

Моделирование формирования рентгеновских изображений с использованием Geant4

Д. С. Быков¹, А. И. Кожухарь², А. А. Александрова³

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

¹dimabykov0301@yandex.ru, ²89214200217@mail.ru, ³a.a.aleksandrova@inbox.ru

Аннотация. Рентгеновская визуализация широко применяется в медицине и промышленности для получения изображений внутренней структуры объектов. Однако настройка параметров рентгенодиагностических систем (например, расстояние между трубкой и объектом или число проекций для 3D-реконструкции) часто проводится методом проб и ошибок, что увеличивает лучевую нагрузку и затраты. Моделирование процесса формирования рентгеновского изображения с помощью метода Монте-Карло позволяет исследовать и оптимизировать параметры без прямых экспериментов, снижая риск и стоимость.

В данной работе представлен обзор подхода к моделированию рентгеновских снимков с помощью Geant4, включая реализуемые физические процессы, структуру программы на C++ и метод формирования изображений.

Ключевые слова: моделирование рентгеновских изображений; рентгеновские снимки; взаимодействие квантов с веществом

I. ВВЕДЕНИЕ

Для достоверного формирования рентгеновского изображения необходимо учитывать основные механизмы взаимодействия рентгеновского излучения с веществом. В Geant4 реализуются ключевые процессы, определяющие ослабление и рассеяние квантов рентгеновского диапазона [1]. К ним относятся упругое (когерентное) рассеяние, комптоновское (неупругое) рассеяние, фотоэлектрический эффект, а также связанные вторичные явления вроде испускания характеристических рентгеновских квантов.

Перечисленные процессы приводят к ослаблению первичного пучка рентгеновского излучения при прохождении через объект. Интенсивность излучения, дошедшего до детектора, зависит от интегрального эффекта фотоэффекта и рассеяния на всем пути излучения, что и формирует контраст изображения. Geant4 использует базы данных и модели (Livermore, Penelope и т. д. [2], вместе называемых «метод Монте-Карло») для расчета сечений этих процессов в широком диапазоне энергий, обеспечивая достоверное воспроизведение процессов поглощения и рассеяния рентгеновских квантов в различных материалах.

II. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GEANT4

Geant4 предоставляется в виде библиотеки классов C++. В созданном программном обеспечении реализованы возможности задания геометрических параметров съемки (включая параметры источника), учета физических процессов взаимодействия, а также настройки сбора результатов.

Структура кода приложения следует архитектуре Geant4 (рис. 1) и включает ряд обязательных классов:

- RunManager, который отвечает за инициализацию и запуск моделирования.
- Класс-наследник G4VUserDetectorConstruction, где задается геометрия: устанавливаются материалы и создаются объемы (объект World, объект исследуемого образца, рентгеновская трубка, детекторная панель и пр.), при этом геометрия может быть произвольной сложности – от простых объектов до импортированных CAD-моделей.
- В этом же классе можно определить чувствительность детектора (G4VSensitiveDetector) и прикрепить ее к определенным логическим объемам (например, к пластине детектора), чтобы отслеживать попадания частиц. Для формирования изображения детектор сегментирует детекторную область на пиксели и аккумулирует энергию или счет квантов по каждому пикселю.

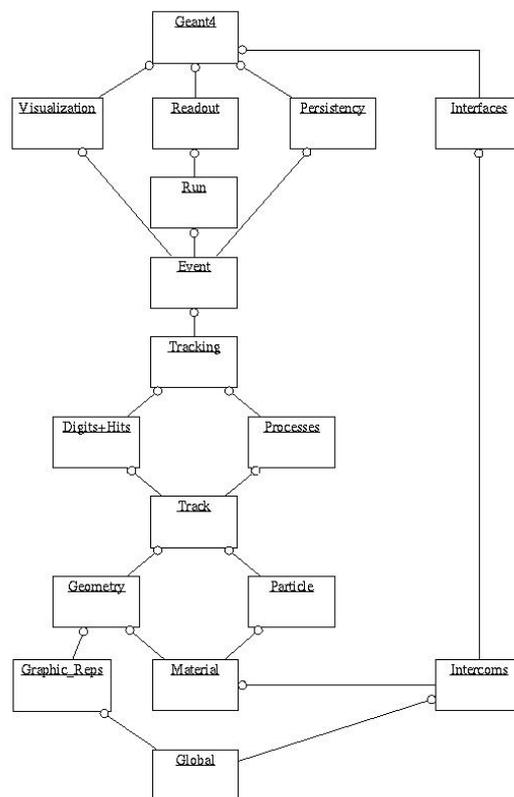


Рис. 1. Диаграмма категорий классов, разработанная для Geant4

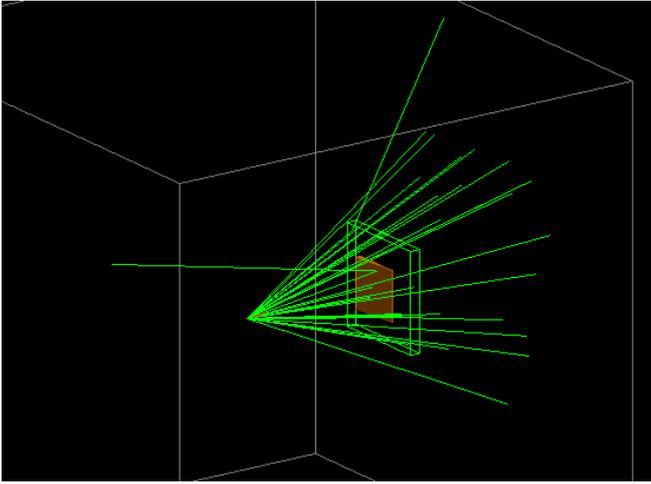


Рис. 2. Пример визуализации траекторий частиц

- Класс, определяющий исходные условия каждого события (event). Генератор G4GeneralParticleSource (GPS) позволяет задавать произвольные распределения энергии и углов, а также радиоактивные источники. Например, для имитации рентгеновской трубки можно загрузить спектр излучения и реализовать его в GPS. В каждом событии генерируется один или несколько квантов, идущих от источника (точечного или распределенного) в сторону объекта. Этот класс обеспечивает начальные условия, после чего управление передается механизму трекинга Geant4.

При запуске моделирования Geant4 последовательно проходит через множество событий, и в процессе трекинга детально имитируются все взаимодействия. В итоге пользователь получает набор данных о том, сколько квантов и с какими энергиями зарегистрировано в детекторе, что и требуется для построения изображения.

Благодаря языку C++, на котором основан Geant4, исходный программный код симуляции легко интегрировать с другими модулями (например, с интерфейсом пользователя или системой обработки результатов), а объектно-ориентированная структура упрощает сопровождение и расширение кода. Пример реализации расчетов приведен на рис. 2.

III. ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В микромире взаимодействия частиц носят вероятностный характер, обусловленный квантовой механикой, соответственно, в экспериментах чаще всего выполняют серии измерений, фиксирующих множество событий (для высокой точности производят тысячи и даже миллионы тестовых прогонов) [3]. В общем виде решение задачи методом Монте-Карло выглядит следующим образом. Предположим, необходимо получить x из интервала $[x_1, x_2]$ на распределении $f(x)$, и нормализованная плотность вероятности может быть записана следующим образом:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n N_i f_i(x) g_i(x),$$

где $N_i > 0$, $f_i(x)$ – нормализованные функции плотности вероятности на интервале $[x_1, x_2]$, и $0 < g_i(x) \leq 1$.

Согласно этому методу, x может быть получено следующим путем:

1. Выбирается случайное целое число $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ с вероятностью, пропорциональной N_i .
2. Выбирается значение x_0 на распределении $f_i(x)$.
3. Вычисляется $g_i(x_0)$ и принимается $x = x_0$ с вероятностью $g_i(x_0)$.
4. Если x_0 отклоняется, вернуться к шагу 1.

Алгоритм формирования рентгеновского изображения в симуляции имитирует процесс, происходящий в реальной установке для рентгенографии, и включает следующие этапы моделирования:

1. Задание начальных условий – геометрические параметры съемки такие, как характеристики источника, исследуемого объекта и детектора (например, источник может быть рентгеновской трубкой с точечным фокусным пятном с определенной диаграммой направленности, а детектор разбивается на элементарные ячейки заданного размера).

2. Симуляция треков – расчет траекторий квантов. Моделирование проводится для множества исходных частиц (от 10^{10} и более) для получения статистически достоверного результата. Каждый квант генерируется с начальным направлением и энергией. Если учитывается реальный спектр рентгеновского излучения, энергия каждого кванта берется случайно из заданного распределения (имитируя полихроматический пучок). Если происходит взаимодействие, генерируются вторичные частицы (например, выбитый электрон, рассеивающийся квант или флуоресцентный квант), которые также отслеживаются до окончания симуляции. Такой последовательный подход позволяет учесть даже сложные цепочки эффектов (например, множественное рассеяние).

3. Регистрация детектором, который фиксирует факт попадания кванта в конкретный пиксель и величину его энергии. Geant4 позволяет получить практически любую информацию о частице во время симуляции, находя индекс пикселя, куда пришел квант (например, по его координатам попадания в плоскость), и увеличивает счетчик интенсивности этого пикселя на величину энергии. Также можно учитывать и рассеянные кванты, попадающие в детектор не по прямой траектории, а в соседние пиксели, тем самым моделируя эффект рассеянного шума на изображении.

4. Накопление и обработка данных – по мере выполнения расчета траекторий квантов происходит накопление «сырых» данных изображения. После окончания симуляции полученный массив представляет собой смоделированное рентгеновское изображение (в численном виде). Далее может выполняться постобработка: нормировка на число исходных квантов или на время экспозиции, добавление моделирования шума детектора (например, квантового шума или шумов электроники) и т.д. Полученную матрицу можно интерпретировать как яркости пикселей изображения, для чего строится карта распределения интенсивности в градациях серого, где более светлые области соответствуют сильному поглощению (меньше

дошедших квантов). Рабочее окно программы показано на рис. 3.

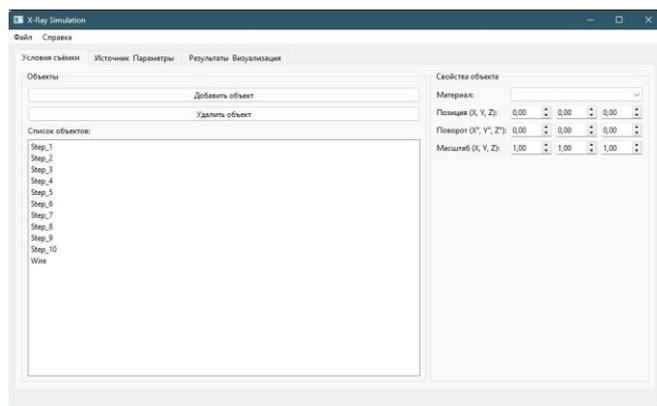


Рис. 3. Рабочее окно программы «Raving-1.0»

Важным результатом является то, что результирующее изображение в точности отражает заложенную физическую модель. Так, если в объекте присутствуют области из материала с высоким Z , в этих зонах симуляция покажет заметно сниженный сигнал из-за преобладания поглощения. Мягкие ткани или материалы с низкой плотностью, наоборот, дадут более темный участок изображения. Тонкие структуры могут быть частично размыты вследствие рассеяния. Все эти эффекты возникают естественно из моделирования отдельных квантов. Благодаря детальному моделированию такой «виртуальный рентгеновский снимок» может быть напрямую сопоставлен с реальным, что позволяет, например, проверять качество конструкции рентгеновских систем или отлаживать алгоритмы реконструкции изображений до проведения физических экспериментов. Пример работы программы представлен на рис. 4.

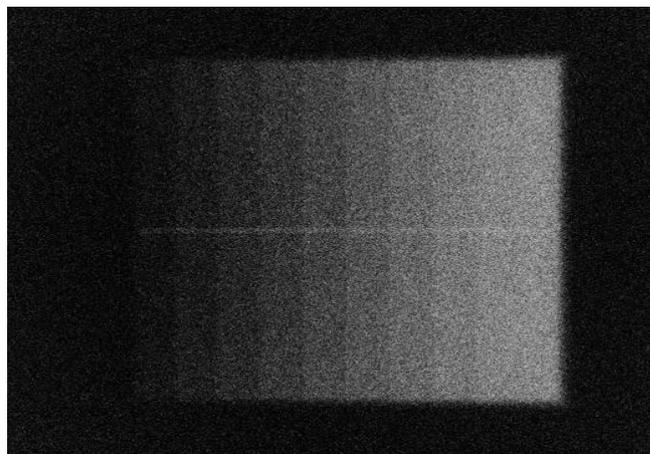


Рис. 4. Пример получаемого изображения (тест-объект – ступенчатый медный клин 1-10 мм с железной проволокой 100 мкм. Напряжение – 100 кВ, ток – 500 мкА, время экспозиции – 3 секунды, фокусное пятно – 30 мкм, детектор – пленка)

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная программа на основе Geant4 позволяет достаточно точно воспроизвести эффекты фотоэффекта, комптоновского и когерентного рассеяния, а также связанные вторичные процессы (флуоресценция и др.), что позволяет получать синтетические изображения, близкие по статистическим и контрастным характеристикам к реальным рентгенограммам.

Программа дает возможность гибко настраивать симуляцию под конкретные задачи: пользователь контролирует геометрию съемки, спектр и характер излучения, параметры детекторов и сбор данных. Использование разработанной программы для моделирования радиографического контроля, медицинских исследований и т.п. открывает широкие возможности для ее практического применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Geant4 Documentation: сайт. – URL: <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/AllGuides/html/index.html>.
- [2] Gamma incident – Physics Reference Manual: сайт. – URL: https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/electromagnetic/gamma_incident/index.html.
- [3] Козлов С.В., Антонов С.С. Моделирование прохождения частиц через вещество в программной среде Geant4 // Сборник материалов X Всероссийской конференции «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии», Оренбург, 18-19 ноября 2021. С. 332-337.