

PACS numbers: 07.57.Кр, 07.77. – n, 07.77. – Ка

АЛГОРИТМЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ КООРДИНАТ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ В ДЕТЕКТОРАХ ГАММА-КАМЕРЫ

В.Ю. Плехотник, Г.А. Поляков

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский
институт «Искра»,
ул. Звейнека, 145, 91033, Луганск, Украина
E-mail: official@iskra.lugansk.ua

В статье рассматриваются методы и алгоритмы вычисления координат сцинтилляций в позиционно-чувствительном детекторе гамма-камеры. Приведены результаты численных модельных экспериментов, проведенных для выяснения относительного быстродействия различных методов вычисления координат. Проведен анализ полученных результатов с целью определения перспективных для применения алгоритмов и методов правдоподобия.

Ключевые слова: ГАММА-КАМЕРА, КООРДИНАТЫ СЦИНТИЛЛЯЦИИ, МЕТОД ПРАВДОПОДОБИЯ.

(Получено 28.04.2010, в отредактированной форме – 11.05.2010)

В области ядерной медицины и радионуклидной диагностики гамма-камеры являются основным инструментом для визуализации пространственных распределений гамма-излучающих радиофармацевтических препаратов. Получаемые с их помощью изображения распределений представляют собой двумерные проекции трехмерных распределений радиофармпрепаратов на плоскость детектора гамма-камеры. Для получения изображений трехмерных распределений в современных методиках ядерной диагностики применяют сканирование области интереса в теле пациента с различных направлений. Таким образом, в результате исследования получают несколько двумерных проекций распределения радиофармпрепарата в различных ракурсах. Эти распределения являются основой для восстановления трехмерных распределений радиоактивного препарата в теле пациента.

С целью сокращения времени исследований современные ядерно-медицинские томографы оснащены несколькими детекторами (два и более), одновременно собирающими двумерные проекции распределения радиофармпрепарата. Детекторами ядерно-медицинского томографа чаще всего являются традиционные гамма-камеры.

Гамма-камера как прибор для получения двумерной картины распределения радиоактивного препарата в организме была предложена Ангером и подробно описана в работе [1]. Гамма-камера представляет собой двухкоординатный позиционно-чувствительный детектор гамма-квантов с развитой системой аналоговой и цифровой обработки сигналов, предназначенной для вычисления координат сцинтилляции и поглощенной в детекторе энергии гамма-кванта. Ее основой служит сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) в виде диска, упакованный в герметичный контейнер. На выходном окне детектора установлены

фотоприемники – ФЭУ. Теория формирования сигналов ФЭУ достаточно подробно приведена в [2]. Именно амплитуды сигналов ФЭУ представляют собой информацию для вычисления координат сцинтилляции, вызванной поглощением энергии гамма-кванта, т.к. амплитуда сигнала зависит от расстояния между точкой сцинтилляции и центром фотокатода ФЭУ.

Одной из главных проблем в применении гамма-камер является их сравнительно невысокое пространственное разрешение (порядка нескольких миллиметров). Традиционные методы улучшения пространственного разрешения основаны на особенностях Т-формирования сигналов ФЭУ. Такой подход приводит к необходимости применения позиционно-чувствительных ФЭУ или к необходимости уменьшения геометрических размеров ФЭУ и увеличению их количества. В результате система оказывается существенно усложненной и дорогостоящей. При этом собственные характеристики гамма-камеры, такие как пространственная неоднородность и нелинейность, могут даже ухудшиться. Предел улучшения пространственного разрешения гамма-камеры в традиционном подходе также ограничивается шумовыми характеристиками ФЭУ, т.к. сигналы ФЭУ, значительно удаленных от точки сцинтилляции, будут вносить статистический шум и погрешность в вычисления координат.

Другим подходом к увеличению пространственного разрешения является совершенствование методов вычисления координат и энергии сцинтилляции. Реализация данного метода требует значительного увеличения вычислительной мощности блока вычисления координат. Кроме того, скорость вычисления координат в значительной степени зависит от алгоритма поиска решения.

Целью данной работы является анализ алгоритмов вычисления координат сцинтилляции для полностью цифрового варианта позиционно-чувствительного детектора типа гамма-камеры с целью выбора оптимальных по точности и быстродействию.

Благодаря оптическим контактам между сцинтиллятором, световодом и ФЭУ, световые фотоны от сцинтилляции в кристалле достигают фотокатодов одновременно всех ФЭУ. Однако амплитуда сигнала отдельного ФЭУ зависит от взаимного расположения его фотокатода и точки сцинтилляции. Нормированная зависимость амплитуды сигнала ФЭУ от расстояния до сцинтилляции в плоскости выходного окна кристалла-сцинтиллятора называется амплитудно-пространственной характеристикой (АПХ) детектора. Соотношение амплитуд сигналов различных ФЭУ при регистрации одной сцинтилляции является информацией для вычисления ее координат. В классическом варианте гамма-камеры Ангера нормированные сигналы от всех ФЭУ суммируются на резисторной матрице со специальным образом рассчитанными весами для получения значений координат (x, y) . Энергетический сигнал получают при суммировании амплитуд сигналов от всех ФЭУ с равными весами. Математически процедура вычисления координат по схеме Ангера имеет вид:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ci} \cdot u_i}{\sum_{i=1}^N u_i}, \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^N Y_{ci} \cdot u_i}{\sum_{i=1}^N u_i}, \quad (1)$$

где u_i – амплитуда сигнала i -го ФЭУ, X_{ci} , Y_{ci} – координаты центра фотокатода i -го ФЭУ, N – количество ФЭУ. Очень подробно теория формирования координатных сигналов и способы вычисления матричных коэффициентов изложены в [2].

Существующие алгоритмы вычисления координат можно разбить на две группы: метод Ангера и его модификации, метод максимального правдоподобия и его модификации. В классическом варианте гамма-камеры Ангера для получения координатной информации о месте сцинтилляции нормированные сигналы от всех ФЭУ суммируются на резисторной матрице. В полностью цифровом варианте гамма-камеры координаты сцинтилляции могут быть вычислены с помощью компьютера или специализированного процессора по формуле (1). Однако и программному методу вычисления координат в таком случае оказываются присущи недостатки аналогового метода, такие как неравномерность и нелинейность получаемого изображения. В некоторых вариантах метода Ангера для вычисления координат сцинтилляции используются сигналы не от всех ФЭУ, а только сигналы, превышающие некоторый порог [2] или входящие в некоторый кластер – группу ФЭУ, устанавливаемую по мере близости к месту сцинтилляции [3]. Кроме того, вычисленные кластерным методом Ангера координаты преобразуются в реальные координаты с помощью специально подготовленных таблиц. В результате такие характеристики гамма-камеры, как нелинейность и неоднородность, значительно улучшаются при высоком значении пространственного разрешения [4].

Метод максимального правдоподобия для определения координат сцинтилляций в цифровом варианте измерений реализуется как решение системы уравнений, представляющей собой зависимость амплитуд сигналов отдельных ФЭУ ПЧД от координат сцинтилляции:

$$A_i = \gamma_i(x, y) \quad (2)$$

Здесь i – номер ФЭУ ($i = 0 \dots N - 1$), N – количество ФЭУ, $\gamma_i(x, y)$ – амплитудно-пространственная характеристика (АПХ) i -го ФЭУ.

Система уравнений (2) не может иметь точного решения, т.к. амплитуды сигналов ФЭУ являются величинами случайными и содержат в себе шумовую составляющую, обусловленную статистическим характером формирования сигнала. Поэтому система уравнений решается методом минимизации целевой функции. В результате решения получается оценка наиболее вероятных значений координат сцинтилляции. В общем случае минимизируется функция вида:

$$F(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} f(|A_i - \gamma_i(x, y)|) \quad (3)$$

Точность и быстродействие алгоритмов определения координат сцинтилляций в значительной степени зависят от вида и способов вычисления функции $f(|A_i - \gamma_i(x, y)|)$. Целевые функции представляют собой критерии проверки гипотезы о совпадении выборки случайных сигналов ФЭУ с выборкой детерминированных сигналов из АПХ для точки с координатами (x, y) в плоскости ПЧД. Мы использовали для проверки гипотезы следующие целевые функции:

1. Критерий χ^2 Пирсона в виде

$$\chi_P^2(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(A_i - \gamma_i(x, y))^2}{\gamma_i(x, y)}. \quad (4)$$

2. Критерий Неймана в виде

$$\chi_N^2(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(A_i - \gamma_i(x, y))^2}{A_i}, \text{ для } A_i > 0 \quad (5)$$

3. Модифицированный критерий Неймана в виде

$$\chi_{mN}^2(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(A_i - \gamma_i(x, y))^2}{\max(A_i, 1)} \quad (6)$$

4. Отношение максимального правдоподобия (ОМП) для случайной величины, распределенной по Пуассоновскому закону

$$\chi_{\lambda, P}^2(x, y) = 2 \cdot \left[\sum_{i=0}^{N-1} (\gamma_i(x, y) - A_i) - \sum_{i=0(A_i \neq 0)}^{N-1} A_i \cdot \ln \left(\frac{\gamma_i(x, y)}{A_i} \right) \right]. \quad (7)$$

5. Отношение максимального правдоподобия (ОМП) для случайной величины, распределенной по нормальному закону Гаусса:

$$\chi_{\lambda, G}^2(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} \left[\frac{(A_i - \gamma_i(x, y))^2}{\gamma_i(x, y)} + \ln \left(\frac{\gamma_i(x, y)}{A_i'} \right) - \frac{(A_i - A_i')^2}{A_i'} \right], \quad (8)$$

$$A_i' = \sqrt{\frac{1}{4} + A_i^2} - \frac{1}{2}.$$

Следует отметить, что эта функция может применяться только в случае, если все A_i отличны от нуля [5].

6. Шенноновская норма разности распределений вычисляется по формуле [6]:

$$M_{Sh}(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} [A_i - \gamma_i(x, y)] \cdot \ln \left(\frac{A_i}{\gamma_i(x, y)} \right). \quad (9)$$

Ранее в [6, 7] была описана программно-математическая модель системы визуализации гамма-излучения, которая использовалась для оценки собственных характеристик позиционно-чувствительного детектора типа гамма-камеры. Для оценки быстродействия алгоритмов мы использовали эту же модель. При выполнении модельных экспериментов по изучению координатных зависимостей пространственного разрешения наилучшие результаты были достигнуты при использовании в качестве целевой функции критерия Пирсона (4) и Неймана (5). Несколько худшие, но в целом удовлетворительные результаты достигнуты при использовании

модифицированного критерия Неймана (6). Особый интерес представляет также критерий Шенноновской нормы (9), обеспечивающий хорошие результаты в точках с малой величиной информации Фишера.

В соответствии со стандартом NEMA характеристики позиционно-чувствительного детектора гамма-камеры измеряются с помощью свинцовой маски, устанавливаемой непосредственно на детектор и облучаемой гамма-квантами от источника ^{99m}Tc [8]. Модельные эксперименты для проверки быстродействия алгоритмов проводились в условиях имитации измерений собственного пространственного разрешения и собственной нелинейности. Время вычисления координат оценивалось по результатам расчетов не мене 200000 событий. При этом за основу для сравнения принималось время вычислений координат в соответствии с классическим алгоритмом Ангера (1). Результаты оценок времени расчета модельных экспериментах приведено в таблице 1.

Анализ результатов оценок времени расчета координат показывает, что алгоритмы на основе критериев Пирсона, Неймана и модифицированного Неймана оказываются предпочтительнее всех остальных методов максимального правдоподобия. Учитывая также не слишком хорошие результаты по пространственному разрешению для алгоритмов на основе критериев ОМП, полученные ранее [6,7], следует признать эти алгоритмы не перспективными для дальнейшего развития. Однако алгоритм с использованием шенноновской нормы может оказаться полезным в качестве составной части комбинированного критерия.

Таблица 1 – *Время расчета координат сцинтилляций при использовании различных алгоритмов*

Метод расчета	Время расчета координат, мсек/событие
Алгоритм Ангера	0,014 ± 0,0005
Критерий Пирсона χ^2	0,28 ± 0,001
Критерий Неймана	0,28 ± 0,001
Критерий Неймана модифицированный	0,25 ± 0,001
ОМП для пуассоновской случайной величины	0,63 ± 0,003
ОМП для гауссовской случайной величины	0,99 ± 0,003
Шенноновская норма	0,41 ± 0,001

Специфика работы гамма-камер требует, чтобы поступающие на детектор данные обрабатывались в режиме реального времени. Скорость обработки данных, которую должен обеспечить детектор, должна быть не меньше чем 300 000 событий в секунду. Такую скорость обработки данных для алгоритмов на основе метода правдоподобия можно обеспечить только при использовании методов параллельных вычислений и параллельных вычислительных устройств. При этом значительное внимание, по-видимому, следует обратить и на методы решения оптимизационной задачи (3). До настоящего времени нами использовались только

простейшие методы. Использование методов ускоренной оптимизации (наискорейшего спуска и т.п.) позволит существенным образом сократить время вычисления координат сцинтилляции. Таким образом, в результате проведенных экспериментов установлены оптимальные по пространственному разрешению и времени вычислений алгоритмы расчета координат сцинтилляций. Методы максимального правдоподобия на основе критериев Пирсона и Неймана обеспечивают удовлетворительное пространственное разрешение при невысоких затратах времени. Дальнейшее усовершенствование методов расчета координат сцинтилляций будут направлены на разработку параллельных методов расчетов и методов ускоренной оптимизации.

ALGORITHMS OF COORDINATES SCINTILLATIONS CALCULATION IN THE GAMMA-CAMERA DETECTOR

V.Yu. Plakhotnik, G.A. Polyakov

Scientific Research and Project Designing Institute "Iskra"
Zveineka Str., 145, 91033, Lugansk, Ukraine
E-mail: official@iskra.lugansk.ua

The methods and algorithms of scintillation coordinates calculation in gamma-camera position-sensitive detector are considered in the paper. The results of numerical model experiments, which were carried out for clearing-up of relative operating speed of different coordinate calculation methods, are presented. The analysis of obtained results was carried out for determination of perspective for application algorithms and likelihood methods.

Keywords: GAMMA-CAMERA, SCINTILLATION COORDINATES, LIKELIHOOD METHOD.

АЛГОРИТМИ ОБЧИСЛЕННЯ КООРДИНАТ СЦИНТИЛЯЦІЙ В ДЕТЕКТОРАХ ГАММА-КАМЕРИ

В.Ю. Плахотник, Г.А. Поляков

Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут «Искра»,
вул. Звейнека, 145, 91033, Луганськ, Україна
E-mail: official@iskra.lugansk.ua

В статті розглянуті методи і алгоритми обчислення координат сцинтиляцій у позиційно-чутливому детекторі гама-камери. Наведені результати числових модельних експериментів, проведених для виявлення відносної швидкодії різних методів обчислення координат. Проведено аналіз отриманих результатів з метою визначення перспективних для застосування алгоритмів та методів правдоподібності.

Ключові слова: ГАМА-КАМЕРА, КООРДИНАТИ СЦИНТИЛЯЦІЇ, МЕТОД ПРАВДОПОДІБНОСТІ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н.С. Anger, *J. Nucl. Med.* No5, 515 (1964).
2. С.Д. Калашников. *Физические основы проектирования сцинтилляционных гамма-камер* (Москва: Энергоатомиздат: 1985).

3. М.А. Арлычев, В.Л. Новиков, А.В. Сидоров, *Определение координат сцинтилляционных событий в детектирующей системе томографических гамма-камер* (Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ: 2007).
4. М.А. Арлычев, В.Л. Новиков, А.В. Сидоров, А.М. Фиалковский, Е.Д. Котина, Д.А. Овсянников, В.А. Плоских, *ЖТФ* **79**, 138 (2009) (М.А. Arlychev, V.L. Novikov, A.V. Sidorov, A.M. Fialkovskii, E.D. Kotina, D.A. Ovsyannikov, V.D. Ploskikh, *Tech. Phys.* **53**, 1539 (2009)).
5. T. Hauschild, M. Jentschel, *Nucl. Instrum. Meth. A* **457**, 384 (2001).
6. В.Ю. Плахотник, *Исследование характеристик пространственных распределений вычисленных координат сцинтилляций в позиционно-чувствительном детекторе типа гамма-камеры* (Донецк: ДонНТУ: 2004).
7. В.Ю. Плахотник, Г.А. Поляков, *Исследование статистических критериев согласия в применении к вычислению координат сцинтилляции в позиционно-чувствительном детекторе типа гамма-камеры* (Системні технології: Дніпропетровськ: 2004).
8. *Performance measurements of scintillation cameras. NEMA Standards publication NU 1* (Rosslyn, USA: National Electrical Manufacturers Association: 2001).