

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.3

УСТАНОВКА “МЮОННЫЙ ТОМОГРАФ”
С ПЛОЩАДЬЮ ПЕРЕКРЫТИЯ $3 \times 3 \text{ м}^2$

© 2012 г. А. А. Борисов, М. Ю. Боголюбский, Н. И. Божко, А. Н. Исаев, А. С. Кожин,
А. В. Козелов, И. С. Плотников, В. А. Сенько, М. М. Солдатов, Р. М. Фахрутдинов,
Н. А. Шаланда, О. П. Ющенко, В. И. Якимчук

ГНЦ РФ “Институт физики высоких энергий”
Россия, 142281, Протвино Московской обл., ул. Победы, 1
Поступила в редакцию 17.05.2011 г.

Описана установка “мюонный томограф” с площадью перекрытия $3 \times 3 \text{ м}^2$, предназначенная для изучения возможностей обнаружения скрытых объектов различной плотности с помощью космических мюонов. Приведены ее основные технические характеристики.

ВВЕДЕНИЕ

Каждую минуту горизонтально лежащую на поверхности Земли площадку $1 \times 1 \text{ см}^2$ пересекает 1 мюон космического происхождения. Поток этих мюонов практически равномерный, с незначительной зависимостью от географической широты и небольшими сезонными вариациями. Их средняя энергия составляет $\sim 4 \text{ ГэВ}$ с максимумом спектра $\sim 2 \text{ ГэВ}$. Угловое распределение пропорционально $\cos^2\theta$, где θ – зенитный угол.

Большая проникающая способность ($\sim 1.8 \text{ м}$ стали при импульсе $3 \text{ ГэВ}/c$) космических мюонов позволяет использовать их в качестве источника для радиографии¹ крупномасштабных объектов, а угловое распределение космических мюонов на поверхности Земли дает возможность осуществлять и томографию².

Одна из первых попыток [1] такой радиографии датируется 1955 г., когда при помощи счетчиков измерялось ослабление вертикального потока космических мюонов с целью проверки толщины пород над горной выработкой. В 1965 г. Л. Альварец предложил [2] исследовать внутреннюю структуру (поиск неизвестных погребальных камер) пирамиды Хефрена в Гизе путем измерения потока космических мюонов, проходящих под разными углами через пирамиду. В качестве детекторов использовались искровые камеры (4 м^2 , угловое разрешение $\sim 3^\circ$). И хотя скрытых полостей в пирамиде не обнаружили [3], была экспе-

риментально подтверждена возможность использования данного метода для исследования крупномасштабных объектов.

За прошедшие десятилетия накоплен богатый опыт применения космических мюонов для радиографии археологических [4–6], геологических [7–9] (в частности, канала магмы действующего вулкана) объектов, отмечены перспективы контроля строительных сооружений [10–12]. Приведенный список работ ни в коей мере не претендует на полноту и представлен только для иллюстрации многообразия возможностей радиографии с помощью космических мюонов.

Следует отметить, что большинство упомянутых выше применений космических мюонов для радиографии основывались на измерении поглощения (ослабления) потока. Интерес к этой теме заметно вырос после 2003 г., когда группа из Лос-Аламоса продемонстрировала [13] томографические изображения объектов из материалов с большим зарядом ядра, полученные на основе эффекта многократного кулоновского рассеяния космических мюонов, и отметила перспективность такого метода для контроля над несанкционированным перемещением ядерно-активных материалов. Метод базируется на том, что среднеквадратичный угол рассеяния мюонов после прохождения слоя материала зависит от радиационной длины этого материала (рис. 1).

Послойное сканирование (томография) позволяет не только зарегистрировать наличие в исследуемом объеме материалов с большим Z , но и провести их классификацию по группам: 1 – C, Al, SiO₂; 2 – Fe, Ni, Cu; 3 – Pb, W, U.

Принципиальная схема томографии с космическими мюонами приведена на рис. 2. Схема содержит два позиционно-чувствительных детектора, в пространстве между которыми (назовем его контролируемым объемом) может находиться ис-

¹ Радиография – неразрушающий метод контроля, основанный на “просвечивании” объекта ионизирующим (иногда и нейтронным) излучением и регистрации прошедшего через объект этого излучения.

² Томография – метод радиографии, позволяющий реконструировать послойную структуру объекта посредством его многократного просвечивания в пересекающихся направлениях.

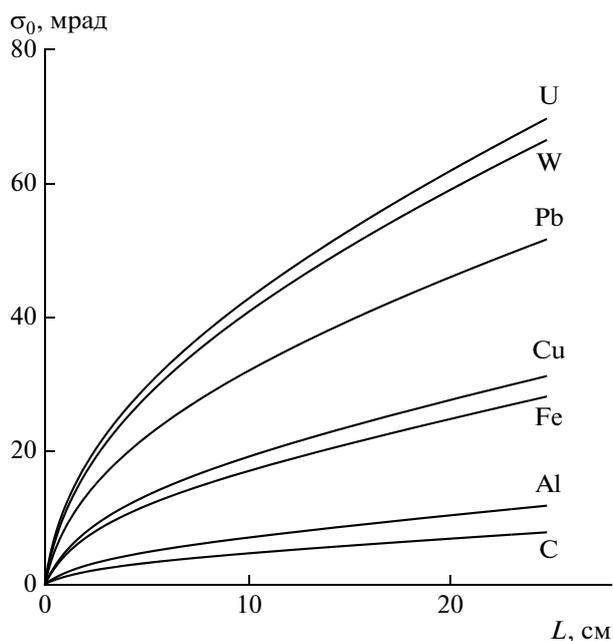


Рис. 1. Зависимости среднеквадратичного отклонения угла рассеяния мюона с импульсом 2 ГэВ/с от толщины различных материалов.

пытуемый предмет. Координатные детекторы обеспечивают измерение треков мюонов до и после контролируемого объема. Проведя статистический анализ некоторого числа треков, можно выделить в этом объеме области с аномальным рассеянием пересекающих их мюонов.

После первых экспериментальных подтверждений [13] возможности получения томографического изображения объектов из материалов с большим Z путем измерения рассеяния космических мюонов появились и другие работы [14–16]. Самая масштабная [16] выполнена в Италии (INFN) — создан мюонный томограф с рабочим объемом 11.5 м³ на основе мюонных камер CMS (на LHC). Количество работ, посвященных моделированию этого метода применительно к разным координатным детекторам, разработке алгоритмов обработки изображений с таких установок и стратегии их применения, исчисляется уже десятками.

Перспективность метода и определенный интерес к его практической реализации, а также накопленный в ИФВЭ опыт по созданию больших координатных детекторов (дрейфовых камер) послужили поводом для создания крупномасштабной установки (с рабочим объемом 3 × 3 × 3 м³) для исследования возможностей томографии объектов с помощью космических мюонов. В данной работе приведено техническое описание разработанной установки.

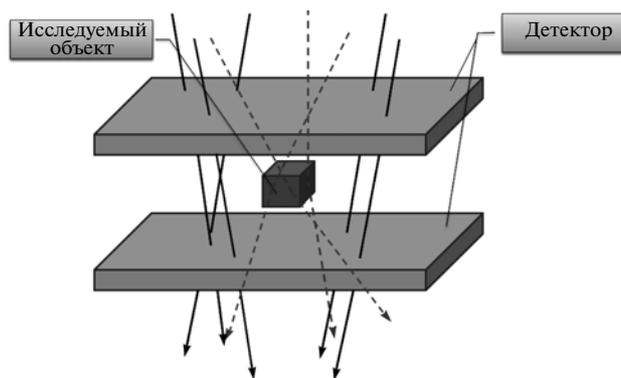


Рис. 2. Схема мюонного томографа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Созданный в ГНЦ ИФВЭ мюонный томограф (далее томограф) (рис. 3, 4) состоит из 16-ти идентичных однопроекционных дрейфовых камер площадью 3 × 1.5 м² каждая. Камеры попарно состыкованы (без зазора), образуя 8 плоскостей площадью 3 × 3 м². Эти координатные плоскости разделены на 2 блока — верхний и нижний, по 4 плоскости в каждом блоке с чередующейся измеряемой проекцией трека (X, Y, X, Y , см. рис. 3). Камеры смонтированы в каркасе из стального швеллера, предусмотрена возможность их юстировки. В горизонтальной плоскости камеры выставлены по уровню с разрешением 50 мкм/м, относительное смещение одноименных проекций ≤ 100 мкм. В промежутке между двумя блоками камер (~2.2 м по высоте) размещаются тестовые предметы, их перемещение осуществляется при помощи платформы с электроприводом, установленной на специальные направляющие. Грузоподъемность платформы до 1000 кг.

Каждая камера состоит из 144 дрейфовых трубок, склеенных в 3 ряда, по 48 трубок в ряд. Средний ряд смещен (см. рис. 4) на половину диаметра трубки. Расстояние между центрами любых двух соседних трубок в камере (а также в плоскости) составляет 30.035 мм. Дрейфовая трубка представляет собой тонкостенный алюминиевый цилиндр длиной 3 м, диаметром 30 мм и толщиной стенки 0.4 мм. С двух сторон трубка закрыта пробками, между которыми натянута сигнальная проволока (97%W + 3%Re, диаметр 0.05 мм, натяжение 350 г). Более подробно с конструкцией трубки можно ознакомиться в работе [17], а технология склейки дрейфовых камер описана в [18]. Дрейфовая трубка заполняется газовой смесью ³Ar/CO₂ = 93/7 под избыточным давлением порядка 0.1 атм.

³ Камеры могут работать с любой газовой смесью при рабочем напряжении ≤ 3 кВ.



Рис. 3. Мюонный томограф.

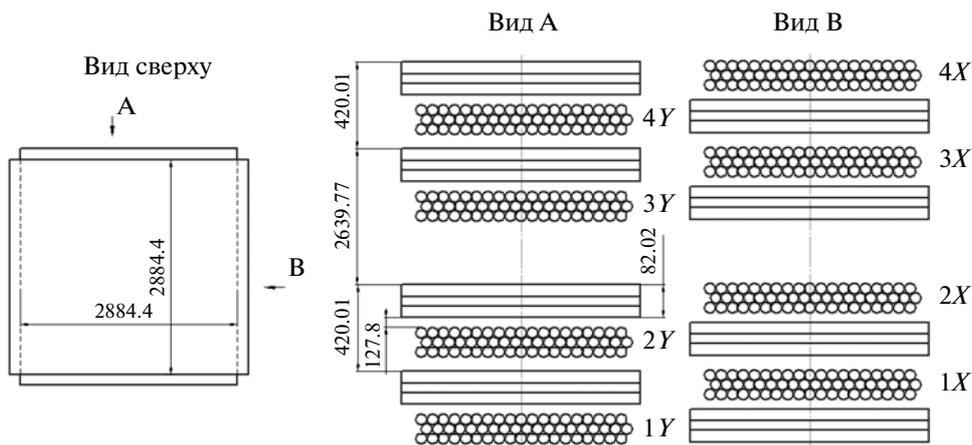


Рис. 4. Схема расположения камер в томографе.

Применение дрейфовых камер в томографе имеет две особенности, которые редко встречаются в экспериментальных установках физики высоких энергий. Во-первых, отсутствуют “быстрые” детекторы, определяющие момент прохож-

дения частицы через дрейфовые камеры. Дрейфовые камеры и их электронная аппаратура работают в так называемой “бестриггерной” моде. Во-вторых, предусмотрена работа дрейфовых камер без постоянного продува газовой смесью. Одна-

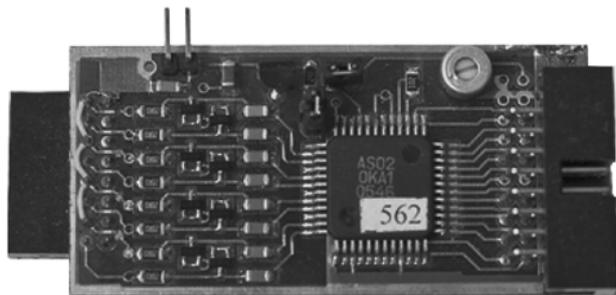


Рис. 5. Плата с усилителем на 8 каналов.

жды заполненные камеры работают без смены газа длительный (~1 год) период. Естественно, традиционная система постоянного продува газовой смесью также предусмотрена.

УСИЛИТЕЛЬ UDTR-8

Для усиления сигналов с дрейфовых трубок используется 8-канальный усилитель (рис. 5), изготовленный на базе интегральной схемы «ОКА-1М» [19, 20]. Микросхема разработана с использованием сверхвысокочастотной малошумящей V_i -jFET технологии, позволяющей производить $n-p-n$ -транзисторы с граничной частотой >3 ГГц. Интегральные схемы были изготовлены в пластмассовом QFP48 и керамическом H16.48-1в корпусах.

Интегральная схема «ОКА-1М» включает в себя 8 каналов зарядочувствительных усилителей-формирователей-дискриминаторов. Обработка сигнала заключается в преобразовании короткого токового импульса в напряжение и регистрации превышения сигналом заданного порога.

Регулировка порога чувствительности каналов по входному сигналу осуществляется многооборотным переменным резистором сразу во всех 8 каналах. Напряжение порога 100–800 мВ подается на 30-й вывод микросхемы (на 12-й вывод в керамическом корпусе). Чувствительность усилителя регулируется от 0.2 до 1.3 мкА. При пороговом напряжении 400–450 мВ устанавливается чувствительность усилителя ~1 мкА.

Выходные сигналы соответствуют стандарту LVDS. Каждая выходная пара терминируется резистором 110 Ом на входе приемника. Питание усилителя осуществляется от источника 6 В (50 мА).

Для подсоединения усилителей к детектору разработана печатная плата Signal board 3×8 , внешний вид которой представлен на рис. 6. Эта плата позволяет подключать к детектору 3 усилителя, т.е. снимать информацию с 24 сигнальных проводочек. Для уменьшения помех, поступающих на входы усилителей, плата изготовлена 4-слойной, со сплошными внешними земляными слоями.

Для подачи высокого напряжения на дрейфовые трубки разработана печатная плата HV board 3×8 (рис. 7). Обе платы покрыты защитным покрытием «Пластик 70».

ЭЛЕКТРОНИКА СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ МЮОННОГО ТОМОГРАФА

Электроника системы сбора данных мюонного томографа реализована в стандарте VME-9U [21] с использованием:

- одноплатного VME-компьютера;
- 18-ти 128-канальных модулей регистрации V-12;

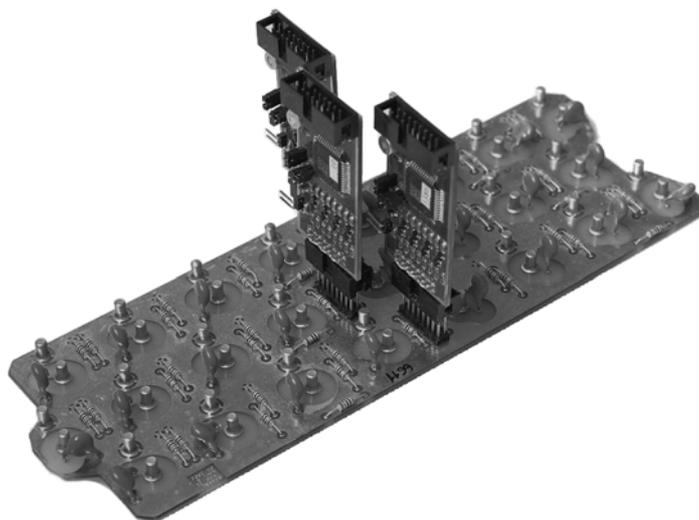


Рис. 6. Переходная плата в сборке с тремя платами 8-канальных усилителей.



Рис. 7. Высоковольтная плата 3 × 8.

– модуля V-13, используемого для выработки управляющих сигналов по команде от э.в.м.

В системе сбора данных также используются вспомогательные модули разветвителей логических сигналов и преобразователей уровня.

Одноплатный компьютер

Основные характеристики э.в.м.:

| | |
|---------------------------------------|--------------------------|
| – процессор | Intel Pentium M 1.4 ГГц; |
| – оперативное запоминающее устройство | 1 Гбайт; |
| – сетевые интерфейсы | 2 Гбит Ethernet; |
| – жесткий диск | 80 Гбайт; |
| – VME интерфейс | Tundra Universe II. |

Модуль V-12

Модуль V-12 (рис. 8) имеет 128 каналов время-цифрового преобразователя (в.ц.п.), работающих с общим стартом. Все измеряемые сигналы поступают через входные разъемы на передней панели в уровнях LVDS. Время прихода входного сигнала измеряется с дискретностью 1 нс в диапазоне до 16 мс. Возможен прием до 1023 хитов на 32 канала каждого разъема. Прием второго сигнала в том же канале разрешен не ранее чем через 750–1000 нс. Возможен непрерывный прием данных без остановки на вычитывание.

Регистр является модулем VME типа A32/A24/D32, т.е. использует 32- или 24-разрядное адресное поле и 32-разрядную шину данных. Блок регистрации состоит из пяти частей (рис. 9): четырех одинаковых 32-канальных узлов регистрации поступающей от детектора информации и узла управления. Узлы регистрации обеспечивают прием, обработку, временное хранение и передачу данных в узел управления, а узел управления – вза-

имодействие блока с магистралью VME при выполнении операций чтения/записи.

Узел регистрации (рис. 10) осуществляет прием входной информации, ее оцифровку и занесение в буфер памяти типа FIFO. Регистрация входных сигналов разрешается внешним сигналом *Enable*.

Время приема данных (временное окно) определяется внешним сигналом *FIX*, который вырабатывается управляющей программой с интервалом ~10 мс, но не более ~16 мс, чтобы счетчик Time Counter не переполнился. По сигналу *FIX* цифровой код этого времени переписывается в специальный *FIX*-регистр с одновременным обнулением “счетчика времени” без остановки счета, так что возможна сшивка данных за любой промежуток времени. В то же время происходит фиксация части уже записанного объема данных в FIFO, которая вычитывается для дальнейшей обработки. При работе с томографом буфер памяти FIFO канала заполняется на 10%. Время обработки одного канала составляет 232 нс.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Программное обеспечение мюонного томографа можно разделить на две составные части: систему сбора данных и систему обработки данных.

Система сбора данных

Программное обеспечение системы написано на языке C++ и выполняется под управлением операционной системы Linux. Для работы с VME используется библиотека VMELinux [22], для визуализации данных – графическая библиотека ROOT.

Программа выполняет следующие функции:

– конфигурирование системы (задание номеров модулей в.ц.п. и, тем самым, соответствие

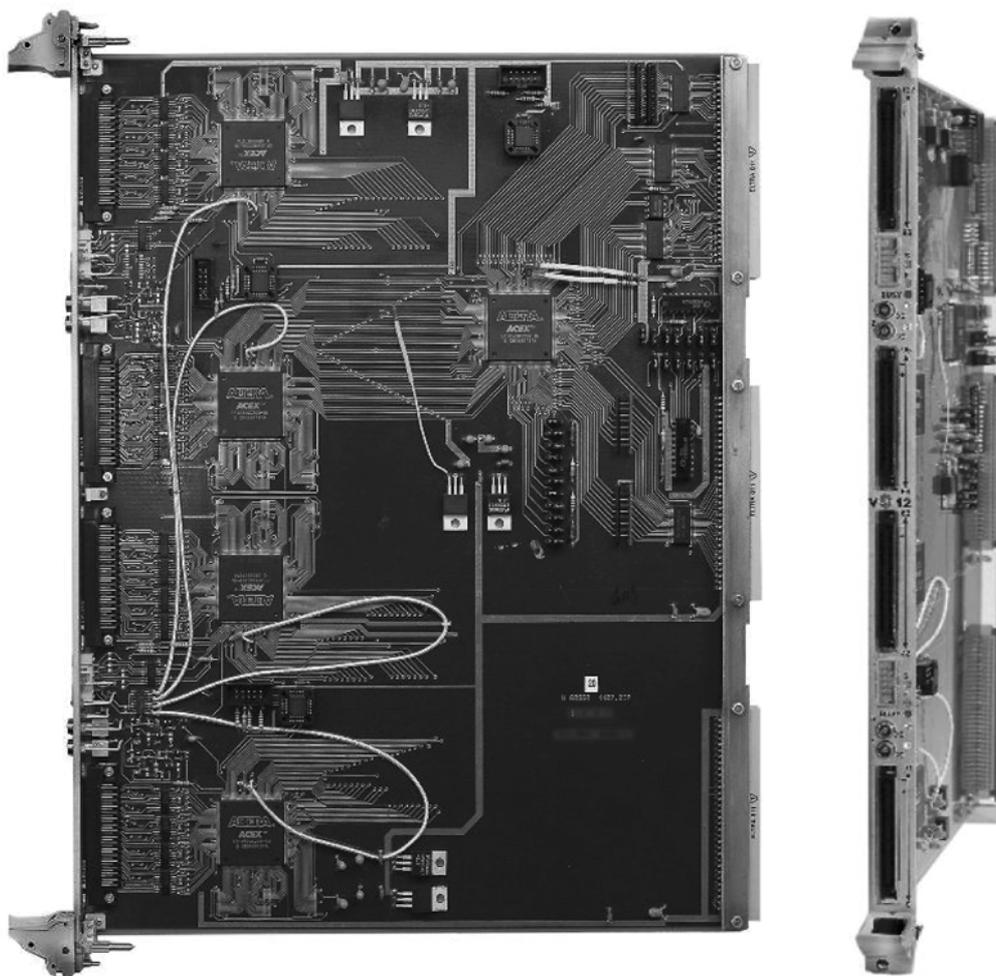


Рис. 8. Фотография модуля V-12 (слева) и его передней панели (справа).

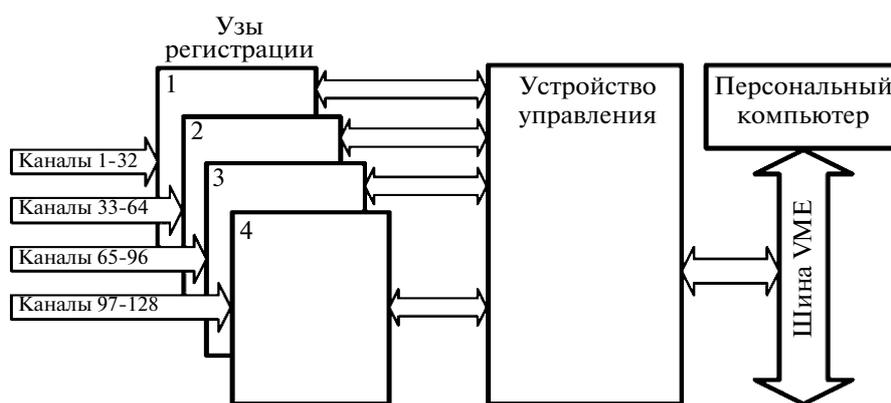


Рис. 9. Структурная схема модуля V-12.

адресов VME-каналам детектора, длительности и количества временных окон);

– инициализацию системы сбора данных с последующей проверкой состояния модулей;

– чтение данных из модулей в.ц.п. в оперативную память э.в.м. с проверкой на наличие ошибок чтения;

– преобразование данных в формат, более удобный для последующей обработки;

– запись информации на локальный жесткий диск;

– управление источником высокого напряжения БПВ-5;



Рис. 10. Структурная схема одного узла регистрации модуля V-12.

– визуализацию данных для оперативного контроля над работой установки;

– выдачу списков “мертвых” и “горячих” (часто срабатывающих) каналов по команде оператора;

– при подключении управляемой задержки и тестового сигнала – автоматизированное сканирование по задержке этого сигнала.

“Мертвое” время системы при длительности временного окна 10 мс, средней частоте срабатывания одной трубки 40 Гц, записи информации на локальный жесткий диск и частичной ее визуализации (обработывается 2% данных) составляет 13.6%.

В дальнейшем предусмотрен отказ от записи данных на локальный жесткий диск и переход к передаче информации по сети Ethernet для обработки в режиме реального времени на другом компьютере.

Система обработки данных

Программное обеспечение состоит из следующих основных компонент: системы реконструкции треков и вершин; системы автокалибровки детектора; системы визуализации и анализа изображений.

Программное обеспечение системы обработки данных создано в объектно-ориентированной архитектуре на языке C++.

Существенной особенностью мюонного томографа является его работа в бестриггерном режиме, что предъявляет особые требования к функции автокалибровки и реконструкции.

Детальному описанию алгоритмов реконструкции и анализа будет посвящен отдельный препринт, поэтому здесь мы приведем лишь весьма общую схему используемых процедур.

Реконструкция треков и вершин. Событие в бестриггерном режиме представляет собой набор сигналов с детектора, зарегистрированных в тече-

ние временного интервала (10 мс), намного превышающего типичное время дрейфа в трубках (~500 нс), что предполагает возможность наличия нескольких мюонных треков в одном событии.

Процедура реконструкции начинается с кластеризации события. Кластеры строятся из хитов, разделенных временными интервалами, не превышающими времени дрейфа. Такие группы хитов образуют временные окна, которые могут соответствовать физическому треку.

Кластеры строятся по иерархическому алгоритму с использованием анализа на непротиворечивость (геометрическое расположение хитов в кластере должно соответствовать прямым отрезкам трека в верхней и нижней частях томографа, как изображено на рис. 11 – реконструкция реального трека) и конкурентного разрешения возможных неоднозначностей с ассоциацией хитов. Кластеры, прошедшие процедуру отбора, формируют набор заготовок треков.

Каждый трек представляет собой 4 сегмента, по два (XY- и ZY-проекции) в верхней и нижней частях томографа. Используется линейная модель проекций трека, реализованная в параметрической форме: $sX + cY = D$, где $s^2 + c^2 = 1$. Данное представление позволяет линейным образом вычислять расстояние от прямой до произвольной точки (в нашем случае – расстояние от прямой до проволоки, которое должно сравниваться в процедуре минимизации с расстоянием, полученным из зависимости $R(t)$ (R – радиус трубки, из которых делаются дрейфовые камеры для томографа)). Таким образом, трек полностью характеризуется заданием восьми параметров ($s_i, D_i, i = 1-4$) и единого параметра T_0 – времени прохождения мюона через детектор.

Итерационная, квазианалитическая (вычисление вектора первых и матрицы вторых производных) процедура фита дополнена алгоритмом конкурентной выбраковки хитов.

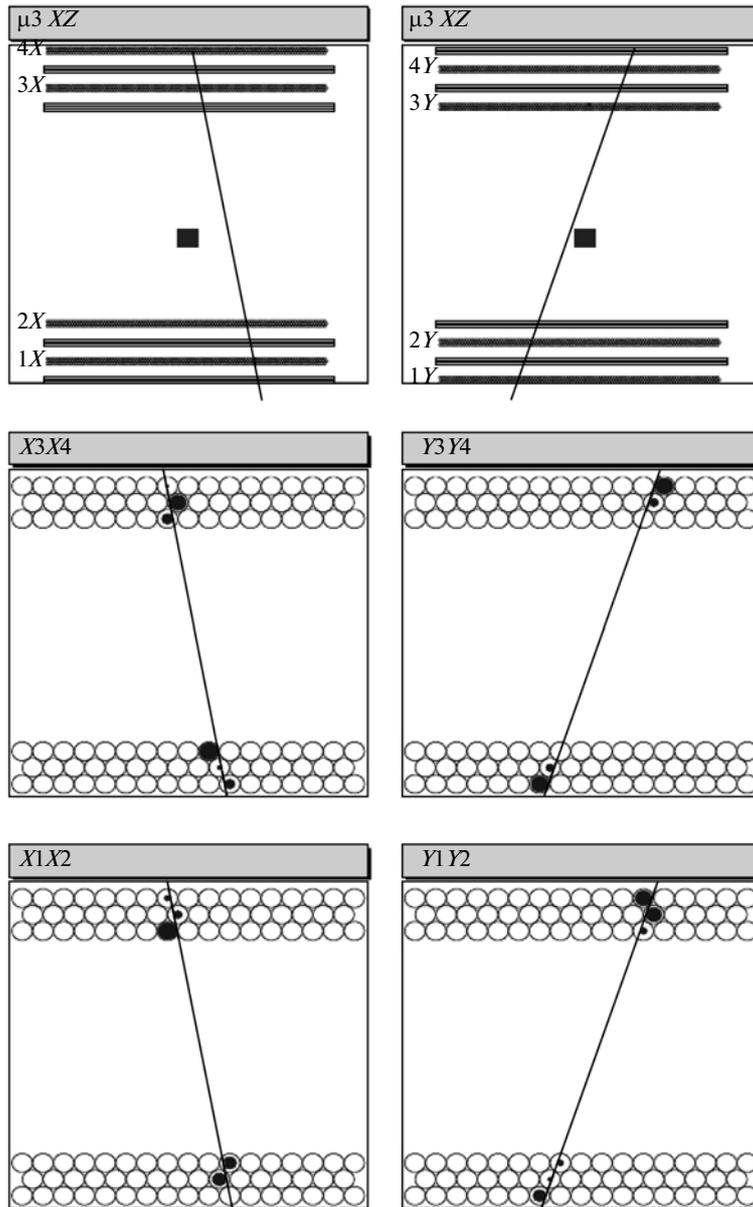


Рис. 11. Реконструкция трека.

Каждый хит учитывает время прохождения сигнала по проволоке, время пролета мюона, собственное разрешение трубок и вклад многократного рассеяния на материале детектора.

Реконструированные проекции образуют два 3D-сегмента (верхний и нижний), и вероятная вершина рассеяния определяется как точка, сумма расстояний от которой до сегментов минимальна.

Критичным параметром, определяющим работоспособность установки, является разрешение разности углов сегментов трека, реконструированных в верхней и нижней частях установки. При-

мер углового разрешения (~ 1.2 мрад) приведен на рис. 12.

Автокалибровка детектора. Процедура автокалибровки состоит в определении индивидуальных для каждого канала параметров t_0 и t_{\max} (t_0 соответствует прохождению трека через сигнальную проволоку; t_{\max} — максимальное время дрейфа), а также в реконструкции индивидуальных $R(t)$ -зависимостей. Параметр t_0 для каждого канала определяется с помощью специальных тестовых сигналов, подаваемых на анодные проволоки, и является входным параметром для процедуры автокалибровки.

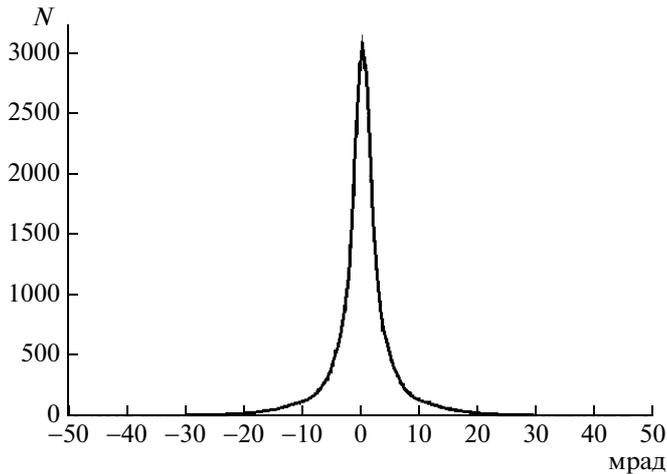


Рис. 12. Разность углов сегментов трека.

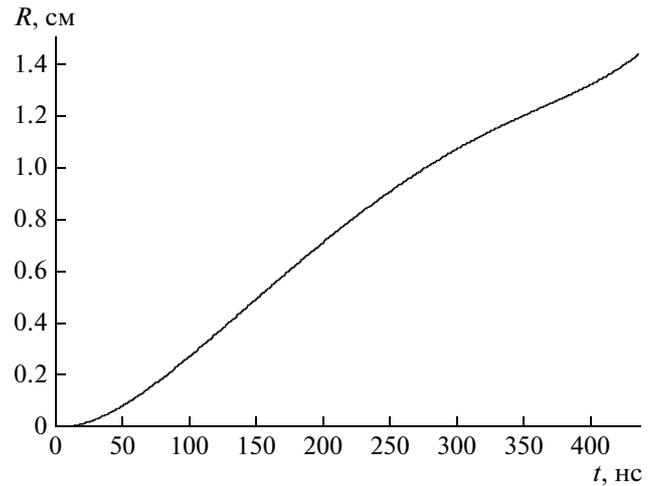


Рис. 13. Пример $R(t)$ -зависимости.

Реконструкция $R(t)$ -зависимостей осуществляется с помощью итерационного фита экспериментальных данных. $R(t)$ -зависимости параметризуются как разложение по полиномам Чебышева до 6-й степени включительно. Свойство

ортогональности полиномов позволяет устранить корреляцию между весами полиномов и обеспечивает высокую устойчивость и сходимость алгоритма. Пример реконструированной $R(t)$ -зависимости приведен на рис. 13.

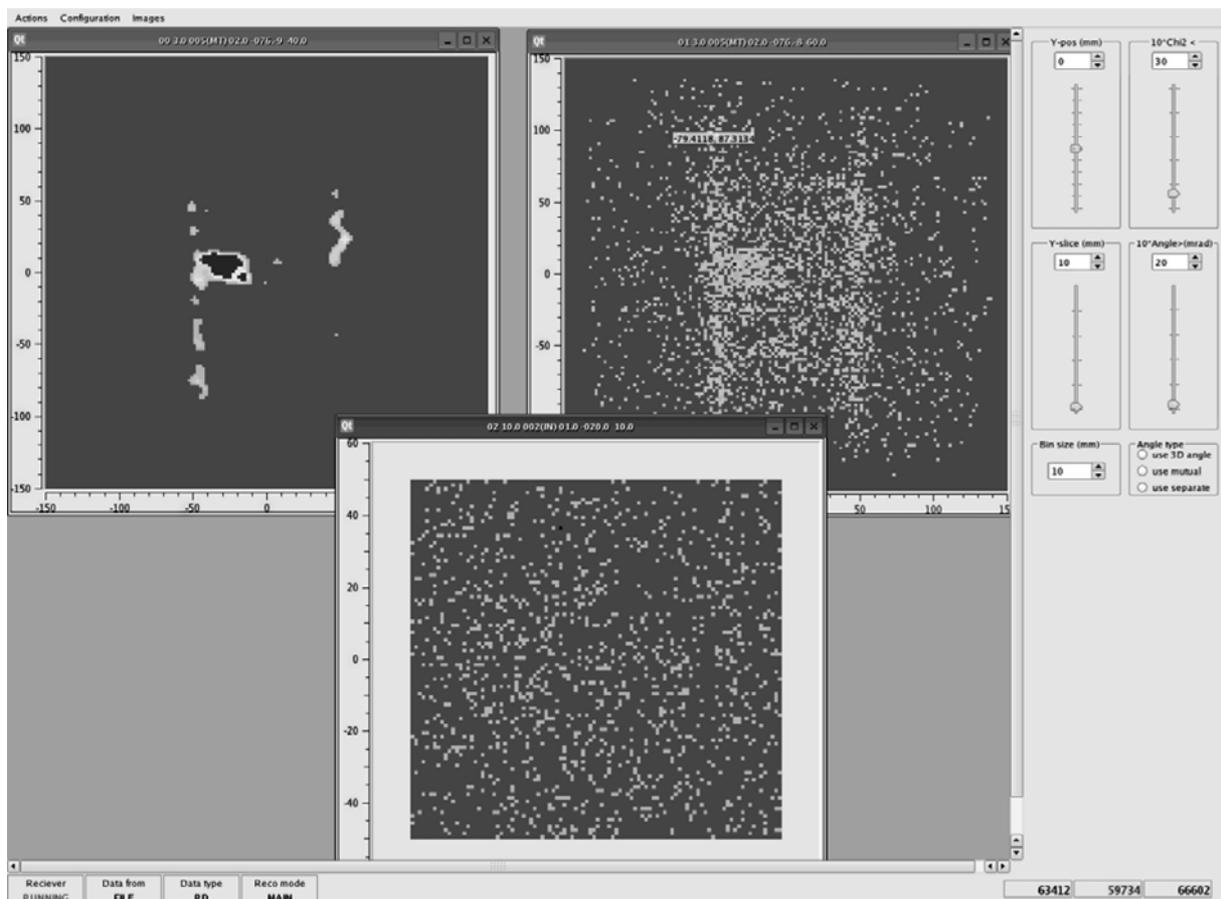


Рис. 14. Интерфейс программного обеспечения.

Визуализация и анализ изображений. Реконструированные вершины вероятного рассеяния (возможно использование вершин с весом, пропорциональным первой либо второй степени угла рассеяния) образуют изображение (в общем случае 3D), из которого можно получить произвольные срезы 2D. При этом каждый срез имеет свои индивидуальные параметры настройки: размер, положение и толщину среза, параметры отбора треков и вершин, методы представления и ассоциированные процедуры цифровой обработки. В настоящее время реализованы различные алгоритмы преобразования гистограмм изображений, устранения шума и выделения границ. Реализована поддержка произвольного количества изображений – срезов (ограничено только размером оперативной памяти компьютера).

Система визуализации построена на основе пакета Qt-4 [23] и позволяет осуществлять анализ данных как в режиме on line, так и с использованием информации из ранее записанных файлов.

Некоторые возможности программного обеспечения представлены на рис. 14. На рабочую поверхность тележки, размещенную примерно в центре, были уложены свинцовые блоки общей толщиной ~20 см. В программе, в качестве примера, созданы три окна, в которых приблизительно через 5 мин экспозиции появляются: в правом верхнем окне – исходное изображение среза объема реконструированных точек без обработки, на котором уже различимы рельсы (полосы вертикального сгущения) с расположенной на них рабочей платформой, сгущение в районе левого рельса соответствует блокам свинца; в левом верхнем – цифровая обработка исходного изображения; в нижнем – необработанное изображение среза в области, в которой нет объектов.

Все поддерживаемые параметры любого изображения могут быть изменены в процессе анализа с использованием простой системы меню. При этом происходит быстрое реконструирование нового изображения с учетом всей накопленной к данному моменту статистики. В настоящее время разрабатываются методы динамического создания, представления и анализа 3D-изображений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная нами экспериментальная установка мюонного томографа, несмотря на неполную автоматизацию, на данный момент обеспечивает сбор данных, их анализ и автокалибровку установки. Реализована функция восстановления треков и 2D-визуализация. Проводятся тестовые

и отладочные работы, дорабатывается программное обеспечение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Georges E.P.* // Commonwealth Engineer. 1955. July 1. P. 455.
2. *Alvarez L.W.* Lawrence Radiation Laboratory Physics. Note 544. 1 March 1965.
3. *Alvarez L.W., Anderson J.A., Bedwei F.E. et al.* // Science. 1970. V. 167. Issue 3919. P. 832.
4. UT Maya Muon Group. Technical report “A detector for muon tomography”. The University of Texas at Austin, Jun 2004.
5. *Basset M., Ansoldi S., Bari M. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2006. V. 567. P. 298.
6. *Menichelli M., Ansoldi S., Bari M. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2007. V. 572. P. 262.
7. *Nagamine K., Iwasaki M., Shimomura K. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 1995. V. 356. P. 585.
8. *Tanaka H.K.M., Nagamine K., Nakamura S.N. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2005. V. 555. P. 164.
9. *Tanaka N.K.M., Yokoyama Iz.* // Proc. Jpn. Acad. Ser. B. 2008. V. 84. P. 107.
10. *Gilboy W.B., Jenneson P.M., Simons S.J.R. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods B. 2007. V. 263. P. 317.
11. *Jenneson P.M.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2004. V. 525. P. 346.
12. *Gilboy W.B., Jenneson P.M., Nayak N.G.* // Radiat. Phys. Chem. 2005. V. 74. P. 454.
13. *Borozdin K., Hogan G., Morris C. et al.* // Nature. 2003. V. 422. P. 277; *Priedhorsky W., Borozdin K., Hogan G. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2003. V. 74. № 10. P. 4294; *Shultz L.J., Borozdin K., Gomez J. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2004. V. 519. P. 683.
14. *Mermod P., Blomgren J., Hayashi M. et al.* // Proc. of Int. Workshop on Fast Neutron Detectors and Applications. 3–6 April 2006. South Africa. Univ. of Cape Town.
15. *Bogollyubski M.* // Proc. of 2008 IEEE NSS and MIC conference. 19–25 October 2008. Dresden, Germany.
16. *Pesente S., Vanini S., Benettoni M. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2009. V. 604. P. 738.
17. *Borisov A., Fakhroudinov R., Kojine A. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2002. V. 494. P. 214.
18. *Bensingher J., Bojko N., Borisov A. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2002. V. 494. P. 480.
19. *Дворников О.В., Чеховский В.А., Солин А.В.* // Chip News. 1997. № 11–12. С. 28.
20. *Дворников О.В., Солин А.В., Чеховский В.А. и др.* // Деп. рук. № Д199731. Минск: БелИСА, 1997. С. 11.
21. Стандарт VME. <http://en.wikipedia.org/wiki/VMEbus>
22. Библиотека VMELinux. <http://www.vmelinux.org>
23. Библиотека Qt. <http://qt.nokia.com/>