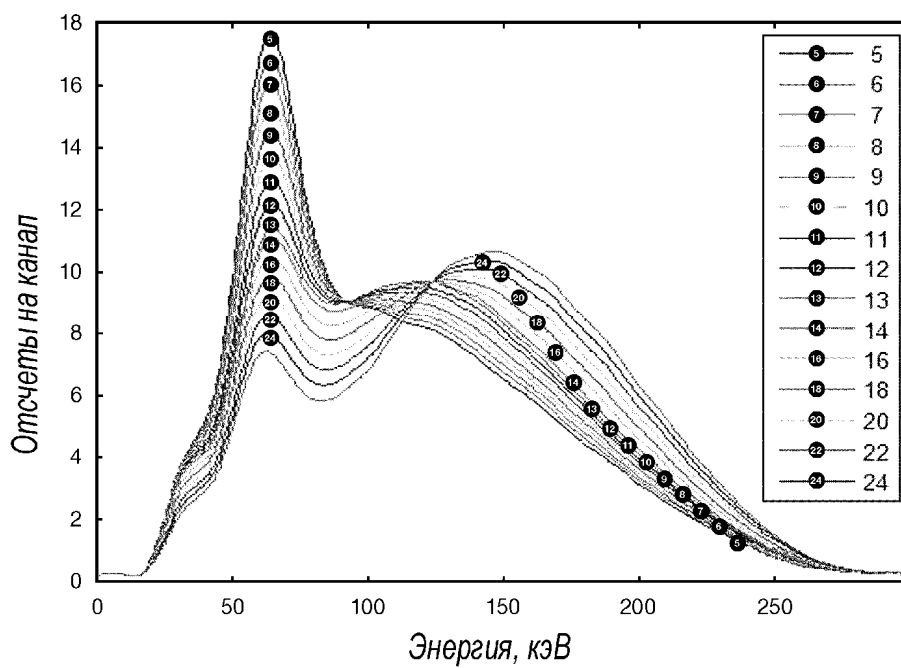


Фиг. 12



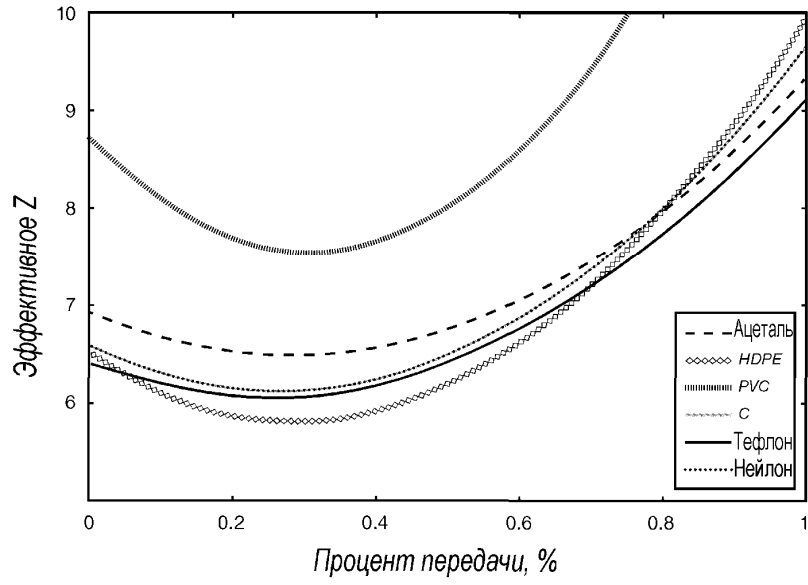
Фиг. 13

Интерполированные спектры, 10% передача

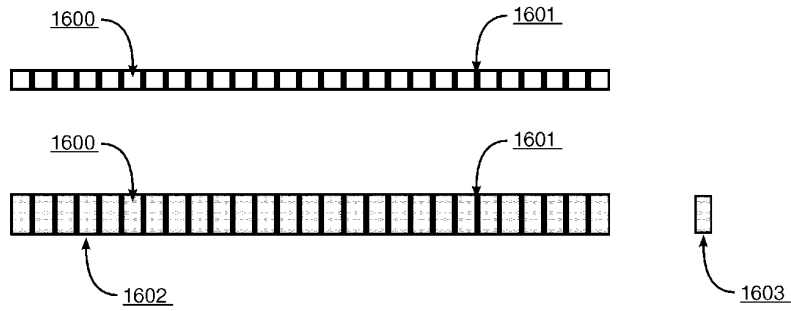


Фиг. 14

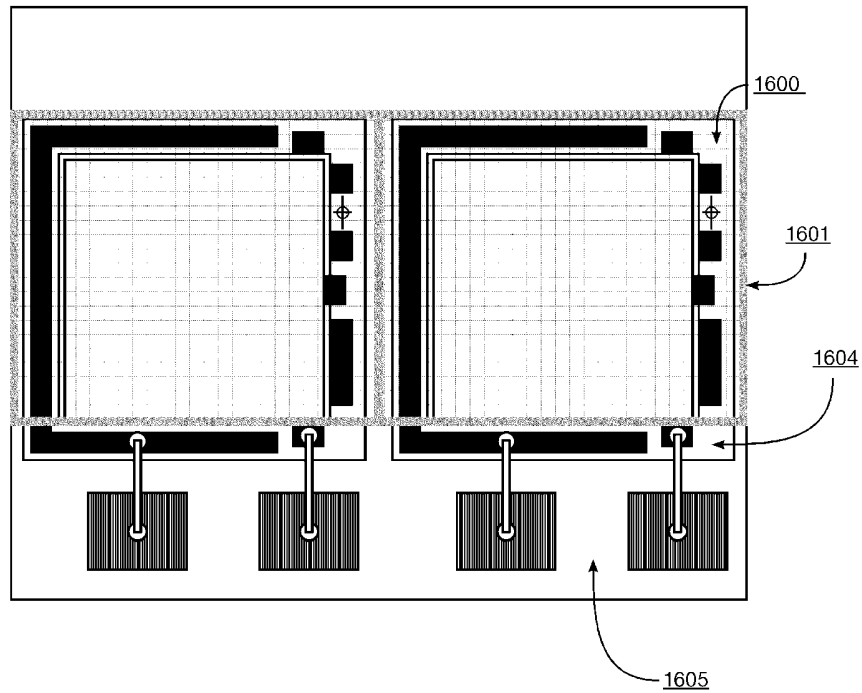
Эффективное Z в зависимости от интенсивности
для различных материалов



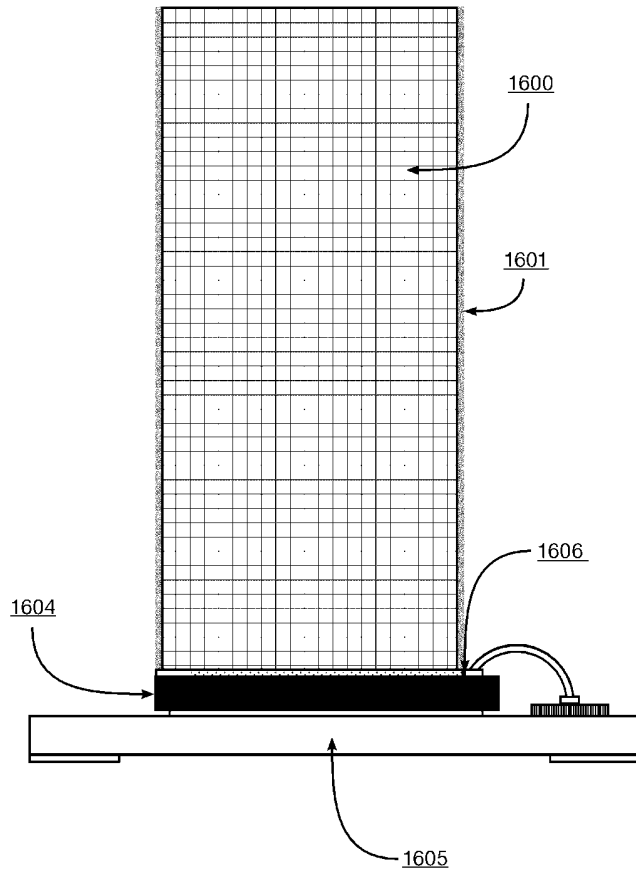
Фиг. 15



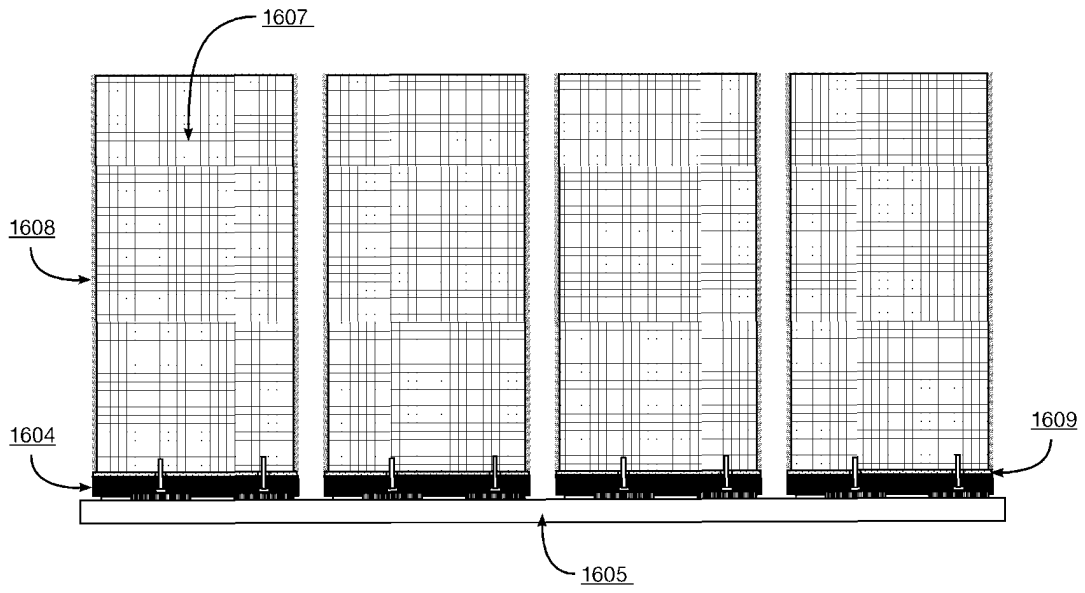
Фиг. 16А



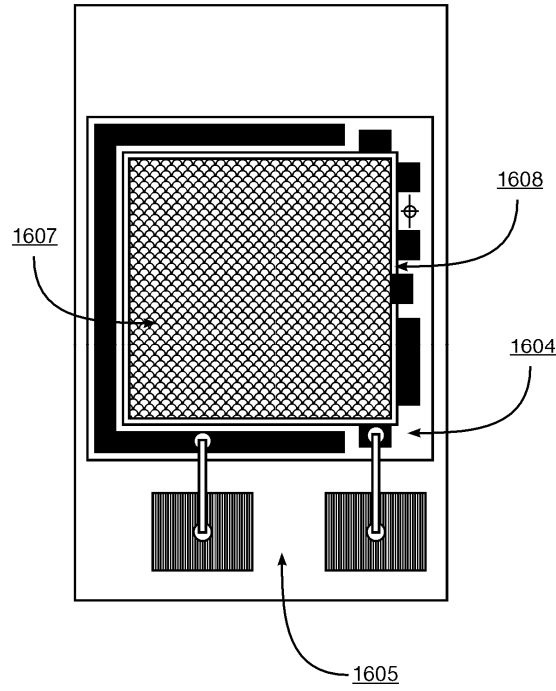
Фиг. 16В



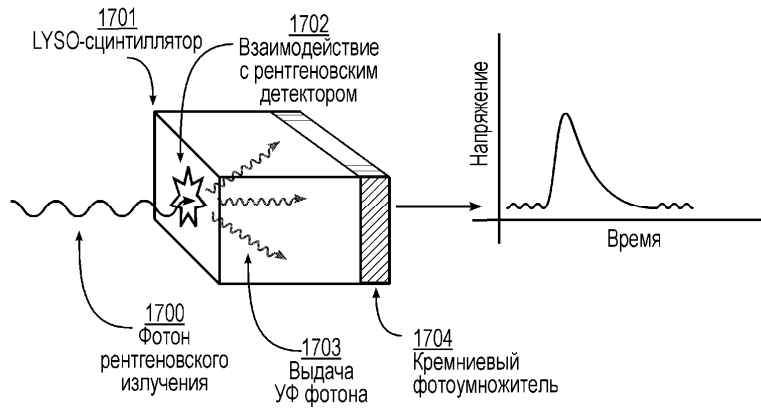
Фиг. 16С



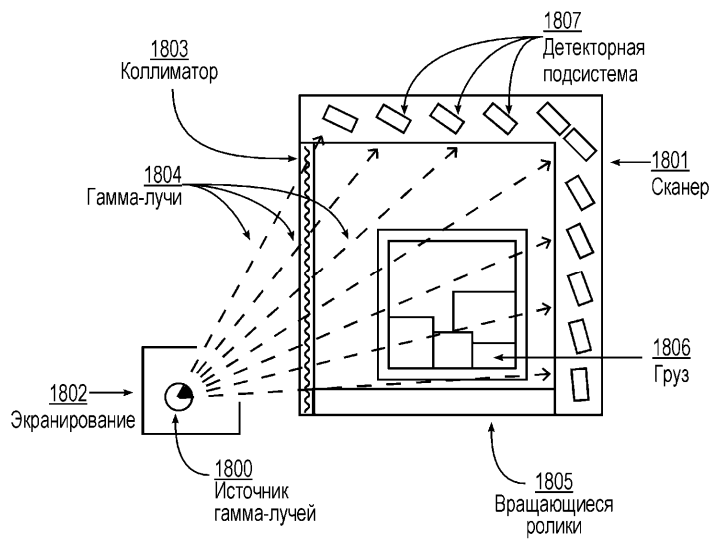
Фиг. 16D



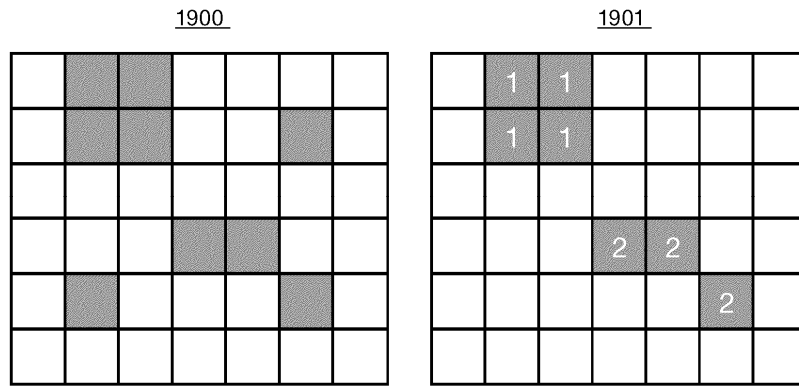
Фиг. 16Е



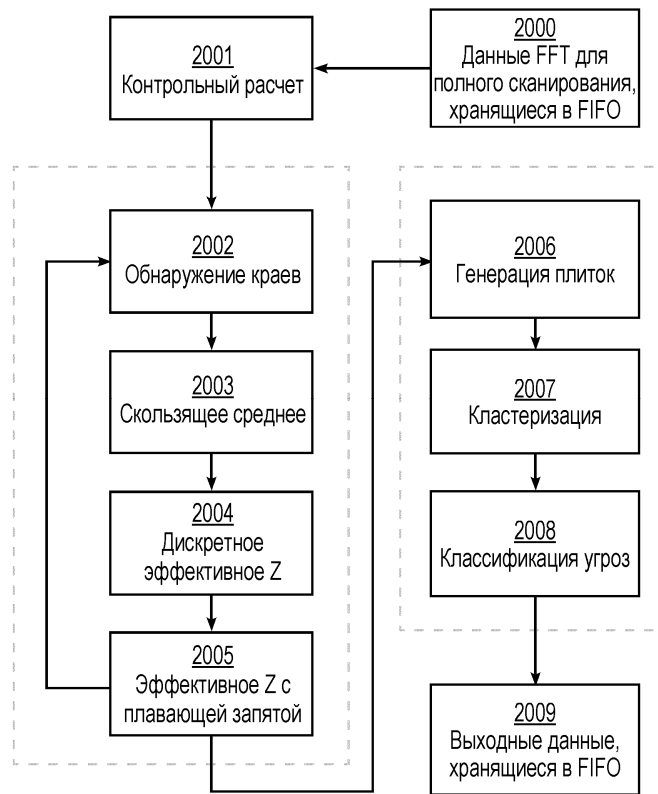
Фиг. 17



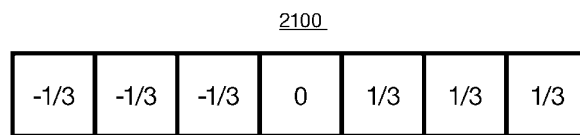
Фиг. 18



Фиг. 19



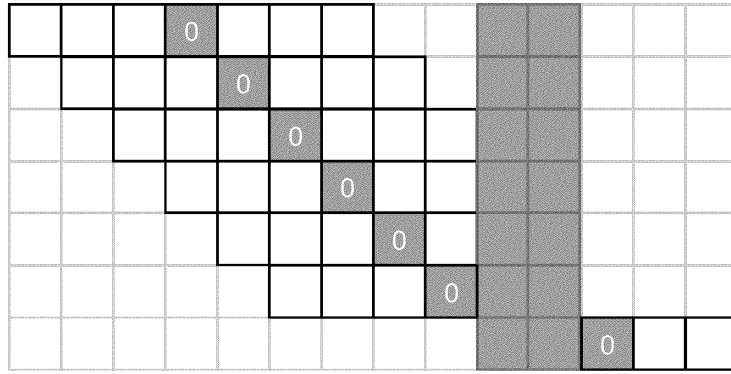
Фиг. 20



Фиг. 21

036838

2200



Фиг. 22



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2
