

Автоматизированная система уровня Tier-1 обработки данных эксперимента CMS¹

Н.С. Астахов, С.Д. Белов, И.Н. Горбунов, П.В. Дмитриенко, А.Г. Долбилов, В.Е. Жильцов, В.В. Кореньков, В.В. Мицын, Т.А. Стриж, Е.А. Тихоненко, В.В. Трофимов, С.В. Шматов

Аннотация. Представлен обзор распределенной вычислительной инфраструктуры центров уровня Tier-1 эксперимента CMS на Большом адронном коллайдере (БАК). Особое внимание уделено обсуждению задач и основных сервисов нового центра Tier-1, создаваемого в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна).

Ключевые слова: высокопроизводительные вычислительные системы, системы распределенного массового хранения данных, системы распределенной обработки данных, грид.

Введение

Современные грид-инфраструктуры обеспечивают интеграцию аппаратных и программных ресурсов, находящихся в разных организациях в масштабах стран, регионов и континентов, в единую вычислительную среду, позволяющую решать задачи по обработке сверхбольших объемов данных, чего в настоящее время невозможно достичь в локальных вычислительных центрах. Наиболее впечатляющие результаты по организации глобальной инфраструктуры распределенных вычислений получены в проекте WLCG (Worldwide LHC Computing Grid или Всемирный грид для Большого адронного коллайдера)² [1] в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН)³ [2] при обработке данных с экспериментов на БАК [3]. На семинаре 4 июля 2012 года, посвященном наблюдению новой частицы, похожей на бозон Хиггса, на экспериментальных установках CMS и ATLAS [4-5], директор ЦЕРН Р. Хойер дал высокую оценку грид-технологиям

и их значимости для мировой науки. Он выделил три составляющие, обеспечившие открытие новой фундаментальной частицы (бозона Хиггса) - ускорительный комплекс ЦЕРН, экспериментальные установки ATLAS и CMS и грид-инфраструктуру БАК. Грид-инфраструктура на БАК позволила обрабатывать и хранить колоссальный объем данных, поступающих от экспериментов на коллайдере, и, следовательно, совершать научные открытия. В настоящее время ни один крупный научный проект не осуществим без использования распределенной инфраструктуры для обработки и хранения данных. Роль распределенной компьютерной инфраструктуры в открытии новой частицы отмечена также в [6].

“Компактный мюонный соленоид” (Compact Muon Solenoid - CMS) [7] является одним из двух многоцелевых экспериментов, созданных для работы на пучках ускорительного комплекса БАК. Программа физических исследований CMS охватывает большой спектр задач физики элементарных частиц и направлена на проверку

¹ Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (Гос.контракт №07.524.12.4008).

² <http://wlcg.web.cern.ch/>

³ <http://www.cern.ch/>

стандартной модели на новом масштабе энергий (до нескольких ТэВ), поиск бозона Хиггса, суперсимметрии и других сигналов новой физики за пределами стандартной модели, а также проведения комплекса экспериментальных исследований в области физики тяжелых ионов [8]. Установка CMS представляет собой многоцелевой экспериментальный комплекс, способный регистрировать широкий спектр возможных экспериментальных сигналов в диапазоне энергий и масс рождаемых частиц вплоть до нескольких ТэВ [9].

Согласно проекту Большой адронный коллайдер должен обеспечивать столкновения пучков протонов с частотой до 40 МГц, что приводит к потоку данных из точки взаимодействия более 40 ТБ/с.⁴ Система последовательного отбора событий в режиме реального времени (trigger) уменьшает поток записываемых в ходе эксперимента данных до 100 Гц.⁵ Таким образом, общий объем экспериментальных данных (часто называемых «сырыми»), подлежащих хранению и последующей детальной обработке и анализу, достигает более 1 ПБ в год. С учетом повторной обработки данных (reprocessing) и физического анализа общий объем данных эксперимента CMS в 2012-2013 гг. составил 14 ПБ, а объем данных моделирования - 30 ПБ.

CMS использует распределенную модель компьютеринга для данных всех типов – «сырых», реконструированных, Монте-Карло (моделирование). Это влечет за собой ответственность за безопасность и обслуживание данных в региональных центрах.

Обработка и хранение данных в CMS возлагаются на распределенные вычислительные центры, объединенные в многоуровневую грид-инфраструктуру (п. 1). В настоящее время модель компьютеринга CMS включает в себя центр уровня Tier-0 в ЦЕРН, семь центров уровня Tier-1, расположенных в крупнейших мировых компьютерных центрах и связанных высокоскоростной сетью, и множество центров уровня Tier-2 и Tier-3, созданных в различных научных организациях. Кроме того, в модель компьютеринга входят центры CMS по набору, контролю

и быстрой обработке данных, размещенных как непосредственно в ЦЕРН, так и в некоторых удаленных региональных центрах (например, в ОИЯИ и МГУ).

1. Распределенная вычислительная инфраструктура центров для БАК

Для моделирования распределенной вычислительной инфраструктуры центров для БАК в 1998 году был создан специальный международный проект MONARC (Models of Networked Analysis at Regional Centers for LHC Experiments) [11]. Задача организации компьютеринга была очень сложной, поскольку требовалось:

- обеспечить быстрый доступ к массивам данных колоссального объема;
- обеспечить прозрачный доступ к географически распределенным ресурсам;
- создать протяженную надежную сетевую инфраструктуру в гетерогенной среде.

В рамках проекта MONARC была разработана базовая модель компьютеринга для экспериментов БАК как иерархическая централизованная структура региональных центров, включающая в себя центры нескольких уровней. Суть распределенной модели архитектуры компьютерной системы состоит в том, что весь объем информации с детекторов БАК после обработки в реальном времени и первичной реконструкции (восстановления треков частиц, их импульсов и других характеристик из хаотического набора сигналов от различных регистрирующих систем) должен направляться для дальнейшей обработки и анализа в региональные центры.

Методом имитационного моделирования [12] был обоснован иерархический принцип организации информационно-вычислительной системы БАК, предполагающей создание центров разных уровней или ярусов (Tier's): Tier-0 (CERN) \Rightarrow Tier-1 \Rightarrow Tier-2 \Rightarrow Tier-3 \Rightarrow компьютеры пользователей (Рис. 1 а).

Уровни различаются по масштабу ресурсов (сетевые, вычислительные, дисковые, архивные) и по выполняемым функциям:

- Tier-0 (ЦЕРН) - первичная реконструкция событий, калибровка, хранение копий полных баз данных;
- Tier-1 - полная реконструкция событий,

⁴ В ходе первого сеанса 2011-2012 гг. БАК обеспечивал столкновения пучков протонов с частотой до 20 МГц.

⁵ Во время первого сеанса эксперимент CMS записывал события с такой же частотой.

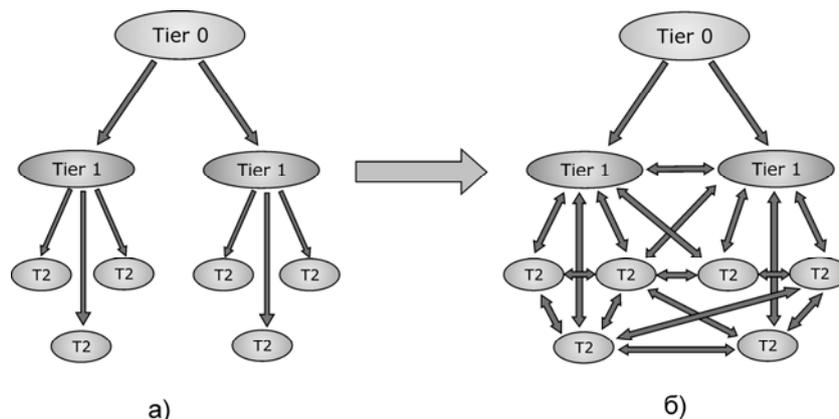


Рис. 1. Эволюция структуры компьютерных центров CMS

хранение актуальных баз данных по событиям, создание и хранение наборов анализируемых событий, моделирование, анализ;

- Tier-2 - репликация и хранение наборов анализируемых событий, моделирование, анализ;
- Tier-3 - кластеры отдельных исследовательских групп.

В рамках этого проекта были проработаны требования к ресурсам и функциям региональных центров уровней Tier-0, Tier-1, Tier-2. Разработанная модель была реализована и успешно функционирует с момента запуска Большого адронного коллайдера в 2009 году.

Однако опыт ее использования показал необходимость внесения изменений в иерархическую модель обработки. Для оптимизации загрузки систем хранения данных различных центров, повышения эффективности использования данных и скорости их обработки были введены дополнительные каналы (как виртуальные каналы - логические связи между центрами, а не физические сетевые каналы) передачи данных между центрами одного уровня (Tier-1 - Tier-1, Tier-2 - Tier-2). Также были введены дополнительные каналы, связывающие один центр уровня Tier-2 с несколькими центрами Tier-1 (а не с одним, как в жесткой иерархической модели). В настоящее время практически все центры уровней Tier-1 и Tier-2 связаны друг с другом каналами передачи данных (Рис. 1 б).

В течение 2013-2104 гг. планируется дальнейшая модернизация экспериментов на БАК, что приведет к увеличению потока экспериментальных данных, а, следовательно, потребует

дополнительных вычислительных мощностей и систем хранения данных. Это, соответственно, приведет и к созданию новых центров различного уровня, в том числе, и уровня Tier-1.

2. Центры CMS уровня Tier-1

Вычислительная система CMS включает семь региональных центров уровня Tier-1:

- T1_DE_KIT в Технологическом институте Карлсруэ (KIT), Карлсруэ, Германия;
- T1_ES_PIC в Центре научной информации университета Барселоны (PIC), Барселона, Испания;
- T1_FR_CCIN2P3 в Национальном институте ядерной физики и физики частиц (IN2P3), Лион, Франция;
- T1_IT_CNAF в Национальном центре по исследованию и развитию информационных технологий и телематике (INFN), Болонья, Италия;
- T1_TW_ASFC в Академии грид-технологий (ASFC), Тайбей, Тайвань;
- T1_UK_RAL в Лаборатории Резерфорда — Эплтона (RAL), Дидкот, Великобритания;
- T1_US_FNAL в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (FNAL), Батавия, США

Иерархия центров и задачи центров каждого уровня определены в Меморандуме WLCG (WLCG Memorandum of Understanding – WLCG MoU) [13]. В настоящее время создается еще один центр CMS уровня Tier-1, который будет находиться в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна, Россия).

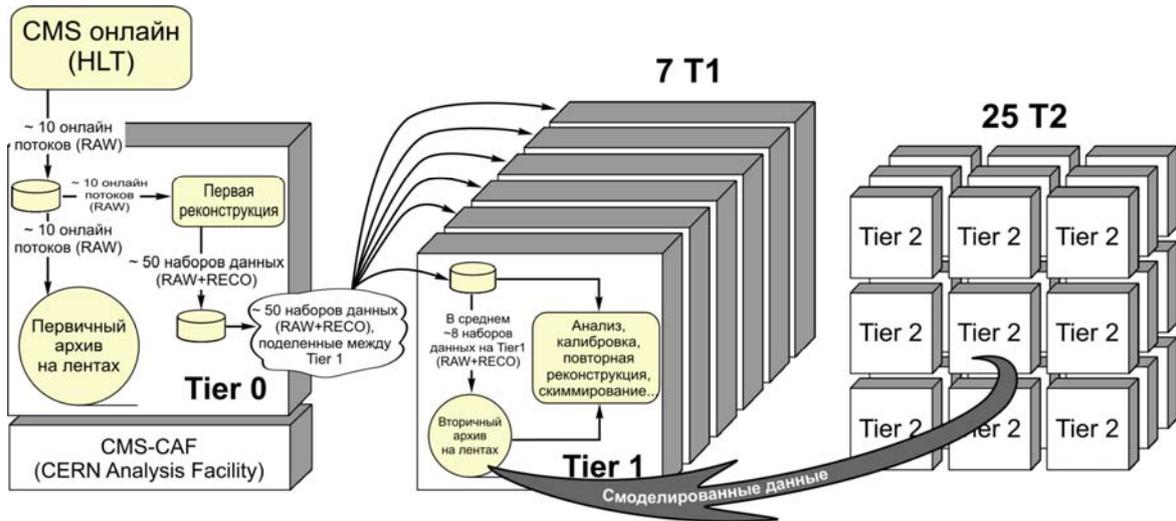


Рис.2. Потoki данных CMS через центры различного уровня

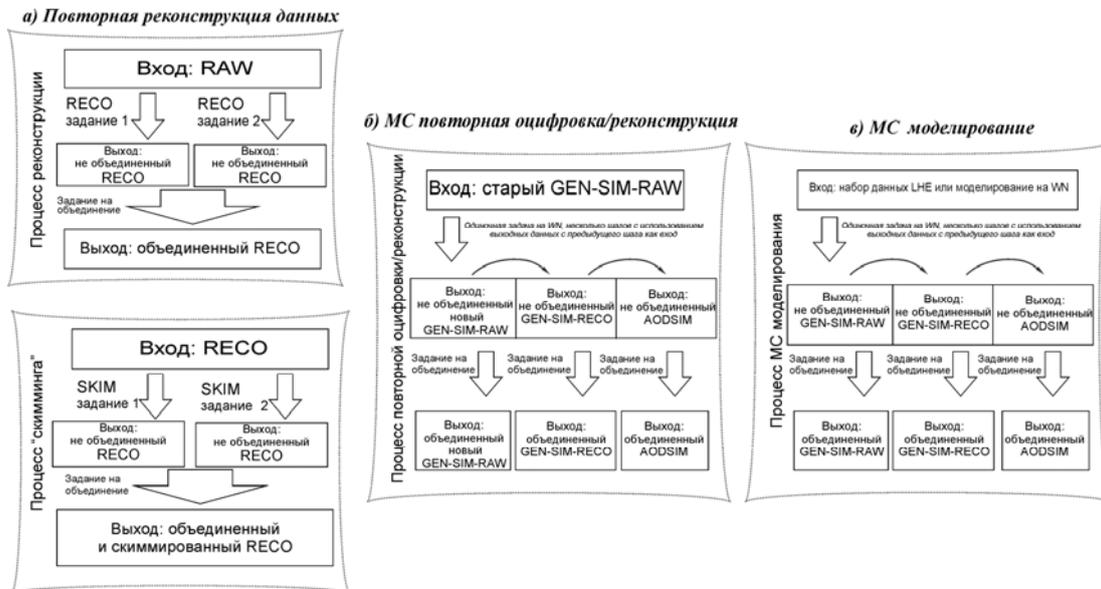


Рис.3. Схема обработки и создания данных CMS

В соответствии с вычислительной моделью CMS [14] уровень Tier-1 предназначен для долговременного хранения данных и преобразования «сырых» данных, поступающих с детекторов экспериментальной установки, и подготовки их для их последующего анализа на уровне Tier-2. Физический анализ данных на уровне Tier-1 не предусмотрен (Рис. 2).

В вычислительной модели CMS на уровне Tier-1 выделяют два основных типа потоковой обработки заданий: повторную реконструкцию данных (Рис. 3 а) и повторную оцифровку/ре-

конструкцию данных моделирования (Рис. 3 б). В процессе повторной реконструкции данных, сайты Tier-1 обрабатывают «сырые» (RAW) данные с помощью усовершенствованного программного обеспечения и/или с учетом обновленных констант калибровки и констант пространственного выравнивания детекторных систем, а также более точной информации о состоянии установки во время набора данных. Выходные данные записываются как в формате RECO (RECOⁿstructed data), так и формате AOD (Analysis Object Data). RECO – данные,

содержащие значения параметров физических объектов (треков, вершин взаимодействия, струй, электронов, мюонов, фотонов и т.д.), а также кластеров и хитов, реконструированных с помощью различных алгоритмов из RAW данных. Они являются выходным потоком данных из Tier-0 для перераспределения на различные Tier-1. Объем одного события составляет 0.4 МБ. Эти данные могут быть использованы для анализа, но неудобны из-за своего большого размера. AOD представляют собой выборочный набор информации из RECO данных и включает только значения параметров физических объектов (треков, кластеров, вершин взаимодействия, струй, электронов, мюонов, фотонов и т.д.). AOD имеет значительно меньшие, по сравнению с RECO, размеры (0.12 МБ на одно событие) и используется для восстановления окончательной топологии физического события и последующего анализа.

На Tier-1 выполняется также отбор по заданным критериям событий из реконструированных данных (skimming). Подобный отбор может осуществляться из “сырых” (RAW) данных или из уже реконструированных RECO данных. Эти события проходят через процесс обработки и объединения, как и во время повторной реконструкции, после чего записываются в файлы формата RECO или в объединенном формате (RAW-RECO) (Рис. 3 а).

В центрах уровня Tier-1 так же, как и в случае экспериментальных данных происходит повторная обработка данных моделирования с помощью обновленных версий программного обеспечения и/или с учетом обновленных констант калибровки и констант пространственного выравнивания детекторных систем. Входные данные типа GEN-SIM-RAW подвергаются повторной оцифровке (часть данных GEN-SIM) для получения обновленных версий смоделированных данных типа RAW, которые в дальнейшем проходят повторную реконструкцию (на выходе данные типа GEN-SIM-RECO и/или AODSIM).

Таким образом, основные функции центра Tier-1 включают:

- прием экспериментальных данных из центра уровня Tier-0 в объеме, определенном соглашением по WLCG (WLCG MOU);

- архивирование и защищенное хранение части экспериментальных RAW данных;
- выполнение последовательной и непрерывной обработки данных;
- отбор событий и формирование набора данных по заданным критериям (skimming);
- повторная обработка данных (reprocessing) с помощью нового ПО или новых констант калибровок детекторных систем и пространственного выравнивания частей установки CMS;
- создание AOD данных;
- распределение (передача) наборов данных (datasets) RECO и AOD на другие центры Tier-1/ Tier-2/ Tier-3 для дублированного хранения (replication) и физического анализа;
- повторное моделирование с помощью нового ПО и калибровочных констант и констант пространственного выравнивания частей установки CMS, защищенное хранение смоделированных событий.

Реализация функций центра Tier-1 обеспечивается различными сервисами модели компьютинга коллаборации CMS с высоким уровнем функциональности и надежности.

Сервисы центров CMS уровня Tier-1 подразделяются на системные (недоступные для пользователей) и сервисы, доступные для пользователей (сервисы пользователей). К системным сервисам относятся сервисы системы массового хранения данных (MSS), сервисы системы безопасности сайта, сервисы системы регистрации и сервисных приоритетов.

Конкретная реализация MSS варьируется от центра к центру, но во всех случаях она должна быть достаточно надежной для обеспечения защищенного хранения архивов копий RAW данных и данных первичного моделирования. Возможные риски потери данных должны быть выявлены и минимизированы. В MSS предусматривается использование кэша для обеспечения необходимых характеристик процедуры доступа к данным. Центры поддерживают соответствующие инфраструктуры для обеспечения безопасности и ограничения доступа к использованию ресурса (*accounting*). При создании системы безопасности центра Tier-1 используются проактивные технологии, направленные на предотвращение возможности нанесения ущерба функциональности центра.

Доступ к данным и ресурсам осуществляется в рамках соглашения, принятого в виртуальной организации CMS (объединения ресурсов и пользователей), регулирующего права и обязанности как отдельных пользователей, так и групп пользователей.

Сервисы пользователей зависят от вычислительных ресурсов и сервисов системного уровня, но в обязательном порядке обеспечивают архивацию данных, хранение данных на дисках, доступ к данным, обработку и анализ данных, ряд пользовательских сервисов, аналогичных сервисам центров уровня Tier-2.

Во время работы ЛНС набранные экспериментом RAW данные передаются на все сайты Tier-1 постоянно, а во время перерывов в работе ускорительного комплекса идет передача данных, набранных на космических лучах. Каждый Tier-1 центр берет на себя ответственность за сохранность ассоциированного с ним основного набора данных и поддерживает архивацию и хранение данных в объеме, определяемым соглашением между центром и WLCG.

В соответствии с обязательствами перед пользователями, связанными с финансирующими структурами, которые поддерживают центры Tier-1, центры могут предоставлять свои мощности для региональных групп (сообществ). Эти функции, однако, не должны нарушать способность сайта выполнить обязательства перед всей коллаборацией.

3. Создание центра CMS уровня Tier-1 в ОИЯИ

Создание автоматизированной системы обработки данных эксперимента CMS на БАК уровня Tier-1 для эксперимента CMS на базе ОИЯИ диктуется активной позицией ОИЯИ, ряда ведущих научных центров России, бывших советских республик и некоторых других стран-участниц ОИЯИ в этом эксперименте. С самого старта проекта ученые из институтов России и стран-участниц ОИЯИ выступают в качестве единой группы, пользующейся высоким авторитетом в коллаборации CMS. Это содружество групп ученых и специалистов из институтов России и других стран-участниц ОИЯИ получило широко известное название

RDMS – аббревиатура от Russia and Dubna Member States (Россия и страны - участницы Дубны). Сегодня RDMS – неотъемлемая и важная составная часть коллаборации CMS. Организация сотрудничества RDMS, объединяющего усилия многих институтов и научных школ, позволила физикам России и стран-участниц ОИЯИ нести полную ответственность за ряд детекторов установки CMS. Кроме этого, физики RDMS активно участвуют в разработке программы физических исследований, реконструкции и отборе событий и создании базового математического обеспечения и компьютеринга.

3.1. Вычислительная модель RDMS CMS

В ОИЯИ успешно создана принятая эксперименталистами БАК грид-инфраструктура, которая представляет собой часть распределенного кластера RuTier-2 (Russian Tier-2) (Рис. 4) [15-16]. Этому предшествовал длительный период тестирования соответствующего программного обеспечения в ОИЯИ и российских институтах, являющихся членами консорциума RDIG (Russian Data Intensive Grid). Центр уровня Tier-2 для эксперимента CMS, созданный и функционирующий в ОИЯИ, входит в число наиболее надежных и производительных центров не только в России, но и во всей глобальной грид-инфраструктуре CMS.

В течение 2011-2012гг. для эксперимента CMS на грид-сайте ОИЯИ выполнено 35,8% от общего числа задач консорциумом RDIG (55,2% от общего процессорного времени консорциума, затраченного на CMS).

В марте 2011 г. Министерство науки и образования РФ выдвинуло предложение о создании центра уровня Tier-1 для четырех (ALICE, ATLAS, CMS и LHCb) экспериментов БАК. Это предложение было поддержано дирекцией ЦЕРН. Для реализации этого проекта в том же году была принята целевая федеральная программа «Создание автоматизированной системы обработки данных экспериментов на Большом адронном коллайдере (БАК) уровня Tier-1». Проект предусматривает создание в России центра уровня Tier-1 с распределенной ответственностью: центр для поддержки экспериментов ALICE, ATLAS и LHCb организуется на базе вычислительного комплекса Национального

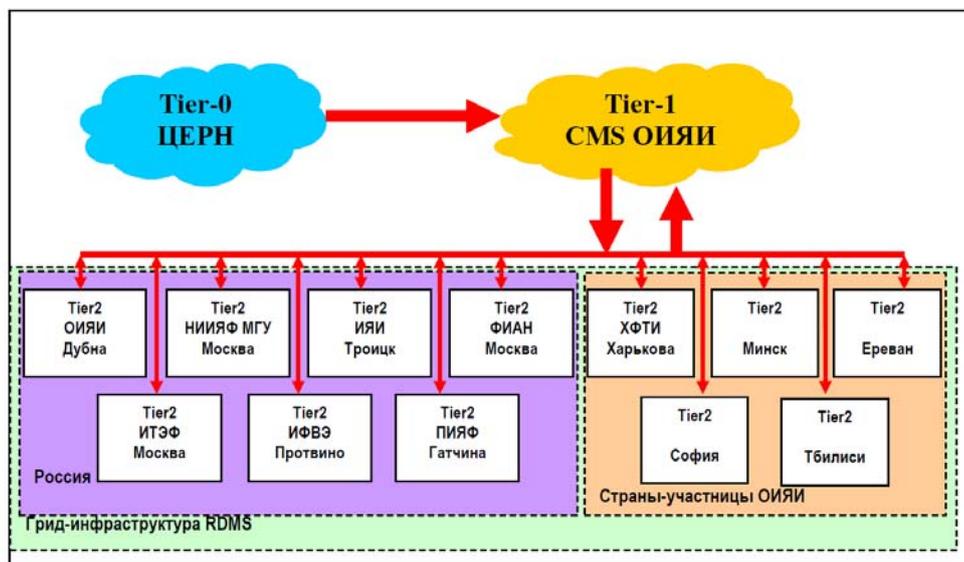


Рис. 4. Структура компьютерных центров RDMS CMS

исследовательского центра "Курчатовский институт" (Москва), а для поддержки эксперимента CMS - в Лаборатории информационных технологий ОИЯИ.

Автоматизированная система обработки и хранения данных (АСОД) CMS в Объединенном институте ядерных исследований предназначена для работы в составе глобальной грид-системы БАК WLCG и нацелена на проведение полного цикла обработки физической информации, получаемой в ходе проведения эксперимента, обеспечения работ по моделированию физических процессов, защищенного хранения и приема/передачи данных в другие центры WLCG.

3.2. Основные компоненты АСОД БАК CMS

Подсистема хранения данных (Storage Element) предназначена для хранения экспериментальных данных, поступающих от экспериментов БАК из центра уровня Tier-0 (ЦЕРН), смоделированных данных, поступающих из центров уровня Tier-2, а также выходных данных задач по обработке данных, выполняемых на АСОД БАК CMS. В подсистему входят хранилища данных на дисках и системы массового хранения на основе ленточных роботов, емкость каждой подсистемы должна быть несколько ПБ (Петабайт) и должна наращиваться минимум на 20% каждый год эксплуатации.

Подсистема вычислений: управление (Computing Element) и счетные узлы (Work Nodes), которая состоит из фермы пакетной обработки (Batch, Local Resources Management System), сервисов обеспечения доступа грид-задач к локальным вычислительным ресурсам центра на основе программного обеспечения промежуточного уровня грид (EMI). Система предоставляет доступ к набору очередей (queues) задач на вычислительных узлах. Число вычислительных узлов должно соответствовать ожидаемой загрузке системы. Задачи обычных пользователей не допускаются к счету на ресурсах центров уровня Tier-1, доступ к набору очередей ограничен с помощью подсистемы распределения ролей (tl access roles).

Подсистема передачи данных (FTS) между центрами различных уровней. Данный сервис также реализуется с помощью инструментов EMI. Передача данных осуществляется посредством создания виртуальных каналов с возможностью указания последовательностей и приоритетов передачи. Согласно вычислительной модели CMS вся передача данных между различными центрами уровня Tier-1 и между центрами уровня Tier-1 и ассоциированными центрами уровня Tier-2 осуществляется с помощью сервиса FTS.

Управление передачей и хранением данных (CMS VOBOX) на уровне наборов и потоков

данных CMS (datasets). Осуществляется посредством следующих компонентов системы PhEDEx:

- База данных управления передачами (Transfer management database - TMDB).
- Передающие агенты, управляющие передачей файлов между сайтами, миграцией данных на локальных хранилищах, проверкой контрольных сумм переданных данных.
- Управляющие агенты, обеспечивающие размещение файлов в соответствии с подписками сайта на данные.
- Локальные агенты, обеспечивающие обработку файлов после их поступления на сайт или перед отправкой файлов с сайта: слияние файлов, регистрацию файлов в каталогах, помещение информации о файлах в базу данных управления файлами.
- Мониторинг передачи и отображение результатов с помощью веб-интерфейса.

Сервис (сервер) кэширования запросов (*Frontier Local Squid Cache Server*) к базе данных калибровочных констант. Задачи, запускаемые на рабочих узлах вычислительного кластера, обращаются к центральной базе констант калибровок. Для снижения нагрузки на серверы этой базы, ускорения получения данных и снижения сетевого трафика, доступ к ним осуществляется через промежуточные узлы, построенные на основе кэширующего прокси-сервера squid. Специализированное программное обеспечение CMS (CMSSW) конфигурируется с указанием списка прокси-серверов, обслуживающих данный сайт (являющихся либо частью самого сайта, либо находящихся на ближайших сайтах). Для надежности каждый центр уровня Tier-1 должен поддерживать по крайней мере два подобных сервера, каждый из которых обеспечивает одновременный запуск порядка 800-1000 задач (jobs slots).

Система распределения нагрузки (*CMS Workload Management System*) основана на системе планирования и запуска задач WLCG GRID WMS и функционирует в соответствии с правилами и приоритетами виртуальной организации CMS. Система включает сервис запуска и управления потоками задач (*Request Manager*), сервис формирования и распределения очередей задач (*Work Queue*), а также сервисы

создания и запуска задач непосредственно на вычислительном узле (*WMAgents*).

Удаленный пакетный запуск задач осуществляется с помощью программной среды CRAB (*CMS Remote Analysis Builder*) [17], обеспечивающей интерфейс пользователей с грид-инфраструктурой CMS. В систему планирования и запуска задач (*GRID Resource Broker*) задачи передаются через машины интерфейса пользователей (*User Interface*).

Сетевая инфраструктура CMS Tier-1 в ОИЯИ включает в себя подсистему LHC OPN, предназначенную для организации выделенных линий передачи данных, связывающих центры Tier-1 и Tier-0. Пропускная способность LHCOPN между Tier-0-Tier-1 и между Tier-0-Tier-1 будет увеличена до 10 Гбит/с в 2014. ОИЯИ также подключен к академическим сетям с пропускной способностью 2x10 Гбит/с, которые обеспечат соединение Tier-1 ОИЯИ с центрами уровня Tier-2/Tier-3.

3.3. Оперативное обслуживание и поддержка центров уровня Tier-2

Центр Tier1 ОИЯИ будет функционировать в соответствии с вычислительной моделью CMS и согласно требованиям WLCG [3]. Центр должен будет принимать согласованные объемы сырых данных и данных моделирования и обеспечивать доступ к данным из других центров уровня Tier-2/Tier-3 инфраструктуры WLCG. В задачу центра входит также обеспечение работы каналов FTS для российских центров Tier-2, включая мониторинг передачи данных.

Кроме того, Tier-1 ОИЯИ будет осуществлять оперативное обслуживание и поддержку региональных центров и пользователей, включая консультации по развертыванию типичного грид-центра, помощь по специфическим проблемам грид-сервисов, поддержку в разрешении инцидентов, связанных с безопасностью, распространение положительного опыта работы.

Литература

1. LHC Computing Grid Technical Design Report. CERN-LHCC-2005-024, 2005; Worldwide LHC Computing Grid (WLCG), <http://lcg.web.cern.ch/LCG/public/default.htm>
2. <http://public.web.cern.ch/public/>
3. <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>
<http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/lhc-en.html>

4. CMS Collaboration: Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC // Phys. Lett. B 716 (2012) 30-61.
5. ATLAS Collaboration: Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC // Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29.
6. А. Климентов, В. Кореньков: Распределенные вычислительные системы и их роль в открытии новой частицы // Суперкомпьютеры, 2012, №3 (11), с.7-11.
7. CMS Collaboration, The Compact Muon Solenoid: Technical Proposal", CERN-LHCC-94-38.
8. G.L. Bayatian et al. (CMS Collab.), Journal of Physics G: Nucl. Part. Phys. 34, 995 (2007)
9. S. Chatrchyan et al. (CMS Collab.), JINST 3 S08004 (2008)
10. Н.С. Астахов и др, "Создание автоматизированной системы обработки данных эксперимента CMS на LHC уровня Tier-1 в ОИЯИ", In Proc. of The 5th International Conference "Distributed Computing and Grid-technologies in Science and Education" (GRID'2012), Dubna, 16-21 July, 2012, с.254-265.
11. M. Aderholz et al.: Models of Networked Analysis at Regional Centers for LHC Experiments (MONARC) - Phase 2 Report // CERN/LCB, 2000-001 (2000).
12. Mihai Dobre, C. Stratan: Monarc simulation framework // Proceedings of the RoEduNet International Conference, Buletinul Stiintific al Universitatii "Politehnica" din Timisoara, Romania, Seria Automatica si Calculatoare Periodica Politehnica, Transactions on Automatic Control and Computer Science, Vol.49 (63), 2004, ISSN 1224-600X, pp.35-42.
13. Worldwide LHC Computing Grid Memorandum of Understanding, <http://lcg.web.cern.ch/lcg/mou.htm>
14. C. Grandi, D. Stickland, L. Taylor, CMS NOTE 2004-031 (2004), CERN LHCC 2004-035/G-083; CMS Computing Technical Design Report, CERN-LHCC-2005-023 and CMS TDR 7, 20 June 2005.
15. V. Gavriloв et al., RDMS CMS Computing activities before the LHC startup, Proc.of the 5th Int.Conference "Distributed Computing and GRID-technologies in Science and Education, Dubna, 2012, pp.133-137.
16. V. Gavriloв et al., RDMS CMS data processing and analysis workflow, in Proc. of XXIII Int. Symp. on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2011), Dubna, 2011, pp.148-153.
17. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/CMS/CRAB>

Астахов Николай Степанович. Начальник группы Лаборатории информационных технологий Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ). Окончил Рязанский радиотехнический институт в 1976 году. Автор 10 печатных работ. Область научных интересов: грид-технологии. E-mail: astakhov@jinr.ru

Белов Сергей Дмитриевич. Ведущий программист Лаборатории информационных технологий Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ). Окончил Московский физико-технический институт (государственный университет) в 2005 году. Автор 40 печатных работ. Область научных интересов: распределенные вычисления, облачные и грид-технологии, автоматизация научных вычислений. E-mail: belov@jinr.ru

Горбунов Илья Николаевич. Младший научный сотрудник Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ. Окончил Московский государственный университет в 2010 году. Автор 124 печатных работ. Область научных интересов: стандартная модель взаимодействия элементарных частиц, физические процессы за рамками стандартной модели, теория электрослабых взаимодействий, изучение возможных сигналов «новой» физики на LHC, методы обработки и анализа экспериментальной информации, системы передачи и распределенной обработки данных, моделирование физических процессов. E-mail: Ilya.Gorbunov@cern.ch

Дмитриенко Павел Владимирович. Инженер-программист Лаборатории информационных технологий ОИЯИ. Окончил Орловский государственный технический университет в 2008 году. Автор 12 печатных работ. Область научных интересов: распределенные и параллельные вычисления, грид-технологии, сети, проектирование высоконагруженных интернет-проектов. E-mail: orelnotre@mail.ru

Долбилов Андрей Геннадьевич. Начальник сектора Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Окончил Московский институт электронной техники в 1986 году. Автор 25 печатных работ. Область научных интересов: сетевые технологии, облачные и грид-технологии, системное программирование. E-mail: dolbilov@jinr.ru

Жильцов Виктор Евгеньевич. Ведущий программист Лаборатории информационных технологий Объединенного института ядерных исследований ОИЯИ. Окончил Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики в 1980 году. Автор 20 печатных работ. Область научных интересов: операционные системы, распределенные вычисления, облачные и грид-технологии. E-mail: zhiltsov@jinr.ru

Кореньков Владимир Васильевич. Директор Лаборатории информационных технологий ОИЯИ; заведующий кафедрой Международного университета природы, общества и человека «Дубна». Окончил Московский государственный университет, факультет вычислительной математики и кибернетики в 1976 году. Доктор технических наук, старший научный сотрудник. Автор более 250 печатных работ. Область научных интересов: распределенные и параллельные вычисления, грид-технологии, сети, базы данных и распределенные системы хранения сверхбольших объемов информации, корпоративные информационные системы. E-mail: korenkov@cv.jinr.ru

Мицын Владимир Валентинович. Старший научный сотрудник Лаборатории информационных технологий ОИЯИ. Окончил Московский государственный университет в 1975 году. Автор более 60 печатных работ. Область научных интересов: распределенные вычисления (грид), сети, распределенное хранение и доступ к сверхбольшим объемам информации, системное администрирование больших вычислительных установок и хранилищ данных. E-mail: vvm@mammoth.jinr.ru

Стриж Татьяна Александровна. Заместитель директора Лаборатории информационных технологий ОИЯИ. Окончила Московский государственный университет в 1970 году. Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Автор более 130 печатных работ. Область научных интересов: обработка физической информации, распределенные вычисления, грид-технологии, информационные системы. E-mail: strizh@jinr.ru

Тихоненко Елена Александровна. Старший научный сотрудник Лаборатории информационных технологий ОИЯИ. Окончила Московский инженерно-физический институт в 1979 году. Кандидат физико-математических наук. Автор более 70 печатных работ. Область научных интересов: распределенные и параллельные вычисления, грид-технологии. E-mail: eat@cv.jinr.ru

Трофимов Владимир Валентинович. Ведущий программист Лаборатории информационных технологий ОИЯИ. Окончил Уральский политехнический институт им. С.М. Кирова в 1978 году. Автор 20 печатных работ. Область научных интересов: хранение и обработка больших массивов данных, автоматизация измерений, автоматизированные системы управления технологическим процессом. E-mail: trofimov@jinr.ru

Шматов Сергей Владимирович. Начальник сектора Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ. Окончил Московский инженерно-физический институт в 1995 году. Кандидат физико-математических наук. Автор более 375 печатных работ. Область научных интересов: стандартная модель взаимодействия элементарных частиц, физические процессы за рамками стандартной модели, многомерная квантовая теория поля, изучение возможных сигналов «новой» физики на Tevatron и LHC, методы обработки и анализа экспериментальной информации, системы передачи и распределения данных, моделирование физических процессов. E-mail: shmatov@cern.ch