Tomographic Imaging with Cosmic Ray Muons

C. L. Morris, C. C. Alexander, J. D. Bacon, K. N. Borozdin, D. J. Clark, R. Chartrand, C. J. Espinoza, A. M. Fraser, M. C. Galassi, J. A. Green, J. S. Gonzales, J. J. Gomez, N. W. Hengartner, G. E. Hogan, A. V. Klimenko, M. F. Makela, P. McGaughey, J. J. Medina, F. E. Pazuchanics, W. C. Priedhorsky, J. C. Ramsey, A. Saunders, R. C. Schirato, L. J. Schultz, M. J. Sossong, and G. S. Blanpied *Science and Global Security*, 2008, Volume 16, pp. 37-53

## ТОМОГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПРИ ПОМОЩИ МЮОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

К. Моррис, К. Александер, Дж. Бэкон, К. Бороздин, Д. Кларк, Р. Чартрэнд, К. Эспиноза, А. Фрейзер, М. Галасси, Дж. Грин, Дж. Гонзалес, Дж. Гомез, Н. Хенгартнер, Дж. Хоган, А. Клименко, М. Макела, П. МакГафей, Дж. Медина, Ф. Пазуханикс, В. Придхорский, Дж. Рамсей, А. Саундерс, Л. Шульц, М. Соссонг и Г. Блэнпид

Свыше 120 миллионов автомашин ежегодно въезжают на территорию США. Многие способны перевозить скрытое ядерное оружие или ядерные материалы. Разрабатываемые в настоящее время системы рентгеновской радиографии имеют ограничения, поскольку их нельзя применять для машин с пассажирами, а энергия и дозы слишком малы, чтобы проникнуть сквозь многие грузы. Авторы предлагают новую методику, которая обходит эти ограничения, путем получения томографических изображений с использованием многократного рассеяния космического излучения, которое проходит через каждую автомашину. В сочетании с пассивным радиационным детектированием мюонный просмотр может внести вклад в безопасную и надежную пограничную защиту от ядерных устройств или материалов, находящихся в машинах с пассажирами и контейнерах.

Большинство авторов работает в Лос Аламосской национальной лаборатории (Лос Аламос, Нью Мехико, США), но два соавтора (М.Макела и Дж. Блэнплед) - сотрудники университета Южной Каролины (Коламбия, Южная Каролина, США).

Статья получена редакцией 27 июня 2007 года и принята к опубликованию 17 марта 2008 года.

В статье использован доклад Лос Аламосской национальной лаборатории LA-UR-07-3100.

Работа частично была поддержана LORD, MA-22 of the DOE, DARPA, DNDO и Decision Sciences Corporation.

Взгляды и выводы, содержащиеся в материале, принадлежат авторам и не должны интерпретироваться как обязательно представляющие выраженную или подразумеваемую официальную политику спонсоров.

Почтовый адрес для корреспонденций: Chris Morris. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, Group P-25, Mailstop H846, NM 87544, USA.

Электронный адрес: <u>cmorris@pobox1663.lanl.gov</u>

Текущий адрес А.В.Клименко: Passport Systems, Inc., 15 Craig Road, Acton, MA 01720.

## введение

Одна из стратегий, делающая недоступным для террористов оружие массового уничтожения (ОМУ), заключается в контроле над ядерным материалом в месте нахождения. Дополнительное уменьшение риска можно получить увеличением вероятности детектирования незаконных перевозок этих материалов в контрольных пунктах, например, при пересечениях границы<sup>1</sup>. Таможенные агентства во всем мире начали использовать наборы радиационных детекторов и рентгеновских сканнеров для этих целей<sup>2</sup>. Но пассивный счет не обеспечивает надежное детектирование скрываемых специальных ядерных материалов (СЯМ), поскольку все сигналы могут быть подавлены использованием относительно небольшого количества веществ с высоким атомным номером (Z), например, свинец или вольфрам, в сочетании с водородосодержащим (полиэтилен) и поглощающим нейтроны (литий или бор) экранированием. Более сложная методика счета, например, отсчеты нейтронов и гамма-квантов, вылетающих в определенном направлении, в сочетании с лучшим разрешением по энергии, может улучшить чувствительность и ограничить некоторые возможности укрытия СЯМ. Впрочем, из-за практических ограничений на время счета и величины естественного фона хорошо защищенный материал может быть пронесен через наилучшие возможные пассивные системы.

Фотонная (рентгеновские и гамма-лучи) радиография обеспечивает метод изучения груза и перевозящих автомашин на наличие скрываемого материала. Пределы применения такой методики ограничены глубиной проникновения и фоном от рассеяния<sup>3</sup>. Новые машины со сканирующей фотонной радиографией в сочетании с нейтронным рассеянием и радиографией, а также с обратным рассеянием рентгеновских фотонов могут обеспечить подход к обнаружению экранированного СЯМ. Потенциальные дозы для пассажиров и операторов ограничивают такой вариант методики изучением всего лишь небольшой доли транспортного потока, пересекающего границу.

## МЮОННАЯ ТОМОГРАФИЯ

Здесь мы приведем результаты изучения новой методики, способной к пассивному детектированию СЯМ за короткое время при помощи многократного рассеяния мюонов космических лучей, используемых для радиографического зондирования<sup>4</sup>. Эта методика работает для материалов с большим Z (как для СЯМ, так и для экранирующих материалов).

Траектория заряженной частицы, пролетающей через любое вещество, является результатом наложения многих небольших отклонений, связанных с кулоновским рассеянием на заряженных атомных ядрах среды. Результирующее угловое и пространственное отклонение траектории очень чувствительно к заряду (Z) атомных ядер. Частицы высокой энергии более сильно реагируют на материалы, которые обеспечивают хорошее экранирование гамма-лучей, и на СЯМ, чем на материалы, которые используются с обычным грузом, например, на людей, бумагу, алюминий и сталь.

Земля непрерывно бомбардируется стабильными частицами с высокой энергией. Большей частью, это протоны, которые взаимодействуют в верхней атмосфере посредством ядерных сил и производят ливни частиц. Среди них много короткоживущих частиц, называемых "пионами ". Пионы распадаются, образуя мюоны. Мюоны взаимодействуют с веществом в основном посредством кулоновских сил и не обладают ядерным взаимодействием. Кулоновские силы уменьшают энергию мюонов гораздо медленнее, чем ядерные взаимодействия. Следовательно, многие из мюонов доходят до земной поверхности в виде проникающего, слабо взаимодействующего, заряженного излучения. Поток на уровне моря составляет около одного мюона на см<sup>2</sup> в минуту в диапазоне энергий и углов, удобном для томографии<sup>5</sup>.

Обычная радиография обладает преимуществом поглощения проникающего излучения. Для рентгеновской радиографии поверхностная плотность объекта, видимого пикселем изображения, определяется поглощением или рассеянием падающего пучка: N = N<sub>0</sub>exp(-L/L<sub>0</sub>)<sup>7</sup>, где L – длина пробега (поверхностная плотность) сквозь объект, а L<sub>0</sub> – средняя свободная длина на рассеяние или поглощение. Точность радиографических измерений ограничена пуассоновской статистикой счета прошедшего потока,  $\Delta L/L_0 = N^{-1/2}$ . Максимальная длина свободного пробега равна примерно 25 г/см<sup>2</sup> для всех материалов при этой энергии. Проникновение на глубину в десятки L<sub>0</sub> потребует очень больших падающих доз.

Альтернативой сигналу поглощения служит сигнал многократного кулоновского рассеяния<sup>8,9</sup>. Множество небольших взаимодействий добавляет в результате угловое отклонение, которое в хорошем приближении следует гауссову распределению: $dN/d\theta_{x \tau} = (2\pi)^{-1/2} \exp(-\theta_x^2 / 2\theta_0^2)^{10}$ . Ширина распределения связана с рассеивающим материалом:  $\theta_0 = 14/p\beta(L/X)^{1/2}$ , где р – импульс частицы,  $\beta$  – скорость, деленная на скорость света, а X – радиационная длина. Мы отбросили логарифмические члены с величиной порядка 10%. Мюоны с энергией 3 ГэВ, пролетая слой вещества толщиной 10 см, рассеиваются на средний угол 2.3 мрад в воде (X = 36 см), на 11 мрад в железе (X = 1.76 см) и на 20 мрад в вольфраме (X = 0.56 см). Если можно будет измерить угол рассеяния мезона в объекте исследования, а импульс мезона известен, то можно определить длину пробега  $\Delta I/I$  с точностью  $\Delta I/I = (2/N)^{1/2}$ , где N (число пролетевших мюонов) очень мало отличается от числа падающих. Таким образом, каждый пролетевший мюон дает информацию о толщине объекта.

Информацию об импульсе мюона можно получить без особого труда, измерив много-

кратное рассеяние в нескольких слоях рассеивающего объекта известной толщины. Такими объектами могут оказаться сами детекторы, если использовать несколько их слоев. Точность определения импульса примерно дается выражением  $\Delta p/p = (2N_p)^{-1/2}$ , где  $N_p -$ количество рассеивающих слоев (множитель 2 появляется потому, что координаты *x* и *y* измеряются независимо). Даже всего с двумя пластинами  $\Delta p/p = 0.5$ , что адекватно первому порядку коррекции импульса.

Поток мюонов через куб вещества с длиной ребра 10 см в течение 60 с достаточен для определения его толщины в радиационных единицах с точностью 14%. С такой статистикой кубик вольфрама можно отличить от стального кубика на уровне шести стандартных отклонений.

Мы продемонстрировали подходящую технику детекторов, дрейфовые трубки и разработали алгоритмы построения треков в эксперименте умеренного размера. Ниже мы сообщаем результаты этой работы. Кроме того, мы использовали компьютерную программу GEANT для подтверждения алгоритмов реконструкции треков и детектирования в интересах мюонной томографии для приложений к безопасности на границе.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ

Мы создали большой мюонный трекер (БМТ) - установку для регистрации треков мюонов, содержащую 12 слоев дрейфовых трубок диаметром 5 см и длиной 3.65 м каждая. Эти слои объединены в шесть наборов х- и у-детекторов, расположенных над и под рабочим объемом для образцов (по три набора с каждой стороны). Фотография БМТ приведена на рис.1. Полное описание аппаратуры дается в другой публикации.<sup>12</sup>



Рис.1: Экспериментальная аппаратура.

Сигналы от детекторов усиливались и дискриминировались на коммерческом компараторе, а затем проходили оцифровку на конверторе (CAEN 767B) и считывались на компьютер PC DAQ<sup>13</sup>. Детекторы измеряли положение с точностью около 400 мкм (полная ширина на половине максимума – ПШПМ), а точность определения угла составляла около 2 мрад ПШПМ. В эту точность входили приборные эффекты от множественного рассеяния в детекторах, собственное разрешение детектора и ошибки при выравнивании.

БМТ имеет ряд ограничений. Недавно был установлен более продвинутый трекер, фиксирующий начальное время и устраняющий необходимость в быстром триггере. Значительно увеличился телесный угол прибора. Но скорость счета примерно в четыре раза меньше того, что можно получить при окружении рабочего объема со всех сторон, поскольку в нынешней геометрии телесный угол составляет менее стерадиана.

Несмотря на ограничения, БМТ оказался важным испытательным устройством, который был использован для разработки нашей техники и алгоритмов, а также применялся для проверки модели космических лучей для моделирования методом Монте-Карло.

Два очень важных результата от работы с БМТ оказались разработка и демонстрация автоматической калибровки положения дрейфовых трубок и времени дрейфа для установки верхних трубок с помощью космических лучей, а также определитель начального времени, что устранило необходимость иметь быстрый триггер для получения информации о траектории.

Данные обрабатывались с помощью простой методики восстановления. Изучаемый объем (1.5 x 1.5 x 1.0 м<sup>3</sup>) разбивался на ячейки размером 2 x 2 x 2 см<sup>3</sup>. Половинный угол рассеяния подсчитывался для всех мюонов с траекториями входа и выхода, пересекающими ячейку в пределах устанавливаемого расстояния d. Это расстояние устанавливалось равным размеру вызывающего тревогу объекта (5 см) для представленных ниже управляющих характеристик оператора (УХО). Для получения снимка расстояние устанавливалось равным размеру ячейки. Из-за ограниченного телесного угла БМТ восстановление томографических картин страдает от значительных вертикальных пятен и шумов. По этой причине такие восстановления не применялись в этом исследовании.

Изучение того, насколько быстро может быть отождествлен несущий ядерную угрозу объект, проводилось, с использованием свинцового куба с ребром 10 см, который имитировал эту угрозу. Он был установлен внутри БМТ вместе с автомобильным мотором и системой передач Фотография установки представлена на Рис.2.



Рис.2: Фотография мотора в БМТ.

Примерно 160 минут информации было проанализировано для получения изображений, приведенных на Рис.3. Отложен средний угол рассеяния для всех траекторий, проходящих через каждую ячейку. Несмотря на простоту этого анализа, свинец выделяется заметно.

Мы разбили набор данных на отсчеты за одну, две и четыре минуты и проанализировали их независимо. Усредненная картина от длительного наблюдения только одной машины вычиталась из каждой картины, полученной при коротком сеансе наблюдений и максимальном размере ячейки 10 х 10 х 10 см<sup>3</sup>, а затем составлялась гистограмма всех сеансов со свинцом и без него. Эти гистограммы (пример приведен на Рис.4) применялись для вычисления кривой УХО, пример которой приведен на Рис.5.



Рис.3: Средний угол рассеяния для плоскости, отстоящей на 50 см выше основной плоскости. На левом снимке видна машина. на среднем – машина и образец свинца размером 10 х 10 х 10 см<sup>3</sup>. На правом снимке приведено различие между предыдущими изображениями.



Рис. 4: Голограммы максимального значения среднего угла рассеяния со средним объемом 10 х 10 х 10 см<sup>3</sup>, использованным для ячеек объемом 2 х 2 х 2 см<sup>3</sup>, при наборе из 40 четырехминутных построенных траекторий, когда в БМТ находятся машина и свинец. По оси Х отложены максимальные значения средних углов рассеяния (мрад), по оси Y – частота появления (в произвольных единицах). Пунктирная линия – машина и свинец, сплошная линия – только машина.

# ПАССИВНЫЙ СЧЕТ

В настоящее время портальные мониторы и другие радиационные детекторы разворачиваются во многих местах для обнаружения тайных перевозок ядерных материалов. Хотя такие детекторы достаточно эффективны для обнаружения излучения, безобидные сигналы от различных радиоактивных грузов делает их применение обременительным, а возможность экранирования ядерных материалов позволяет ввести поправку на неуспех таких детекторов в качестве сдерживающего элемента ядерной угрозы. Отсутствие радиационного сигнала не устраняет возможности ядерной угрозы.

Мюонная томография (МТ) обеспечивает метод, который эффективен при обнаружении материала с высоким Z (атомным номером) в объемах порядка литра. Такие же детекторы, которые применяются для обнаружения и определения траекторий мюонов, могут быть использованы для измерения излучения от ядерного устройства, а также отождествить наличие достаточного экранирования. чтобы укрыть ядерный сигнал.



Рис. 5: Кривые УХО для отождествления свинцового объекта, установленного в БМТ вместе с машиной. По оси X отложена вероятность фальшивого положительного сигнала, а по оси Y – вероятность обнаружения. Точечная линия соответствует длительности наблюдения 240 с, штрихованная линия – 120 с, а сплошная – 60 с.

Экранировка, которую обеспечивает нормальный груз, обладает тенденцией уменьшить фоновый счет в портальных мониторах до 10 раз, если груз присутствует Такое сокращение может замаскировать возрастание излучения. Это накладывает ограничение на то, насколько хорошо можно измерить излучение от груза. МТ предоставляет интегральное измерение груза, измеренное в единицах массы, выраженных в радиационной длине. Это может обеспечить хорошую оценку самопоглощения естественного фона, так что можно обнаруживать слабые сигналы.

Могут появиться и другие сигналы, характерные для материалов ядерного оружия, которые становятся возможными благодаря большому телесному углу и высокой эффективности мюонных детекторов. В добавление к сигналу от гамма- и рентгеновских лучей спонтанное деление урана-238 производит нейтроны. Большой телесный угол и значительное количество счетчиков, применяемых в НТ, должны обеспечить большой счет нейтронов, если добавить газ He<sup>3</sup> в дрейфовые трубки, а у стенок разместить некоторое количество замедлителя. Пять килограммов высоко обогащенного урана (ВОУ) испускают около 5 нейтронов в секунду от 8%-ного урана-238<sup>14</sup>. Отличительная особенность этих нейтронов в том, что они испускаются виде коррелированных вспышек со средней множественностью 2.1<sup>15</sup>. Эти нейтроны могут вызвать дальнейшие деления в окружающем материале, что увеличивает их множественность.

Эта множественность нейтронов, гамма лучи и томографические данные от сканнера МТ могут обеспечить высоко эффективный путь к обнаружению нескольких килограммов ВОУ, который рассматривается как самый угрожающий ядерный материал для находки. Конечно, более высокие количества отличаются по томографии, а также по своим нейтронным и гамма-сигналам.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Для исследования того, как хорошо работает методика для сложных объектов, мы при-

меняли моделирующий пакет программ методом Монте-Карло – GEANT<sup>11</sup>, чтобы генерировать мюоны космических лучей с соответствующим распределением по энергиям и углам и пропустить их через испытательный объем и определить положения и углы, при которых они будут зарегистрированы в четырехстороннем сканнере. Спектр мюонов, угловое распределение и частота появления соответствовали уровню моря. Мы исследовали набор сцен для угрожающего объекта в грузовой автомашине.

Генератор событий космических лучей, использованный при моделировании методом Монте-Карло, был проверен использованием данных, взятых от БМТ. Проверка включала коррекцию генератора для высоты Лос Аламоса над уровнем моря. Кроме того, распределение углов рассеивания было воспроизведено моделированием GEANT. Мы не использовали алгоритм трехмерного воспроизведения, описанный ниже вместе с данными БМТ, поскольку ограниченный телесный угол затруднял локализации точек рассеяния по вертикальной координате.

Мы промоделировали следующие сцены:

- 1. Простой фургон.
- Штабель фанеры размером 120 см х 240 см х 90 см<sup>3</sup>, обработанной бором, внутри которого может размещаться (или не размещен) представляющий интерес объект. Полный вес фанеры около 1800 кг.
- 3. Сварочный аппарат. Вставлены верхняя и нижняя стальные пластины толщиной около 16 мм, чтобы попытаться мистифицировать методику воспроизведения.
- 4. Ящик с беспорядочным содержимым. Бетонный порошок плотностью 0.5 г/см<sup>3</sup> заполняется случайно помещенными предметами, имеющими четыре формы: полусфера, прямоугольные блоки двух разных размеров и параллелепипед. Каждый отдельный элемент беспорядочной смеси случайным образом располагается, поворачивается и ориентируется по отношению к центру выбранного элемента. Материал каждого элемента случайно выбирается из следующего набора: пластик, стекло или сталь. Полный вес составляет в этом случае примерно 3200 кг.

Вид модели для каждой сцены приведен на Рис.6. Каждая сцена моделировалась с вольфрамовым кубом размером 10 см и без него. Вольфрам прятался где-нибудь в грузе. Пустой фургон моделировался с вольфрамом, помещенным под двигателем и над дифференциалом. Покрытая бором фанера была выбрана из-за того, что она создает значительное количество замедляющего материала, а бор быстро поглощает замедлившиеся нейтроны, так что он работает как экран против активного вмешательства. Фанера сама по себе увеличивает число делений при активном вмешательстве, поскольку сечения деления гораздо выше для медленных нейтронов, чем для быстрых. Сварочный аппарат при радиографии выглядит как обычный объект. Ящик с беспорядочным содержимым предназначен выглядеть как свалка различных отбросов. Специальный трехслойный контейнер является составным экраном, защищающим ядерный материал от пассивного счета материалами с промежуточными атомными номерами. Для восстановления этих сцен мы применяли томографический алгоритм, основанный на максимальном сходстве. Основы этого алгоритма были разработаны в 2003 году в диссертации<sup>16</sup>. Мы обеспечили быстрое и надежное осуществление такого подхода (MELM), результаты которого будут опубликованы<sup>17</sup>.





**Рис. 6**: Здесь приведены четыре моделированные варианта: а ) пачка фанеры, покрытой бором; б) ящик с отбросами; в) сварочный аппарат.

Восстановление трех вариантов груза и два дополнительных варианта пустого фургона, где представляющий угрозу объект расположен над дифференциалом и под двигателем, соответственно, как показано на рис.7. Природа каждой из этих сцен ясно видна на основе восстановления. Автоматическое отождествление угрожающего объекта с использованием простого порога плотности для объемов 1000 см<sup>3</sup> возможно для всех этих сцен.

Автоматическое отождествление угрожающего объекта исследовалось расчетом усредненной восстановленной плотностью рассеяния для всех возможных кубических объемов с ребром 10 см, составленных из ячеек размером 5 см. Максимальные величины этой величины для 100 моделирований и восстановлений, выполненных для каждой из пяти сцен, показанных выше, а также для пустых соответствующих случаев при экспозициях 15, 50 и 60 с, приведены на Рис. 8. По мере возрастания времени экспозиции угрожающие объекты становятся лучше выделенными на фоне безобидных вариантов груза.



**Рис. 7**: Восстановления после минутной экспозиции космическими лучами для каждой из сцен, рассмотренных ранее. Угрожающий объект указан стрелкой при каждом восстановлении.

Влияние неопределенности импульса было оценено добавлением гауссового распределения неопределенностей к точному значению импульса, а затем последующим восстановлением и вычислением графиков УХО. Время, требуемое для получения соответствующих УХО-кривых возрастает примерно на 50%, когда предполагается 50%- ное знание импульса (полученное от четырех оставшихся после вычитания измерений в следящих за траекторией детекторах), в не точное знание. Надежность метода среднего восстановления уменьшает статистическое воздействие неточного знания импульса.

Такие восстановления применяются для построения графиков УХО. Эти кривые показывают соотношения между скоростью ошибочных положительных отсчетов и скоростью отсчетов при обнаружении угрожающих объектов по мере того, как изменяется порог. УХОкривые указывают, что безвредные автомашины могут быть отождествлены за 15 с отсчетного времени. При 90 с отождествление становится очень хорошим.



**Рис. 8**: Гистограммы максимальной величины средней восстановленной плотности в различных сценах заполнения фургона, показных на Рис. 7. По оси Х отложен максимальный средний угол рассеяния (мрад). По оси У отложена частота появления (произвольные единицы). Точки соответствуют обнаружению угрозы, а сплошные кривые соответствуют "чистому" случаю, когда угрожающего объекта нет.

Анализ объекта, состоящего из нескольких слоев, и различия между УХО-кривыми, соответствующими помещению объекта под мотором и над дифференциалом, привели к улучшению методики регулировки восстановления. Мы нашли, что тщательная регулировка для более длительных экспозиций имеет тенденцию к ослаблению сигнала от угрожающих объектов, и расположены вблизи особенностей, например, двигателя, или внутри железного ящика многослойного объекта. При коротких экспозициях, регулировка важна для ослабления шумов в безобидных вариантах, чтобы уменьшить количество неопределенных ложных положительных результатов. Методика, использующая тщательную регулировку для коротких экспозиций и более слабую (или вообще никакой) в дальнейшее время, как оказалось, дает лучшие результаты, чем фиксированная регулировка. Использование такого метода приводит к УХО-кривым, показанным на Рис. 9.



Рис. 9: УХО – кривые с восемью ячейками для набора сцен, приведенного ранее. Эти кривые были получены на основе 1000 независимых моделирований в течение каждого из приведенного в перечне времени экспозиции.

Использование предварительного знания значительно ускоряет отождествление угрожающих объектов, Когда не предполагается предварительное знание и применяется 50%ное знание импульса, 90%- ное детектирование с нулевым значением ошибочного положительного сигнала в наборе данных для этих УХО- кривых требует примерно 60 с счетного времени. Когда применяется вычитание из сцен с грузом усредненное значение многих восстановлений картины пустого фургона за данное время, частота появления фальшивых положительных результатов при коротких временах сканирования значительно уменьшается. Развернутое устройство имело бы эквивалентную информацию относительно общих моделей автомашин в базе данных. Гистограммы максимальных восстановленных значений, полученных после вычитания трех стандартных отклонений (среднее значение восстановления фургона плюс утроенное стандартное отклонение набора статистически независимых восстановлений при данном времени сканирования вычитается от ячейки к ячейке) показаны на Рис.10, а УХО- кривые приведены на Рис.11. При указанной процедуре УХО- кривая для экспозиции 30 с кажется почти идеальной. Графики требуемых времен инспекции показаны на Рис. 12.

Штрихованные кривые соответствуют результатам, полученным при вычитании средних значений многих сцен с пустым фургоном при каждой прогонке до расчета УХО- кривых. Это уменьшает средний уровень сигнала от безобидных сцен и приводит к уменьшению примерно вдвое среднего времени сканирования. Наконец, кривая, составленная из точек и штрихов, была получена путем вычитания среднего сигнала и трех стандартных отклонений (трех о) из восстановления при каждой экспозиции. Это приводит к слишком большому вычитанию в областях с высокой плотностью, где статистические флуктуации делают более вероятными фальшивые положительные результаты. Такой метод снижает времена проверки еще вдвое. Больше работы требуется, чтобы оптимизировать времена проверки для этого последнего метода. Существует, несомненно, важная информация, которую можно получить, используя восстановления даже при более коротких временах проверки, нежели 15 с, проверенные в нашем случае.



**Рис. 10**: То же самое, что на Рис. 8, но здесь использовано предшествующее знание (смотрите текст). По оси X отложен максимальный средний угол рассеяния (мрад). По оси Y – частота появления (произвольные единицы). Точки относятся к обнаружению угрожающего объекта, а сплошные линии – к сигналам от пустого фургона.

#### ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ

Рис.13 иллюстрирует, как эта идея может быть реализована при пересечении границы, Стенки сканирующего устройства состоят из 12 слоев позиционно чувствительных отпаянных дрейфовых трубок. Два слоя, смещенные на радиус трубки, применяются для каждого измерения координаты. Три измерения делаются в каждой из двух ортогональных плоскостей для траектории входа и то же самое для траектории выхода. Это обеспечивает значительный запас информации, чтобы быть уверенным в надежности полученного трека частицы, а также иметь возможность воспользоваться траекторными данными для оценки импульса. Скорость одиночных отсчетов во всех трубках может постоянно отслеживаться, чтобы обеспечить мониторинг гамма-лучей. Внутренние трубки можно наполнять газовой смесью, содержащей гелий-3, для обеспечения нейтронного мониторинга. В этом случае сигналы от нейтронов можно отделить от сигналов, вызываемых гамма-лучами, по их отличительной высоте импульса и его форме.



**Рис. 11**: То же, что на Рис. 9, но здесь использовано предшествующее знание. По оси X отложена вероятность фальшивого положительного сигнала, а по оси Y – вероятность обнаружения истинного сигнала.



**Рис. 12**: Сравнение средних времен проверки без использования предшествующего знания (сплошная кривая), с простым вычитанием (штрихованная кривая) и с вычитанием 3 о (штрих-пунктирная кривая) для смеси сцен, описанных ранее. По оси X отложена вероятность обнаружения угрозы (%), а по оси Y.- среднее время поиска угрозы (с).



**Рис. 13**: Схематическое представление, как может выглядеть считающая станция. Автомашины могут останавливаться в зоне, окруженной считающей станцией, примерно на 20 с.

## оценки стоимости

Оценки затрат на создание подобной станции грубо можно оценить, используя оценки, основанные на постройку детекторов с большой площадью для физики высоких энергий. Элемент детектора может состоять из алюминиевой трубки диаметром 5 см с проволокой диаметром 20 мкм, натянутой по ее оси. Доминирующие затраты на подобные детекторы связаны со считыванием и механикой в областях вблизи концов трубок. Мы оцениваем, что расходы на простое измерение координат составят около 200 долларов/см, включая обе плоскости, требуемые для полного восстановления информации о времени дрейфа. Стоимость шести плоскостей, необходимых для измерения входящей и исходящей траекторий для проверочной станции, рассчитанной на автомашину (4 х 4 х 5 м<sup>3</sup>) составит около 3 миллионов долларов.

Имеются несколько различий между этим приложением и физическим экспериментом. Скорость счета космических лучей низка по сравнению с большинством экспериментов по физике высоких энергий. Следовательно, разумно можно ожидать длительные (десятилетия) времена жизни счетчиков. С другой стороны, та крупная и недорогая рабочая сила, которая требуется для обслуживания детекторов высоких энергий, не будет требоваться на пограничных пунктах. Детекторы потребуют мало обслуживания. Мы предусматриваем отпайку детекторов. чтобы устранить пропускание газа и уход за газовой системой.

Электроника должна быть простой и надежной, а также применять легко доступные коммерческие сопряжения с компьютерами типа USB (универсальная последовательная шина). Мы продемонстрировали, что запаянные дрейфовые трубки могут удовлетворять потребностям детектора.

Эта методика позволяет исследование каждой автомашины и контейнера с грузом, пересекающих границу США (или другой страны). Все, что необходимо, - это иметь достаточно детекторов на пересечении с границей, чтобы справиться с движением. По статистике, набранной Министерством транспорта США за 2000 год, полное количество персональных автомашин, пересекших границу США с Мексикой и Канадой, составило 130 миллионов. Если одна установка мюонной томографии сможет проанализировать автомашину за минуту или скорее на обсчет и обработку данных, работая 12 часов в день, то всего 500 установок окажется необходимым, чтобы справиться со всей нагрузкой от пересекающих границу личных автомашин. Полные затраты в 1.5-2 миллиардов долларов пренебрежимо малы по сравнению с экономическими последствиями взрыва ядерного устройства в пределах США. Время

в очередях и флуктуации темпов движения могут потребовать увеличить приведенную оценку в четыре раза. Усилия такого же размера окажутся необходимыми, чтобы справиться с пересекающими границу коммерческими грузовиками и движением грузового транспорта в морских портах.

Такая же методика может быть использована для изучения груза в грузовиках и на контейнеровозах. Длительное время нахождения груза в корабле при морских перевозках предлагает свою возможность. Вместе с обычным грузом в трюм корабля можно поместить контейнеры, содержащие позиционно чувствительные детекторы. Радиография может быть проведена на основе совпадений показаний этих контейнеров-мониторов, чтобы проверить грузы на корабле. Хотя такая методика не способна дать 100%-ное покрытие, она может иметь преимущество просмотра части груза на корабле.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассказали о методике проведения радиографии больших объектов космическими лучами. Эта методика, в частности, чувствительна к плотным материалам, имеющим большое значение Z. Мы выполнили значительное количество экспериментального (БМТ) и теоретического (GEANT/MLEM) анализа по автоматической идентификации угрожающих ядерных объектов литрового объема в сложной фоновой обстановке. Мы продемонстрировали времена детектирования порядка 4 минут для получения данных в эксперименте. Мы ожидаем, что время сканирования уменьшится примерно в десять раз после того, как будет осуществлено сканирование в полном телесном угле и улучшится оценка импульса - улучшение импульса даст двойку, а телесный угол – пятерку.

Мы оценили также время, требуемое в более крупных и более сложных конфигурациях при использовании моделирования (GEANT) и восстановления (MLEM). При этом предполагаются полный телесный угол, 50%-ное знание импульса и преимущество полного восстановления трехмерной плотности, что уменьшает уровни шумов. Продемонстрировано, что при использовании предварительного знания время сканирования 17 с обеспечивает более 90% доверительного отождествления литрового объема материала с высоким значением Z, где скорость счета фальшивых положительных сигналов составляет менее 0.2% в рассмотренных конфигурациях.

Возможно, что нарушитель будет стремиться пронести контрабандой через границу компоненты бомбы в меньших упаковках, нежели литровых, которые соответствуют массе около 20 кг, что рассматривалось нами, или в материалах меньшей плотности. И конечно, он попытается вообще избежать любого проверяемого места границы. Такие возможности придется рассматривать при любых полных оценках нашей концепции мюонного изображения вместе с другими технологиями детектирования.

При работе разумно ожидать времени сканирования 15 с для занятых пассажирских автомашин. Мы не изучали грузовые контейнеры при помощи нашей новой, более чувствительной методики. Наша предыдущая работа полагает, что времена сканирования менее 60 с выполнимы для сложной смеси грузов в контейнерах, заполненных до предельного веса. С учетом MLEM существует любая причина ожидать, что эти времена будут короче, но 60 с служат консервативной оценкой для времени сканирования грузового контейнера. Грубая оценка стоимости по порядку величины возможности исследовать каждую пассажирскую автомашину (менее миллиарда долларов) показывает, что методика экономически жизнеспособна.

Мы представили также результаты ряда исследований, где были использованы отпаянные дрейфовые трубки, чтобы определить возможность измерения сигналов гамма-лучей от ядерных угрожающих объектов. Полный МТ сканнер должен обеспечить эффективность счета гамма-лучей около 10 % в широком диапазоне энергий. Хотя это не обсуждалось в статье, источники нейтронов и гамма-лучей в объеме груза могут быть локализованы с использованием зависимости сигнала от положения источника. Еще один вывод заключается в том, что устройства для распыления радиоактивного материала требует достаточно много такого материала, так что экранирование делает такой источник хорошо заметным на изображении МТ.

## ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. F. Calogero, "Nuclear Terrorism," Выступление на Симпозиуме в честь столетия Нобелевской премии мира. "The Conflicts on the 20<sup>th</sup> Century and Solutions for the 21th *Century," Шестая сессия, "Militarism and Arms Races - Strengthen Arms Control and Disarmament" (Oslo, Norway, December 6-8, 2001).* 

2. E.R. Siciliano, J.H. Ely, R.T. Kouzes, B.D. Milbrath, J.E. Schweppe, and D.C. Stromswold, 'Comparison of PVT and NaI(TI) Scintillators for Vehicle Portal Monitor Applications," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 550 (2005), 3, 647-674.* 

3. Дж. Катц, Дж.С. Бленпид, К.Н. Бороздин и К.Л. Моррис, "Рентгеновская радиография грузовых контейнеров, "Наука и всеобщая безопасность", 15 (1), 22-25, (2007).

4. K.N. Borozdin, G.E. Hogan, C.L. Morris, W.C. Priedhorssky, A. Saunders, L.J. Shultz, and M.E. Teasdate, "Radiographic Imaging with Natural Muons," *Nature*, 422 (2003), 277.

5. Particle Data Group. "Review of Particle Physics", Physics Letters, B592 (2004), 1.

6. W. Roentgen, "On a New Kind of Rays," Nature, 53 (1896), 274.

7. A. Beer, Ann. Physik Chem., 86 (1852), 78.

8. N. King, E. Able, K. Adams, K.H. Alrick, J.F. Amman, S. Balzar, et al., "An 800 MeV Proton Radiography Facility for Dynamic Experiments," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 434 (1999), 84-91.

9. C. Morris, J.W. Hopson, and P. Goldstone, "Proton Radiography," *Los Alamos Science*, 30 (2006), 32-44.

10. B. Rossi, High-Energy Particles (Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, Inc., 1952).

11. S. Agostinelliae, J. Allison, K. Amakoe, J. Apostolakisa et al, "Geant4 - A Simulation Toolkit," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 506 (2003), 250-303; "GEANT4 Developments and Applications," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 53 (2006), 270-278.

12. A, Green, C. Alexander, T. Asaki, J. Bacon, C. Blanpied, K. Borozdin et al, "Optimizing the Tracking Efficiency for Cosmic Ray MUon Tomography," *2006 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record* (San Diego, CA, 2006).

13. C.E. Hogan, "PC DAQ, a Personal Computer Based Data Acquisition System," Los Alamos National Laboratory Report LAUR-98-4531 (1998).

14. С. Феттер, В.А. Фролов, М. Миллер, К. Мозли. О.Ф. Прилуцкий, С. Родионов и Р.З. Сагдеев, "Детектирование ядерных боеголовок," *Наука и всеобщая безопасность*, 1(3), 3-21, (1990).

15. K.J. Shultis and R.E. Faw, *Fundamentals of Nuclear Science and Engineering* (Roca Baton, FL, CRC Press, 2002).

16. L.J. Schultz, *Cosmic Ray Muon Tomography*, Ph.D. dissertation (Portland, OR: Portland State University, 2003).

17. L.J. Schultz, G.S. Blanpied, K.N. Borozdin, A.M. Fraser, N.W. Hengartner, A.V. Klimenko, C.L. Morris, C. Orum, and M.J. Sossong, "Statistical Reconstruction for Cosmic Ray Muon Tomography," *IEEE Transactions on Image Processing*, принято к публикации (2007).

18. Бюро транспортной статистики, специальная публикация, основанная на следующем источнике первичных данных: U.S. Department of Treasury, U.S. Custom Service, Office of Field Operations, Operations Management Database (Washington, DC: 2000), http://www.bts.gov/