

Н. Н. Корнева, В. Н. Назаров

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ
В ЗАДАЧАХ НАЗЕМНОГО СЕГМЕНТА
НАУЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ**

Представлено к печати
зам. директора ИКИ РАН
Р. Р. Назировым

**МОСКВА
2013**

**Data visualization in tasks of the science space missions
ground segment**

N. N. Korneva, V. N. Nazarov

The ground segment is one of the key components of any science space mission. Responsible decisions in most of its tasks are still made by humans, not by a computer and therefore the implementation of the visual and convenient way of information representation is the necessary condition for ground segment software. One way of such representation is computer visualization of data being processed. The choice of the visualization method depends not only on nature of data, the current problem, but also on intended use of the visualization results.

The article is concerned with the peculiarities of choosing the graphical form of data representation in terms of solving some tasks of ground segment by leading space agencies.

Keywords: data visualization; science space mission; ground segment; science ground segment; ground control segment.

**Визуализация данных в задачах наземного сегмента
научных космических проектов**

Н. Н. Корнева, В. Н. Назаров

Наземный сегмент является одной из ключевых составляющих любого научного космического проекта. При решении большинства его задач ответственные решения до сих пор принимает человек, а не компьютер, и, следовательно, реализация наглядного и удобного способа представления информации является необходимым условием для комплекса программных средств, использующегося в наземном сегменте. Один из способов такого представления — компьютерная визуализация обрабатываемых данных. Выбор метода визуализации при этом зависит не только от характера данных, решаемой задачи, но и от предполагаемой области использования результатов данной визуализации.

В работе рассмотрены особенности выбора той или иной графической формы представления данных на примере решения некоторых задач наземного сегмента ведущими космическими агентствами.

Ключевые слова: визуализация данных; научный космический проект; наземный сегмент; наземный научный комплекс; наземный комплекс управления.

ВВЕДЕНИЕ

Задача анализа данных возникает повсеместно в различных областях фундаментальной и прикладной науки, связанной с исследованием и освоением космического пространства. Одним из самых распространённых подходов к анализу данных является их представление в виде оптического изображения, т.е. визуализация. Выбор метода визуализации при этом зависит не только от характера данных, решаемой задачи, но и от предполагаемой области использования результатов данной визуализации. Так, при решении задач наземного комплекса управления применяют в основном двухмерную графику, что обусловлено требованием получения в максимально короткий срок с момента события на борту космического аппарата (КА) (а лучше всего в реальном масштабе времени) достоверной и существенной информации о параметрах состояния аппарата. Особенность же применения визуализации при решении задач наземного научного комплекса заключается в том, что в большинстве случаев она носит отложенный характер, т.е. результат не требуется сразу же после события на борту КА. В связи с этим в данной области довольно часто применяется трёхмерная графика, а для задач интерпретации полученных научных результатов и стереовизуализация.

В настоящей работе рассмотрены особенности выбора той или иной графической формы представления данных на примере решения некоторых задач наземного сегмента ведущими космическими агентствами.

1. МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ

В настоящее время под термином компьютерная визуализация (далее — визуализация) чаще всего понимают процесс визуализации данных посредством специализированного программного обеспечения. В современной науке и технике визуализация применяется как

инструмент обработки и анализа данных различной природы: от графического представления конкретных инженерных расчётов до визуализации абстрактных данных. В этой связи существует множество методов визуализации, а также их классификаций. Часто принято разделять методы по области их применения. Так, например, выделяют методы физической, химической визуализации и т.п. Другой подход связан с типом представления данных. Тогда, если придерживаться классификации по данному признаку, можно выделить три группы методов, получивших наибольшее распространение на текущий момент времени: двумерная визуализация, трёхмерная визуализация, стереовизуализация данных.

1.1. Методы двумерной визуализации данных

Под двумерной визуализацией понимается отображение данных на плоскости в виде изображения. Для формирования изображений обычно используется либо растровый, либо векторный способы. В векторном методе изображение представляется как набор геометрических примитивов, в растровом — в виде двумерного массива пикселей. При выборе способа представления желательно учитывать тип устройства вывода, в противном случае может потребоваться конвертация. Однако прежде чем приступить к формированию изображения, необходимо также решить более высокоуровневые задачи, в частности определиться с графической формой представления данных на плоскости. Существует большое количество таких форм, рассмотрим некоторые из них.

График. Этот способ визуализации применяется в основном для иллюстрации связей между параметрами, математических понятий или функциональных зависимостей. Виды графиков очень разнообразны и зависят от выбранной системы координат, а также от масштабов по осям. Данная форма представления является одним из основных способов отображения телеметрической информации (ТМИ). Возможность визуализации данных в виде графиков реализована практически во всех популярных пакетах, предназначенных для автоматизации математических расчётов (MATLAB, Mathcad и др.).

Диаграмма. Графическое изображение, наглядно показывающее соотношение каких-либо величин [БЭС, 2000]. Существует большое количество типов диаграмм, применяемых в различных задачах. Так,

например, при планировании работ проекта особое распространение получили диаграмма Ганта (http://www.devbusiness.ru/development/pm/pm_terms.htm) и сетевой график (<http://www.intuit.ru/studies/courses/2190/237/lecture/3277>).

Диаграмма Ганта (рис. 1.1а) представляет собой полосы, ориентированные вдоль оси времени. Каждой задаче в составе проекта ставится в соответствие определённая полоса, концы которой — это моменты начала и завершения работ по задаче. К недостаткам диаграммы Ганта обычно относят отсутствие возможности отображения ресурсоёмкости и значимости работ, их сущности.

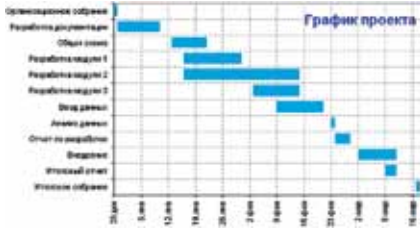
Сетевой график (рис. 1.1б) отображает работы проекта, связи между ними и состояние проекта в виде графа. Различают два варианта построения такой диаграммы:

- дуги графа отображают работы, ведущиеся на некотором объекте, а вершины — состояние этого объекта;
- дуги графа отображают зависимости между работами, а вершины — эти работы.

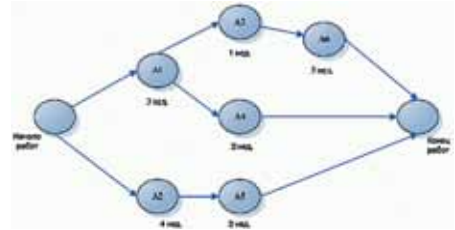
Применение сетевого графика позволяет определить сроки завершения проекта и выявить возможные варианты сокращения сроков работ.

Ещё одним примером визуализации данных в виде диаграммы является диаграмма Герцшпрунга-Рассела (рис. 1.1в), используемая в астрономии для графического изображения зависимости между абсолютной звёздной величиной и спектральным классом. Существуют различные варианты диаграммы, так, например, вместо спектрального класса в качестве координаты может использоваться эффективная температура, а вместо абсолютной звёздной величины — светимость (<http://www.astrogalaxy.ru/066.html>).

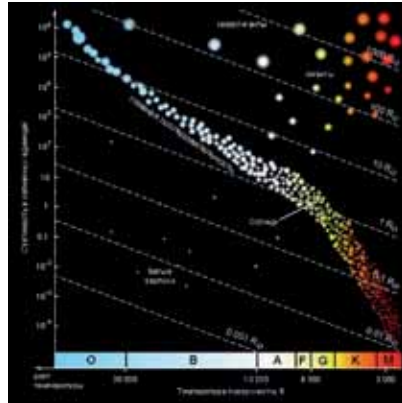
Снимок. Результатом некоторых экспериментов являются снимки, полученные теми или иными приборами в самых различных спектральных диапазонах. Для ряда задач визуализация данных снимков (предварительно обработанных по определённому алгоритму) является оптимальной. Выбор алгоритма обработки зависит от поставленной задачи, а также от того, в каком спектральном диапазоне был получен снимок (часто результирующий снимок — это комбинация различных спектральных каналов (рис. 1.1г)). К тому же в случае наличия нескольких кадров их можно попытаться объединить в панораму, которая затем может быть визуализирована в одной из картографических проекций.



а



б



в



г

Рис. 1.1. 2D-визуализация: *а* — диаграмма Ганта (<http://www.planetaexcel.ru/techniques/4/108/>); *б* — сетевой график (вершины — работы, дуги — зависимости между работами) (<http://www.intuit.ru/studies/courses/2190/237/lecture/3277>); *в* — диаграмма Герцшпрунга-Рассела (<http://www.astrogalaxy.ru/066.html>); *г* — изображение 2000 г. (ближний инфракрасный, видимый свет) (<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=49864>)

1.2. Методы трёхмерной визуализации данных

Трёхмерная визуализация данных осуществляется на основе модели этих данных. Под моделью в данном случае понимается описание исходных данных на строго определённом языке или в виде структуры. После получения модели требуется построить её изображения для выбранных точек наблюдения и условий освещения, т. е. осуществить её рендеринг. Способ получения модели, выбор метода рендеринга целиком и полностью определяется структурой данных, а также поставленной задачей. Например, для описания пространственной формы трёхмерных объектов можно использовать следующие модели объектов [Шапиро, Стокман, 2006]:

- трёхмерная каркасная модель (3D mesh) — это геометрический способ описания объекта в виде множества вершин и рёбер, образующих многоугольники в пространстве; часто в качестве такого многоугольника используется треугольник; трёхмерная каркасная модель довольно популярна, например, её используют для визуализации рельефа (рис. 1.2);
- модель «поверхность-ребро-вершина» — это обобщение проволочной каркасной модели; модель в данном случае — это структура данных, в которой хранятся все вершины, поверхности, рёбра объекта, а также сведения об их топологических взаимосвязях;
- проволочная каркасная модель — в случае использования данной модели предполагается, что поверхность объекта состоит из плоских кусков, а все рёбра являются прямолинейными отрезками;
- модель на основе обобщённых цилиндров — модель объекта в этом случае содержит описание обобщённых цилиндров, их пространственных отношений, а также глобальные свойства объекта;
- воксельная модель — это представление трёхмерного объекта в виде трёхмерного массива; элементы массива называются вокселями (аналог пиксела для трёхмерного

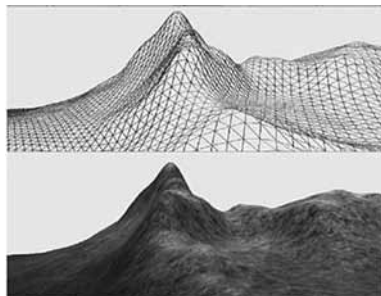


Рис. 1.2. 3D-визуализация модели рельефа на основе триангулированной каркасной модели [Luna, 2008]

пространства) и могут принимать значения 1 (наличие объекта в данном вокселе) или 0 (отсутствие объекта); воксельные модели применяются в геологии (рис. 1.3), сейсмологии и других областях.

Последующий же процесс рендеринга модели объекта заключается в определении видимых с данной точки наблюдения поверхностей модели на первом этапе и в последующем вычислении значений пикселей формируемого изображения на втором шаге. Сложность рендеринга определяется в основном вторым этапом. Для упрощения данного шага можно полагать, что объект сделан из материала с известными отражающими свойствами и окрашен в определённый цвет, однако для более реалистичной визуализации этого явно недостаточно.

Необходимо также заметить, что осуществить трёхмерную визуализацию объекта возможно также и без его геометрической модели, однако в этом случае потребуются наличие большого количества изображений объекта с различных точек наблюдения. В работе [Форсайт, Понс, 2004] рассмотрены некоторые подходы к визуализации на основе изображений.

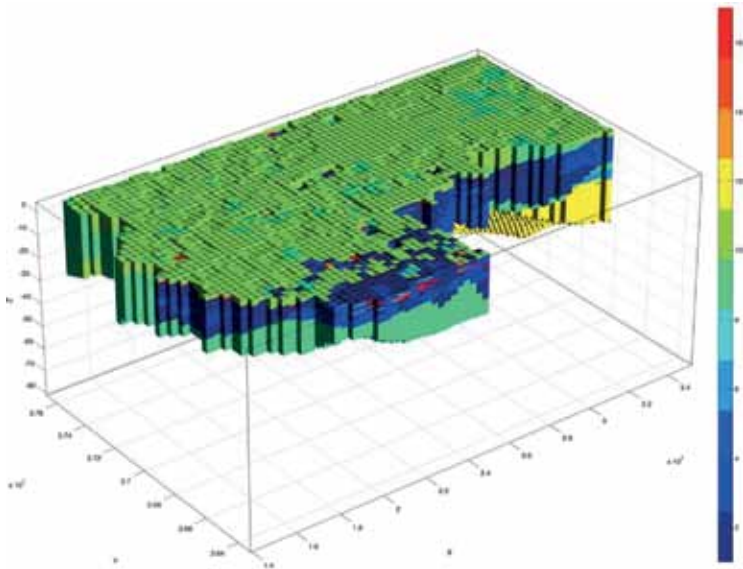


Рис. 1.3. 3D-визуализация геологической модели на основе воксельной модели (<http://particlesizetoolbox.wikispaces.com/PST-+A+Concise+Guide>)

Для многих задач часто применяется комбинация рассмотренных выше методов, т. е. сочетание реальных и искусственных изображений (например, см. п. 2.2.2). Данный подход незаменим тогда, когда необходимо повысить реалистичность сцены, однако дальнейшее усложнение геометрической модели либо невозможно, либо нецелесообразно.

1.3. Методы стереовизуализации данных

Ощущение объёмности визуализируемых данных можно создать не только средствами трёхмерной графики, но и путём отдельного наблюдения ракурсов представления данных, т. е. посредством формирования у наблюдателя стереоэффекта. Большинство методов, позволяющих достичь данной цели, требуют наличия у конечного пользователя специализированного оборудования, зачастую довольно дорогостоящего. Однако стереовизуализация незаменима при решении многих инженерных и научных задач. Так, например, её активно используют при визуализации виртуальной и дополненной реальностей, обработке данных дистанционного зондирования тел Солнечной системы и в других областях. Остановимся более подробно на некоторых из данных методов.

Анаглифический метод. В анаглифическом способе сепарации ракурсов добиваются посредством цветового разделения изображения, видимого левым и правым глазом (рис. 1.4). Достоинством метода, прежде всего, является его дешевизна, доступность аппаратных средств и широкая применимость. Однако подобная универсальность усложняет разработку программного обеспечения для формирования анаглифов. Не все средства отображения передают цвета одинаково, кроме того, не всегда совершенны и очки — одни чуть светлее, другие чуть темнее. Поэтому фильтрация оказывается неидеальной, разделение изображений по цветовым каналам получается не полным, и каждый глаз видит ещё и немного из того, что для него не предназначено.

Растровый метод. В растровых методах используется пространственное разделение стереопары. Изображение на экране состоит из узких вертикальных полосок, с чередованием изображений стереопары. Перед экраном размещается растр с таким же шагом, элементы которого позволяют каждому глазу видеть только «свои» полоски изображения.

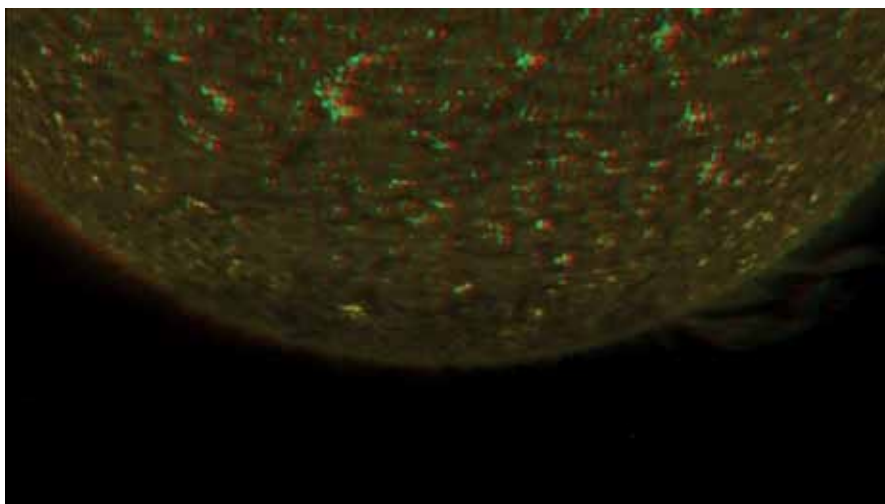


Рис. 1.4. Анаглиф (алгоритм Dubois) по стереопаре Солнца (http://www.nasa.gov/mission_pages/stereo/multimedia/LeftRightImages.html)

При достаточном удалении зрителя от экрана полоски сливаются в единое полутоновое изображение. Для реализации растрового способа сепарации ракурсов необходимо наличие автостереоскопического дисплея.

Поляризационный метод. Один из способов построения схемы стереовидеопроекции для поляризационного метода [Dubois, 2000] заключается в использовании варианта с двумя видеопроекторами, параллельно работающими на один недеполяризующий экран. На выходах обоих проекторов устанавливаются пассивные поляризационные фильтры, а зритель снабжается поляризационными очками. Алгоритм вывода стереоизображения в этом случае сводится к подаче на проекторы различных ракурсов стереопары. Поляризационный способ разделения ракурсов применяется сегодня и для жидкокристаллических (ЖК) мониторов (некоторые дисплеи ZALMAN, PLANAR, LG и др.).

Эклипсный метод. Суть эклипсного метода заключается в поперечном выводе на экран левого и правого ракурсов. Синхронно с выводом изображений затемняются стёкла ЖК-очков, через которые наблюдатель просматривает стереопары. Для реализации данного способа необходимы экраны, способные работать при очень высоких

частотах обновления. Программное обеспечение при этом должно, по сути, выполнять следующие действия:

- 1) поочерёдно выводить на монитор два разных ракурса до тех пор, пока не будет готова новая пара;
- 2) оповещать контроллер очков, какой из ракурсов выводится на монитор в текущий момент времени.

Следует заметить, что любая задержка при выводе ракурса на экран может привести к разрушению стереоэффекта. В этой ситуации актуальным становится использование механизма четверной буферизации (QuadBuffer), когда каждому ракурсу ставится в соответствие два буфера (DoubleBuffer). Сегодня среди наиболее популярных графических API (Application Programming Interface) такой механизм поддерживает только OpenGL (Open Graphics Library). Ещё одним способом формирования стереовывода для данного способа сепарации является использование стереодрайверов. В этом случае драйвер осуществляет управление стереоустройствами, а также самостоятельно формирует стереовывод.

В настоящее время для стереовизуализации на базе эллипсного способа сепарации ракурсов чаще всего используются технологии 3D VISION от NVIDIA и HD3D от AMD. Причём в обоих случаях существуют решения для видеокарт как пользовательского сегмента, так и профессионального. Разница же между технологиями NVIDIA и AMD заключается в стремлении AMD сделать HD3D открытой платформой, которая поддерживает множество различных стандартов, в отличие от подхода NVIDIA, привязанного к конкретному сертифицированному оборудованию.

Общее для всех рассмотренных выше методов стереовизуализации — обязательное наличие у конечного пользователя специальных аппаратных и программных средств. Одним из самых доступных является анаглифический метод формирования стереоизображений. Данный способ, единственный из всех рассмотренных, позволяет создать иллюзию объёмности на простой бумаге. Однако, как уже отмечалось выше, существенными недостатками метода является потеря в цветопередаче, повышенная утомляемость наблюдателя. Преимуществом растрового способа разделения ракурсов является отсутствие очков, но разрешение экрана в стереорежиме снижается вдвое по сравнению с 2D-режимом. К тому же иллюзия объёмности создаётся у наблюдателя только при определённом расположении головы относительно монитора, кроме того, при просмотре подобных изображений на экране слегка заметна «чересполосица» чётных

и нечётных столбцов: они разделены тонкими линиями, как будто в матрице увеличен межпиксельный промежуток между рядами. Эклипсный и поляризаационный методы лишены этих недостатков, но довольно недешёвы в реализации.

2. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ В ЗАДАЧАХ НАЗЕМНОГО СЕГМЕНТА НАУЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

Наземный сегмент является одной из ключевых составляющих любого научного космического проекта. При этом в его составе обычно принято выделять наземный комплекс управления и наземный научный комплекс. К основным задачам наземного комплекса управления относят такие, которые связаны с управлением и планированием полёта КА, а на наземный научный комплекс обычно возлагается решение вопросов управления комплексом научной аппаратуры (КНА), планирования проведения научных экспериментов, обработки и архивации научной информации проекта [Nazirov et al., 2012]. Причём при решении большинства поставленных задач ответственные решения до сих пор принимает человек, а не компьютер, и, следовательно, реализация наглядного и удобного способа представления информации является необходимым условием для комплекса программных средств, использующегося в наземном сегменте. Один из способов такого представления — визуализация обрабатываемых данных. Выбор метода визуализации при этом зависит не только от характера данных, решаемой задачи, но и от предполагаемой области использования результатов данной визуализации.

2.1. Визуализация в задачах наземного научного комплекса

Особенность применения визуализации при решении задач наземного научного комплекса заключается в том, что в большинстве случаев она носит отложенный характер, т. е. результат не требуется сразу же после события на борту КА. С другой стороны, к используемым методам предъявляются повышенные требования по качеству и наглядности итоговой картинке, времени отклика на действия пользователя, а также по стоимости реализации как самого алгоритма, так и необходимого аппаратного обеспечения. К тому же часто существует необходимость применения различных методов визуализации к одному и тому же набору данных. Рассмотрим специфику выбора

той или иной графической формы представления данных на примере решения некоторых задач наземного научного комплекса ведущими космическими агентствами.

2.1.1. Визуализация как способ планирования проведения научных экспериментов

Характерной особенностью любого научного эксперимента является то, что он никогда не производится наугад — его всегда предваряет стадия планирования. В научных космических исследованиях это имеет особенно большое значение, так как результатом эксперимента могут стать не просто затраты времени и ресурсов, но и, как вариант, выход из строя научной аппаратуры, например, из-за выполнения в одно и то же время взаимно противоречивых с технической точки зрения экспериментов. Визуализация возможных последствий экспериментов в этом случае способна упростить и повысить эффективность работы научно-инженерного состава проекта. Кроме того, это ещё и быстрая и наглядная возможность для учёного оценить текущее состояние аппарата и в соответствии с этим скорректировать (а возможно и изменить) план эксперимента.

Весьма условно системы планирования проведения научных экспериментов можно разделить:

- на системы, ориентированные на выявление взаимно противоречивых с технической точки зрения требований и формирование на этой основе циклограмм управления КНА (область применения — краткосрочное, среднесрочное и долгосрочное планирование), и
- системы, нацеленные на формирование наиболее эффективного плана наблюдений с научной точки зрения, естественно технические ограничения в этом случае также учитываются (область применения — среднесрочное и долгосрочное планирование).

В соответствии с целями систем в них используются и различные графические формы представления данных. В системах первого типа — это в основном графики, карты, диаграммы, т.е. двухмерная визуализация; трёхмерная графика, если и применяется, то обычно без текстурирования (рис. 2.1) или же объекты/их части окрашиваются одним цветом в соответствии со значениями каких-либо отображаемых характеристик.

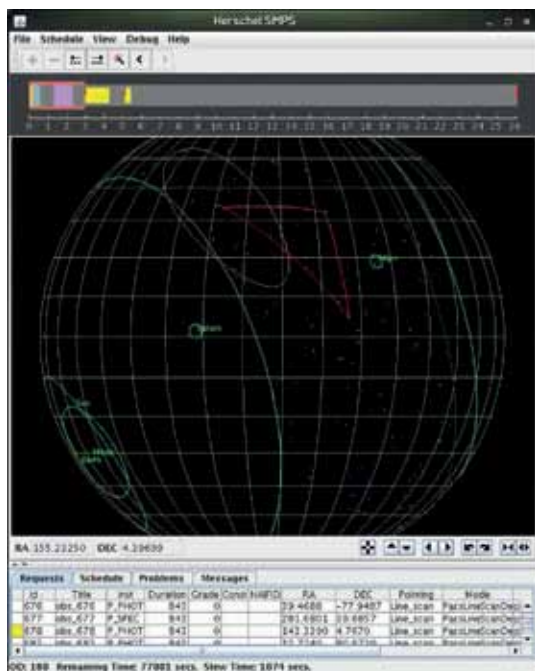


Рис. 2.1. Основное окно Scientific Mission Planning System (миссия ESA Herschel) [Brumfitt et al., 2011]

В системах второго типа наряду с уже перечисленными графическими формами представления данных активно используется трёхмерная визуализация, причём, в отличие от систем первого типа, изображению стараются придать как можно больше реалистичности (разумеется, не игнорируя при этом требования по скорости и потреблению системой ресурсов). Обычно при планировании проведения научного эксперимента пользуются обоими типами систем. Рассмотрим некоторые примеры систем второго типа.

Solar System Science Laboratory (SOLab) [Almeida et al., 2012]. Система среднесрочного и долгосрочного планирования ESA (англ. European Space Agency — Европейское космическое агентство, сокр. ЕКА), первоначально разработанная под миссию VENUS EXPRESS (2005), позднее была добавлена поддержка MARS EXPRESS и JUPITER ICY MOONS EXPLORER. В настоящее время система позиционируется как универсальная (от орбитальных аппаратов до роверов). Программное обеспечение реализовано на языке IDL

(Interactive Data Language), для графического вывода использовалась API OpenGL. Визуализация данных может быть осуществлена как в двухмерном, так и трёхмерном режиме.

Science Activity Planner (SAP)/Maestro и *Mars Science Laboratory Interface (MSLICE)*. SAP [Norris et al., 2005] — программное обеспечение, используемое учёными NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration — Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства, *сокр.* НАСА) для планирования исследовательской деятельности марсохода Opportunity (а раньше и Spirit). Для анализа снимков, получаемых ровером, в системе предусмотрены следующие графические формы представления данных (рис. 2.2):

- одиночный снимок — на экран выводится любой из имеющихся снимков;
- панорама в виде цилиндрической или полярной азимутальной проекции;

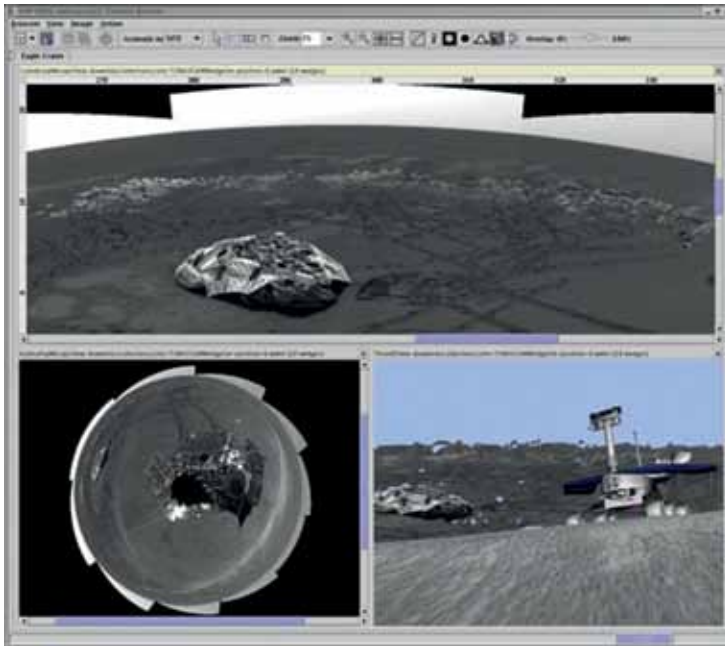


Рис. 2.2. Визуализация в SAP: цилиндрическая (вверху) и полярная азимутальная (внизу слева) проекции; трёхмерная сцена (внизу справа) [Norris et al., 2005]

- трёхмерная сцена, состоящая из трёхмерных моделей рельефа и марсохода.

Во всех перечисленных выше видах расстояния могут измеряться с помощью виртуальной линейки. Кроме того, для первых двух форм представления разработана возможность визуализации данных о высотах точек рельефа и расстояний до них в виде полупрозрачного изображения, накладываемого поверх изображения (например, поверх участков, достижимых для манипулятора ровера, накладывается полупрозрачное однотонное цветное изображение). На снимках также в случае необходимости могут быть отображены данные прибора Mini-TES (имеется также возможность визуализации этих данных в виде гиперспектрального куба). Обновление видов происходит по мере получения новых фотографий. Для визуализации результатов имитации проведения научных экспериментов используются графики, диаграммы, трёхмерные модели ровера/рельефа и др. Урезанная версия SAP (Maestro) находится в открытом доступе, её возможности ограничиваются просмотром фотографий с камер марсохода Opportunity и созданием упрощённых планов функционирования его научных инструментов.

На основании опыта, полученного при разработке и эксплуатации SAP, специалистами JPL (Jet Propulsion Laboratory) была создана система MSLICE (http://www.nasa.gov/centers/ames/research/msl_mslice.html), предназначенная для планирования учёными исследовательской деятельности ровера Curiosity. К уже существующему функционалу (с точки зрения отображения фотографий) [Powell, 2011] добавились возможность визуализировать скомбинированные снимки с камер марсохода и орбитального аппарата Mars Reconnaissance Orbiter (подгрузка изображений осуществляется по требованию клиента [Powell et al., 2010]), а также возможность имитации полёта над поверхностью Марса.

2.1.2. Визуализация как способ доступа к данным научных архивов

В ходе выполнения работ по проекту накапливается огромный объём научных данных, востребованность которых не ограничивается сроком функционирования КА. Для организации доступа к результатам научных космических миссий используются архивы. При их создании разработчики сталкиваются с целым рядом проблем, одной из которых является предоставление пользователям удобных и простых

средств работы с данными. Сложность решения данной задачи обусловливается, прежде всего, множественностью требований пользователей, а также различным уровнем их компетенции. В связи с этим один и тот же набор данных обычно можно получить более чем одним способом. Визуализация результатов выборки из архива является одним из таких способов.

Так, графические формы представления активно используется в ESA и NASA для организации доступа специалистов, а также широкой общественности к данным научных архивов. Например, для доступа к данным приборов OMEGA и HRSC миссии MARS EXPRESS архива ESA Planetary Science Archive (PSA) в ESA было разработано приложение MEX Map Browser. Его пользователю необязательно быть специалистом в планетной тематике: для осуществления поиска достаточно выбрать лишь регион интереса мышью на карте Марса, после чего результаты запроса будут представлены в графической форме (рис. 2.3а).

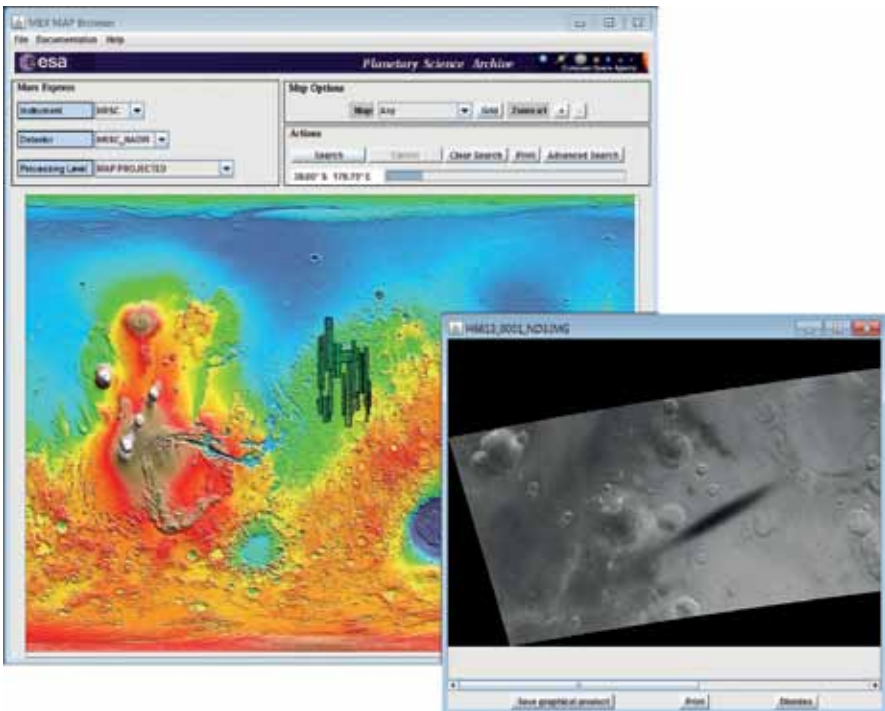
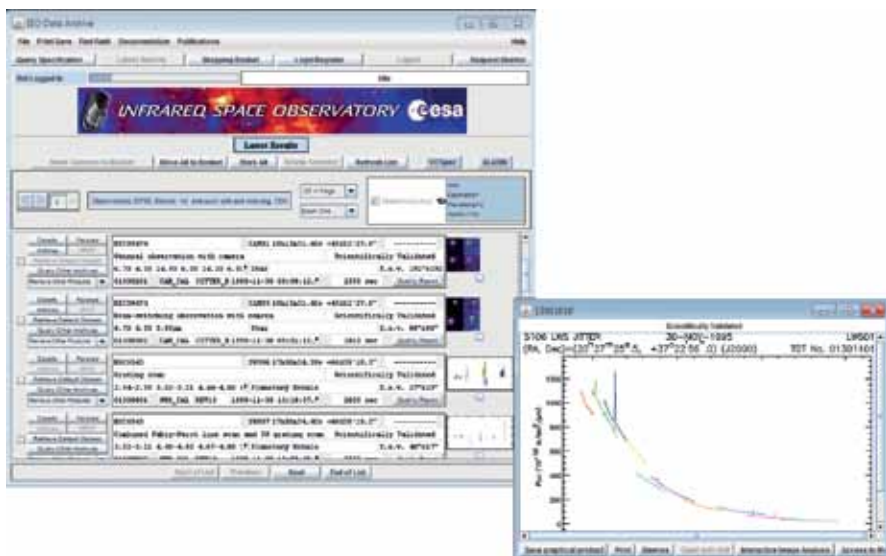
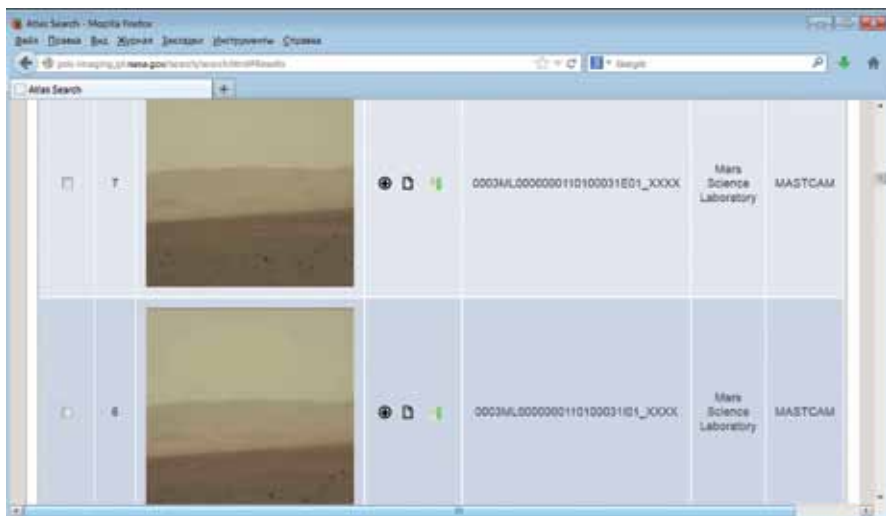


Рис. 2.3а. Визуализация результатов выборки из архива ESA PSA (MEX Map Browser) [ESA MEX, 2013]



б



в

Рис. 2.3. Визуализация результатов выборки из архива:
б – ISO Data Archive [ESA ISO, 2013]; *в* – NASA PDS [NASA PDS, 2013]

Концепция же, лежащая в основе визуализации данных астрономических архивов ESA, заключается в отображении рядом с каждой записью из поискового запроса иконки изображения для данной конкретной записи (в том случае, если оно есть в архиве) (рис. 2.3б). После щелчка на иконке пользователю будет предложен список программного обеспечения, в котором можно просмотреть полное изображение [Parrilla et al., 2008]. Схожая концепция визуализации данных поисковых запросов реализована и в архиве Planetary Data System (PDS) NASA (рис. 2.3в).

Как видно из приведённых выше примеров, графические формы представления результатов выборки из архивов обычно создаются под определённую группу пользователей и заранее ориентированы на решение ограниченного круга задач. Результатом подобной нацеленности является создание нескольких приложений для работы с одним и тем же набором данных, что усложняет работу пользователя с архивами в силу необходимости выбора подходящего под конкретную задачу и уровень его компетенции приложения, но в то же время предоставляет возможность выбора подходящего именно ему решения.

2.1.3. Визуализация как способ интерпретации результатов научных экспериментов

Завершающей стадией любого научного эксперимента является интерпретация данных, полученных в ходе его проведения. Процесс этот строго не формализуем, а, следовательно, не может быть выполнен полностью в автоматическом режиме. В этой связи визуализация полученных результатов измерений, а также промежуточных выкладок позволяет значительно упростить анализ данных, и, возможно, даже в некоторых случаях «подсказать» учёному дальнейшее направление исследований.

В литературе данный тип визуализации получил название научной визуализации. К методам, применяемым в данной области знаний, предъявляются требования не столько по качеству получаемой картинки (хотя и это немаловажно), а сколько по однозначному соответствию результата визуализации интерпретируемым результатам измерений. К тому же задача научной визуализации осложняется высокой размерностью данных, а также большим их объёмом. Таким образом, форма графического представления результатов научного эксперимента целиком и полностью зависит от характера данных и целей исследования.

В этой связи реализацией методов визуализации обрабатываемых данных на базе существующего программного обеспечения чаще всего занимаются сами экспериментаторы, особенно это характерно для первоначального этапа исследований. Однако зачастую данные системы общего назначения (например, MATLAB, Mathcad и другие) не справляются с поставленной задачей или же требуют трудозатрат, сравнимых с теми, что необходимы для решения самой задачи. В этой ситуации возникает необходимость в использовании универсально-специализированных систем, ориентированных на визуализацию объектов определённого типа, что впрочем, тоже не всегда решает проблему.

В научных космических исследованиях из-за сложности изучаемых объектов (явлений) принят подход, согласно которому под определённые задачи (и даже проекты) создаются свои собственные системы визуализации. Однако необходимо заметить, что новые решения обычно не разрабатываются с нуля, что зачастую позволяет снизить сроки и стоимость разработки на конкретном этапе. Вместе с тем следует понимать, что постепенное развитие существующих систем научной визуализации не всегда возможно и целесообразно вследствие отсутствия в настоящее время надежных знаний о наилучших способах представления результатов научных экспериментов. В заключение рассмотрим примеры некоторых графических форм представления данных в системах, применяемых ведущими космическими агентствами для анализа и обработки результатов космических миссий.

Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure (GIOVANNI) (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni#maincontent>). Веб-приложение, разработанное специалистами NASA, для визуализации и анализа данных с КА дистанционного зондирования Земли (КА NASA) и других параметров окружающей среды без необходимости загрузки этих данных на компьютер пользователя. Среди графических форм представления данных, поддерживаемых системой, графики, карты, анимации изображений и другие. Система открыта для публичного доступа.

Viz [Edwards et al., 2005]. Программное обеспечение, разработанное NASA, для анализа и визуализации особенностей рельефа планет. В системе поддерживаются не только трёхмерная и двухмерная графическая форма представления данных, но и стереовизуализации этих данных (анаглифический и эклипсный методы). При разработ-

ке системы особый упор делался на реалистичность визуализируемых сцен (моделирование условий освещения и другое). Кроме того, в системе предусмотрена возможность имитации действий планетоходов. Программное обеспечение использовалось учёными для анализа научных данных с роверов программы Mars Exploration Rover (MER).

2.1.4. Некоторые примеры программных средств визуализации данных ИКИ РАН

В большинстве научных космических проектов ИКИ РАН ответствен за разработку и проведение экспериментов на борту КА. Необходимым дополнением любого бортового космического эксперимента, как уже отмечалось ранее, является его наземный научный комплекс, созданием и вводом в эксплуатацию которого занимается сам институт. При этом состав наземного научного комплекса может варьироваться от проекта к проекту, однако общим для всех является наличие прикладного программного обеспечения, позволяющего организовать доступ специалистов (инженеров, учёных, экспериментаторов), а также широкой общественности (в случае необходимости) к требуемым данным. С этой целью используются различные формы представления данных, в том числе и графическая.

Так, визуализация имеющихся данных имеет место уже на стадии экспресс-обработки научной телеметрической информации (НТМИ). В основу графического представления НТМИ в системе экспресс-обработки НТМИ ИКИ РАН [Третьяков, 2011] положен принцип отображения имеющихся физических величин по каждому из приборов КНА на общей временной шкале (рис. 2.4). Формы представления при этом зависят от типа прибора, но в большинстве случаев для их создания используются простейшие графические примитивы (точки и отрезки), что объясняется требованием по обеспечению приемлемой скорости доступа пользователя к данным в условиях визуализации НТМИ большого объёма. Графический вывод в системе экспресс-обработки НТМИ осуществляется в браузер (система разработана как веб-приложение) и не требует установки каких-либо дополнительных плагинов.

Более разнообразные формы графического представления данных реализованы в системе, предназначенной «для визуализации и операций над событиями, упорядоченными во времени» [Марков и др., 2011].

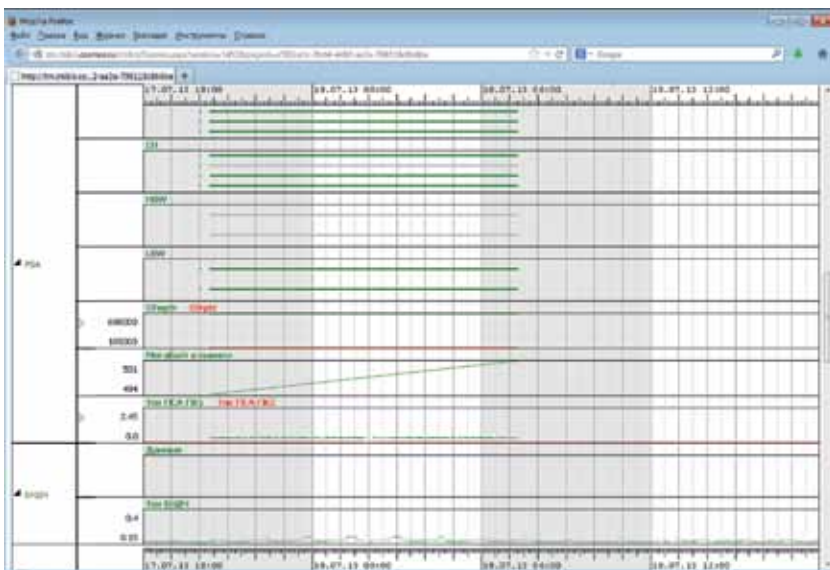


Рис. 2.4. Графическое представление НТМИ «Чибис-М» в системе экспресс-обработки НТМИ

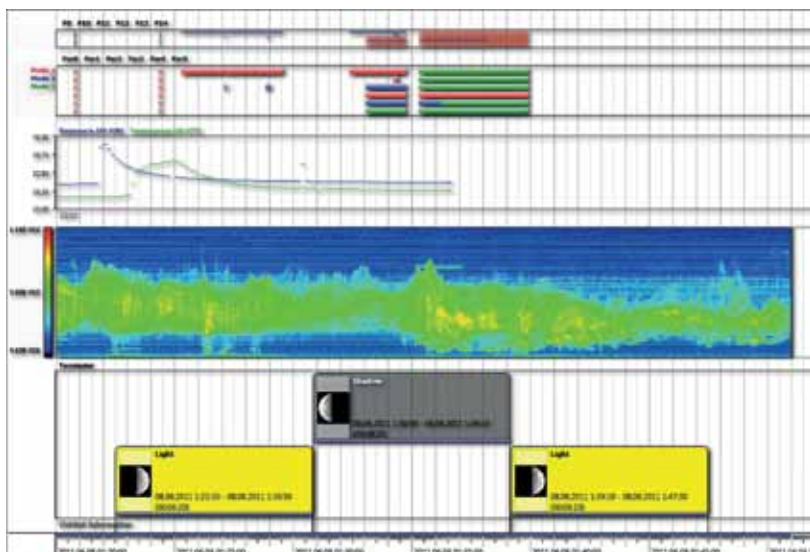


Рис. 2.5. Панели визуализации в системе, предназначенной «для визуализации и операций над событиями, упорядоченными во времени» [Марков и др., 2011]

Приложение используется группой управления КНА для составления краткосрочных и среднесрочных планов проведения научных экспериментов, а также экспериментаторами для анализа данных приборов. В системе визуализация осуществляется посредством использования разнообразных панелей. Каждая панель реализует свою собственную форму графического представления данных — некоторые визуализируют данные в виде графиков, другие — диаграмм и т. д. (рис. 2.5). Подобная организация содержимого соответствует идеологии компоновки Windows Presentation Foundation (WPF) — использовался для визуализации — и позволяет обеспечить расширяемость приложения — добавление новой графической формы сводится к созданию панели, её реализующей.

Значительную роль визуализация играет и в привлечении внимания широкой общественности к деятельности, проводимой в космосе. Специалистами ИКИ РАН для создания подобных визуализаций обычно используется либо то же программное обеспечение, что и для обработки НТМИ (см., например, графики результатов первичной обработки данных прибора БМСВ на КА «Спектр-Р» (проект РАДИОАСТРОН), созданных в приложении, описанном выше [Плазма-Ф, 2013]), либо специализированное программное обеспечение, основной и единственной задачей которого является объяснение того или иного этапа миссии в доступной, наглядной и интересной форме. Так, например, на сайте проекта ЧИБИС-М возможно следить за положением микроспутника, рассчитанным для каждого конкретного момента времени по модели SGP4 на основе орбитальных данных NORAD (North American Aerospace Defense Command) в формате TLE (Two-Line Element set) (<http://chibis.cosmos.ru/trajectory>). Данное веб-приложение разработано в ИКИ РАН как расширение приложения GoogleSatTrack 3.10.3 (в смысле функциональных возможностей) и предназначено для графического отображения расчётной трассы орбиты КА «Чибис-М», измерительных пунктов, задействованных в проекте, а также зон их радиовидимости на карте Земли (для её размещения на веб-странице использовался Google Maps API). Расчётное положение самого микроспутника показано на карте в виде его фотографии. Кроме этого на карте отображена линия терминатора Земли (неосвящённая часть показана как более тёмная область) (рис. 2.6). Размер выводимого изображения подстраивается под размер окна браузера.

Как видно из приведённого выше краткого обзора программного обеспечения, разработанного в ИКИ РАН для доступа специалистов и широкой общественности к данным научных космических проектов,



Рис. 2.6. Расчётная трасса орбиты микроспутника «Чибис-М» (19.08.2013) (<http://chibis.cosmos.ru/trajectory>)

визуализация данных ни в одном из приложений не является самоцелью. При решении задач наземного научного комплекса её основное предназначение, прежде всего, заключается в предоставлении возможности проведения визуального анализа имеющихся данных научно-инженерному составу проекта, а также в объяснении того или иного этапа миссии и (или) её результатов в наглядной и интересной форме широкой общественности в случае наличия такой необходимости.

2.2. Визуализация в задачах наземного комплекса управления

При планировании и управлении полётом КА ключевую роль играет оценка его состояния. Основным источником информации при этом являются данные, получаемые в процессе обработки и анализа ТМИ. Причём во многих ситуациях данные операции требуют участия человека, а, следовательно, и наличия программного обеспечения не только для обработки ТМИ, но и для её последующей визуализации. Традиционно для графического отображения ТМИ применяются двумерные графики и лишь недавно в практику использова-

ния вошла трёхмерная визуализация. Подобный выбор обусловлен, прежде всего, требованием получения в максимально короткий срок с момента события на борту КА (а лучше всего в реальном масштабе времени) достоверной и существенной информации о параметрах состояния аппарата.

В качестве примера системы, использующей двухмерные графики для визуализации ТМИ, можно привести Satellite Control and Operation System 2000 (SCOS-2000) (http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/SCOS-2000) [Witt et al., 2010]. SCOS-2000 — это универсальная система управления полётом КА, применяемая ESA для всех миссий, запущенных после августа 2002 г. (INTEGRAL, MARS EXPRESS и др.). Помимо прочего группами управления для анализа и визуализации первично обработанной ТМИ применяются специализированные клиентские приложения, разработанные под платформу MUST (Mission Utility And Support Tools) (http://www.esa.int/Our_Activities/Technology/Mission_Utility_and_Support_Tools_MUST). Рассмотрим некоторые из поддерживаемых в настоящее время MUST-клиентов, позволяющих отображать первично обработанную ТМИ в графическом виде: GRAINS, Virtual Spacecraft, WebMUST (http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Virtual_Spacecraft_br_Enhanced_Monitoring_Diagnostics_through_Virtual_Reality; http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/WebMUST_br_A_web-based_client_for_MUST) [Baumgartner et al., 2005].

GRAINS. Для визуализации ТМИ используются графики (рис. 2.7). Графический вывод осуществляется средствами MATLAB (существует также версия клиента JavaGrains на базе платформы Eclipse RCP (Rich Client Platform), где для графического вывода используется Java библиотека JFreechart). Перед началом работы требуется установка приложения (как GRAINS, так и JavaGrains) на компьютер пользователя.

Virtual Spacecraft. Веб-приложение, визуализирующее представленную определённым цветом ТМИ с датчиков системы терморегулирования, накладываемую на трёхмерную модель КА (рис. 2.8). Модели КА отображаются прозрачными, что позволяет оператору видеть их внутреннее содержание.

Также в приложении предусмотрены возможности вращения, масштабирования модели, перемещения по ней, изменения точки обзора. Приложение может быть использовано как для визуализации

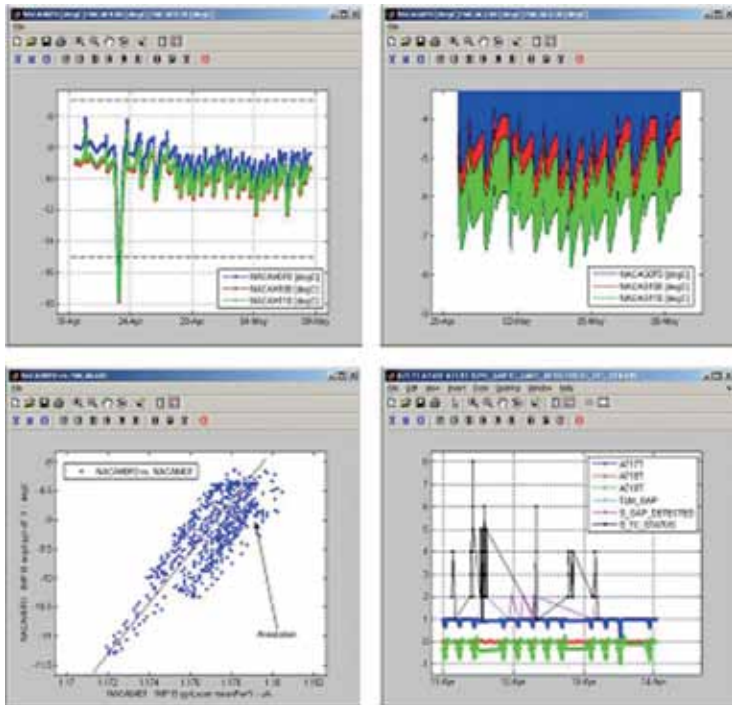


Рис. 2.7. Пример визуализации ТМИ в GRAINS (<http://spaceimages.esa.int/Images/2011/03/MUSTGrainsPlots>)



Рис. 2.8. 3D-модель Smart-1 с окрашенными термодатчиками. Цвета отражают фактическую температуру, получаемую из ТМИ (http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Virtual_Spacecraft_br_Enhanced_Monitoring_Diagnostics_through_Virtual_Reality)

ТМИ практически в режиме реального времени, так и для отображения уже полученной телеметрии.

WebMUST. Веб-приложение, для графического вывода использующее HTML5 (HyperText Markup Language, version 5) и CSS (Cascading Style Sheets). В настоящее время может запускаться из браузеров Google Chrome, Firefox и Safari и не нуждается в установке сторонних плагинов. Для визуализации большого объёма данных за приемлемый промежуток времени в WebMUST реализованы следующие методы [Oliveira et al., 2012].

Fixed time interval aggregation (группировка с равными интервалами времени). Для этой группировки первоначально выбирается шаг, с которым будет производиться разбивка всего временного интервала. Затем каждый из полученных интервалов сопоставляется с агрегированным значением (минимум, максимум или среднее) сигнала на этом интервале. После применения данного алгоритма исходный сигнал заменяется новой последовательностью с одним отсчётом на выбранный интервал, что приводит к уменьшению числа рисуемых точек, но и, как следствие, к потере части информации о сигнале (рис. 2.9).

Для ускорения визуализации агрегированные значения могут вычисляться заранее, ещё на этапе занесения данных в базу данных (БД). Такой подход, например, применяется в программном обеспечении Space Weather Information System for Operations (SEISOP), используемом ESA для мониторинга и анализа космической погоды. Однако в силу ограничений на размер БД WebMUST вычисляет агрегированные значения только по запросу, используя для этого агрегирующие функции системы управления БД.

Fractal resampling (фрактальное повторное квантование). Входными данными для алгоритма являются последовательность вида [время; значение] и величина максимально допустимой ошибки. На выходе получается новая последовательность [время; значение] с меньшим или тем же числом точек (не обязательно через равные промежутки времени), что и во входной последовательности (рис. 2.10). Причём полученные отсчёты являются реальными данными, для тех же из них, что не вошли в результирующую последовательность, гарантируется, что суммарная ошибка меньше заданной.

Алгоритм заключается в выполнении следующих шагов [Martínez-Heras et al., 2012]:

1. Первый и последний отсчёты исходной временной последовательности добавляются в список замещаемых точек.
2. Осуществляется линейная интерполяция между отсчётами из шага 1.
3. Для каждой точки из текущего сегмента вычисляется абсолютная ошибка между её действительным значением и значением, полученным в результате линейной интерполяции:
 - а) если значение ошибки больше или равно заданной, то данный сегмент необходимо заместить; замещение означает добавление средней точки к списку замещаемых и применение шага 2 к левой и правой части замещения;
 - б) если ошибка меньше заданной, то замещение не требуется.
4. В результате получается упорядоченный по времени список замещаемых точек.

Для WebMUST значение ошибки по умолчанию равно 1 % (значение [максимум – минимум] принимается за 100%), однако пользователь может её переопределить.

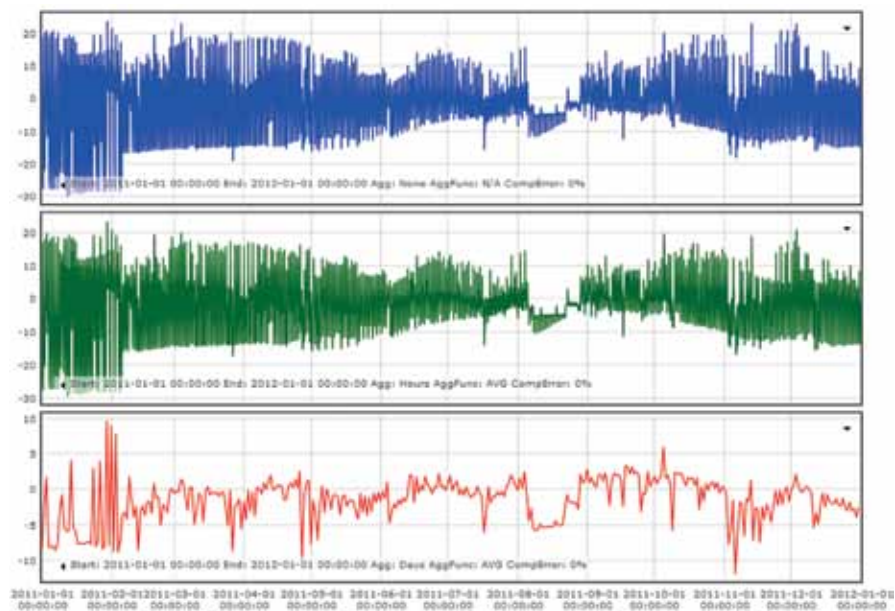


Рис. 2.9. Fixed time interval aggregation (первый график — исходный сигнал за год; второй — группировка с временным интервалом размером час; третий — группировка с временным интервалом размером день) [Oliveira et al., 2012]

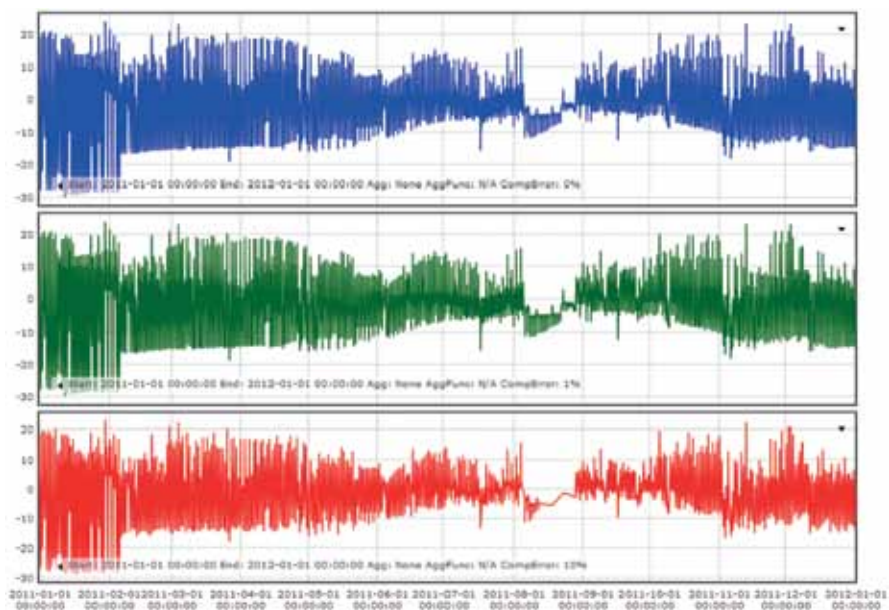


Рис. 2.10. Fractal resampling (первый график — исходный сигнал; второй — максимально допустимая ошибка 1 %; третий — максимально допустимая ошибка 10 %) [Oliveira et al., 2012]

Viewport resolution aggregation (VRA). Превышение числа отображаемых на графике отсчётов над количеством пикселей устройства вывода приводит к прорисовке невидимых для пользователя линий, а, следовательно, к увеличению задержек при отображении и неэффективному использованию вычислительных ресурсов. Подход, реализованный в VRA, заключается в прорисовке только видимых линий. Для этого каждый пиксел по оси абсцисс соотносится с временным интервалом, из которого затем выбираются следующие отсчёты:

- 1) первый отсчёт;
- 2) отсчёт с минимальным значением ординаты;
- 3) отсчёт с максимальным значением ординаты;
- 4) последний отсчёт.

Согласно VRA при выводе графика на устройство отображения прорисовываются только линия от последнего отсчёта (из предыдущего временного интервала) к первому и линия от минимального значения к максимальному (рис. 2.11). Визуально это эквивалентно отображению всех соединительных линий (рис. 2.12).

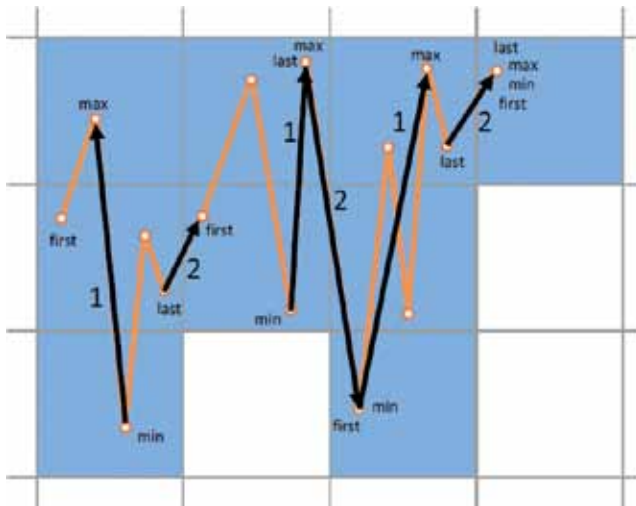


Рис. 2.11. Алгоритм рисования графика (синяя ячейка эквивалента одному пикселу) [Oliveira et al., 2012]

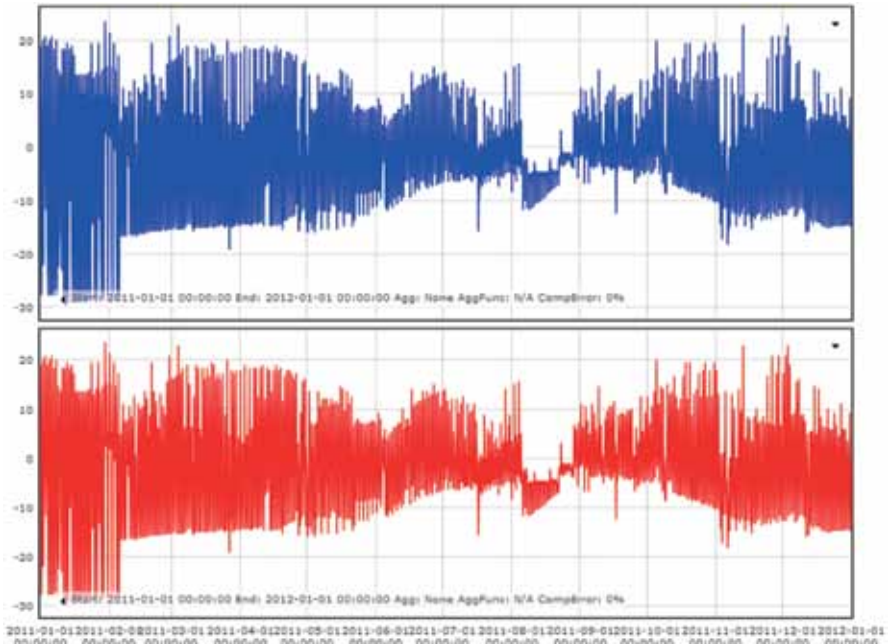


Рис. 2.12. VRA (первый график — исходный сигнал; второй — окно просмотра шириной в 912 пикселов) [Oliveira et al., 2012]

2.2.1. Визуализация как способ имитации полёта космического аппарата

Управление полётом КА всегда подразумевает создание некоей модели сценария управления и возможного развития событий, имитацию реального полёта, а также уже отработанных команд управления. В общем случае данные действия представляют собой довольно сложную задачу для оператора, особенно в режиме оперативного управления. Облегчить процесс для лица, принимающего решение, возможно, предоставив ему средства, позволяющие осуществлять визуализацию имитационных экспериментов. Так, например, инженерами NASA для миссий Fermi Gamma-ray Space Telescope (GLAST, 2008 г.) и Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO, 2009 г.) было разработано программное обеспечение для баллистико-навигационного сопровождения полёта КА [Stoneking et al., 2010].

Оба приложения, GLASTCam и LROCam, осуществляют визуализацию ТМИ в режиме реального времени, а также позволяют визуализировать прогнозируемые параметры полёта. С технической точки зрения графический вывод реализован на базе API OpenGL. Вследствие специфики решаемых в ходе миссий задач поддерживаемые способы визуализации ТМИ в приложениях незначительно различаются. Общими для GLASTCam и LROCam являются следующие способы графического представления информации, необходимой для оперативного управления:

- трёхмерная модель КА, которую пользователь может наблюдать с различных ракурсов (с Земли, Солнца, Луны); моменты раскрытия солнечных батарей и остронаправленной антенны определяются на основе ТМИ;
- карты Земли и Луны с проекцией орбиты КА, наземными измерительными пунктами и другими необходимыми данными; трасса орбиты рисуется либо на основе получаемой телеметрии (пунктирная линия), либо на основе прогноза эфемерид КА (сплошная линия).

Визуализация также упрощает проработку и последующую реконструкцию такой технически сложной операции как вход спускаемого аппарата в атмосферу, снижение и посадку. Специалистами JPL для имитации и визуализации данного процесса, а также для его последующей реконструкции было разработано специализированное программное обеспечение ETV — EDL (Entry, Descent and Landing) Telemetry Visualization [Pomerantz et al., 2012].

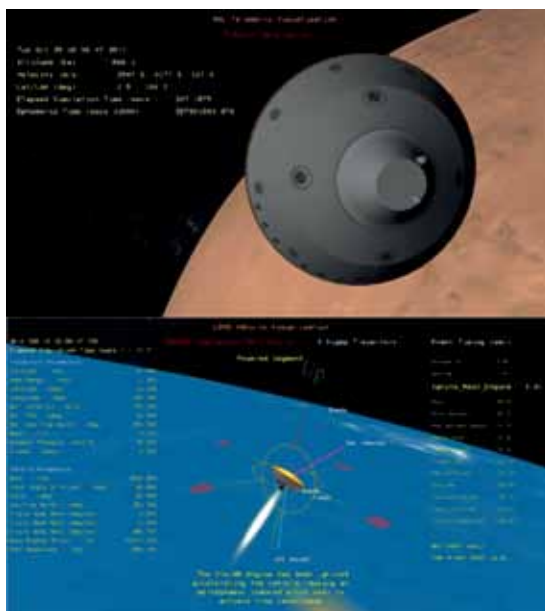


Рис. 2.13. Вид окон в ETV (<http://www-robotics.jpl.nasa.gov/tasks/showBrowseImage.cfm?TaskID=230&tdaID=700036>)

Графический вывод в ETV реализован на основе системы трёхмерной визуализации данных DSpace от JPL DARTS Lab (рис. 2.13). DSpace разработана на языке C++, доступ к её API осуществляется через SWIG (Simplified Wrapper and Interface Generator) (язык сценария Python). Помимо своего прямого назначения ETV использовалось для трансляции в прямом эфире посадки марсохода Curiosity на Марс в августе 2012 г.

2.2.2. Визуализация как способ оперативного планирования и управления движением планетохода

Планетные исследования часто помимо исследования планет с орбиты вокруг тела подразумевают и их исследование посредством планетоходов. Управление движением ровера по поверхности других планет достаточно трудоёмкая задача, прежде всего из-за неопределённости условий работы. В этом случае визуализация движения планетохода, а также окружающей среды позволяет облегчить дистанционное управление ровером с Земли.

Одними из самых последних, ещё функционирующих, планетоходов являются марсоходы NASA Opportunity (в рамках программы MER, 2004 г.) и Curiosity (миссия MARS SCIENCE LABORATORY (MSL), 2012 г.).

Для дистанционного управления обоими роверами специалистами JPL используется разработанное под ОС Linux программное обеспечение Rover Sequencing and Visualization Program (RSVP), но различных версий [Hartman et al., 2010]. Одно из центральных мест в нём занимает подсистема Hyperdrive, предназначенная для трёхмерной визуализации предполагаемых действий марсохода, упрощённой САПР модели самого ровера, а также окружающего ландшафта (рис. 2.14).

В качестве основного источника данных для Hyperdrive используются изображения с камер марсохода, на основании которых строится сетка ландшафта, а также производится её текстурирование (в некоторых случаях с целью выделения определённых свойств рельефа применяется специальное окрашивание). С технической точки зрения трёхмерная визуализация в версии Hyperdrive для MER реализована на основе API OpenGL Performer (разработчик Silicon Graphics), а для графического интерфейса пользователя использовались библиотеки GTK+ и libglade [Hartman, Maxwell, 2004]. Остановимся более подробно на режимах визуализации, поддерживаемых в версии Hyperdrive для MER, приводя там, где известно, сведения по Hyperdrive миссии MSL.

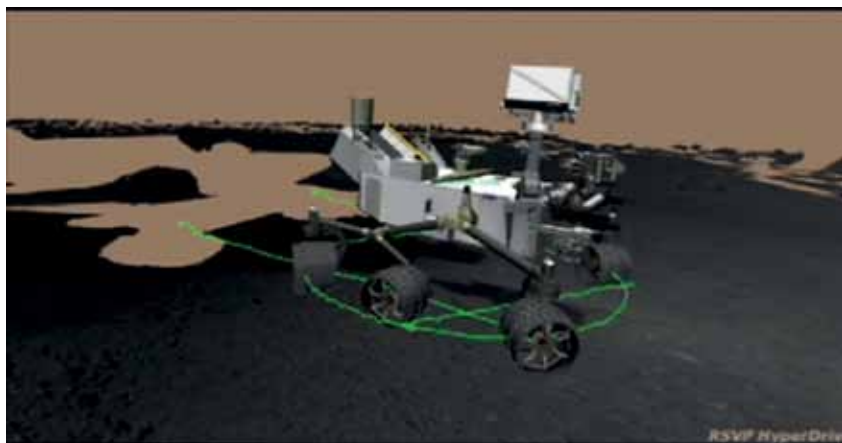


Рис. 2.14. Планирование первой пробной «поездки» Curiosity (22.08.2012) (<http://mars.jpl.nasa.gov/msl/multimedia/videos/index.cfm?v=79>)

Для имитации результатов планируемых команд управления в Hyperdrive предусмотрено несколько режимов визуализации [Hartman et al., 2010]. Первый из них позволяет оценить положение марсохода относительно рельефа, предоставляя оператору возможность наблюдения ровера и ландшафта из произвольной точки. Для генерации сетки в этом случае применяются алгоритмы стереорекострукции. Во втором режиме, позволяющем планировать передвижения ровера на большие дистанции, наряду с изображениями с камер используются синтезированные изображения, т.е. конструируется дополненная реальность. Для данного варианта поддерживается возможность работы в стереорежиме, причём для обеих версий в качестве способа сепарации ракурсов был выбран эклипсный метод (в Hyperdrive для MER используются ЖК-очки CrystalEyes [Wright et al., 2006], а для MSL — очки NVIDIA 3D VISION [Brown, 2012]). В третьем режиме на экран выводится предполагаемый вид с точки обзора одной из камер. В качестве такого вида используется ранее построенная модель местности вблизи планируемого места съёмки. Стоит заметить, что во всех рассмотренных режимах предусмотрена возможность визуализации освещения [Hartman et al., 2010].

Подсистема Hyperdrive используется также не только как средство визуализации планируемых команд управления, но и для отображения полученной телеметрии (<http://www-robotics.jpl.nasa.gov/news/newsStory.cfm?NewsID=61>). Кроме того в подсистеме реализован визуальный язык управления ровером. Так, те команды, результаты выполнения которых могут быть адекватно визуализированы, отображаются в виде трёхмерных иконок. Например, команда повернуть в том или ином направлении (для версии Hyperdrive программы MER) визуализируется в виде трёхмерной стрелки, расположенной в том месте, где она должна быть выполнена ровером, и указывающей на направление поворота [Maxwell et al., 2005].

На данный момент RSVP выбрано как средство управления посадочным аппаратом миссии NASA InSight (март 2016 г.) [Johnson, 2013].

3. ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ НАЗЕМНОГО СЕКМЕНТА НАУЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

Как уже отмечалось ранее, выбор метода визуализации целиком и полностью определяется структурой данных, а также поставленной

задачей. При этом под задачей понимается не только получение итоговой картинки, но и то, какими средствами требуется реализовать выбранный метод визуализации, иными словами, какое аппаратное и программное обеспечение необходимо конечному пользователю, а также разработчику.

3.1. Аппаратные средства визуализации данных

Основным техническим средством для визуализации данных является дисплей или видеотоображающие системы на их основе. В настоящее время существуют различные типы классификации дисплеев (например, по физическим принципам формирования изображения или по количеству воспроизводимых цветов), однако с точки зрения конечного пользователя наибольший интерес представляет собой классификация по области применения. Условно можно выделить следующие области применения дисплеев (систем на их базе) при решении задач наземного сегмента научных космических проектов:

- автоматизированное рабочее место (АРМ) специалиста (инженера, учёного, экспериментатора) индивидуального пользования;
- АРМ специалиста (инженера, учёного, экспериментатора) коллективного пользования.

3.1.1. Аппаратные средства визуализации данных для автоматизированного рабочего места специалиста индивидуального пользования

Видеотоображающие устройства, входящие в состав АРМ специалиста индивидуального пользования, предназначены для отображения информации для одного пользователя. Обычно в качестве таких устройств используются мониторы на базе TFT (*англ.* thin-film transistor — тонкоплёночный транзистор) ЖК-дисплея. Особенности воспроизведения изображения на таком дисплее в основном обусловлены технологией изготовления её матрицы (<http://cheklab.ru/archives/2534>). В настоящее время наиболее популярными являются матрицы, изготовленные по технологиям TN+film (Twisted Nematic+film), IPS (In-Place Switching) (или SFT — Super Fine TFT) и MVA (Multi-domain Vertical Alignment) (и её аналог PVA — Patterned Vertical Alignment). Для TN+film характерны минимальное время отклика, низкая стоимость, однако она имеет наименьшие из всех

представленных технологий углы обзора, а также невысокое качество цветопередачи. Мониторы на базе TN+film используются в основном для работ, не связанных с профессиональной обработкой изображений и видео. Однако, вместе с тем, на текущий момент TN+film — единственно возможный вариант для стереовизуализации данных на базе эклипсного способа сепарации ракурсов, что объясняется необходимостью минимизации временной задержки при выводе ракурса на экран. Матрицы семейств IPS и MVA лишены недостатков TN, но в среднем имеют большее время отклика по сравнению с TN. К тому же стоимость таких дисплеев значительно выше. Область применения IPS — это в основном профессиональная работа с цветом, также в последнее время на рынке появились стереоскопические мониторы (поляризационный способ) на базе данной технологии (например, см. http://www.nix.ru/computer_hardware_news/hardware_news_viewer.html?id=173537). Матрица MVA считается компромиссным решением между дорогостоящим IPS и неудовлетворительным по качеству цветопередачи TN+film, правда, лишь в том случае, когда нет необходимости в поддержке режима стереовизуализации данных на аппаратном уровне.

Кроме параметров, определяемых технологией изготовления матрицы (качество цветопередачи, углы обзора, время отклика, яркость и контрастность), существенное влияние на восприятие пользователем конечного результата визуализации данных оказывают такие характеристики ЖК-монитора как цветовой охват экрана, его диагональ, формат и рабочее разрешение. Так, цветовой охват монитора показывает, насколько богатую цветовую палитру в принципе может воспроизводить устройство. Данная характеристика зависит в первую очередь от типа используемой подсветки и в меньшей степени — от матрицы дисплея. Максимальная площадь визуализируемого изображения определяется величиной диагонали дисплея и его форматом, кроме того при выборе последнего параметра следует учитывать формат изображений, который предполагается показывать на экране. Рабочее разрешение дисплея соответствует физическому количеству пикселей по горизонтали и вертикали ЖК-матрицы. Разрешения, большие рабочего, недоступны, а в случае меньших используется интерполяция. Скорость и качество интерполяции при этом зависят от конкретной модели монитора.

В настоящее время в связи со снижением стоимости ЖК-мониторов, а также возможностью подключения к практически любой современной видеокарте более одного монитора (см., например, технологии Eyefinity и Surround от AMD и NVIDIA соответственно)

многие АРМ специалиста индивидуального пользования оборудуются мультимониторными системами. Основным преимуществом таких систем является увеличение площади рабочего пространства, что особенно полезно при крупномасштабной визуализации, а также в случаях активной работы сразу с несколькими графическими формами представления данных. Так, типичным примером использования мультимониторных систем в составе АРМ специалиста индивидуального пользования являются рабочие места операторов центра управления полётом (ЦУП) (рис. 3.1), оснащаемые по крайней мере двумя мониторами.

Незаменимы мультимониторные системы и при работе с системами виртуальной реальности, так как позволяют пользователю максимально глубоко погрузиться в виртуальный мир.

Например, для проекта МАРС-500 компанией «Группа Джей Си» был создан аппаратный комплекс, включающий два 26" монитора (рис. 3.2), предназначенный для моделирования деятельности космонавтов на поверхности Марса [Группа Джей Си, 2010]. К основному недостатку мультимониторных систем чаще всего относят снижение у пользователя концентрации вследствие постоянного переключения



Рис. 3.1. Стыковка ТПК «Союз-ТМА-09М» с МКС. ЦУП, Королёв, 29 мая 2013 г. (<http://www.federalsspace.ru/main.php?id=2&nid=20120>)



Рис. 3.2. Аппаратный комплекс для моделирования деятельности космонавтов на поверхности Марса (проект МАРС-500) [Группа Джей Си, 2010]

с одного монитора на другой. И если в задачах крупномасштабной визуализации это компенсируется возможностью охватить картинку в целом, а в случае активной работы сразу с несколькими графическими формами представления такое переключение в принципе необходимо, то, например, при анализе относительно небольшого объёма информации такая конфигурация, скорее всего, будет избыточна.

В заключение заметим, что в качестве видеоотображающих устройств в составе АРМ специалиста индивидуального пользования могут использоваться не только мониторы, но и различные устройства, оснащённые дисплеями для графического отображения анализируемых данных (например, шлемы виртуальной реальности, смартфоны, дисплеи различных измерительных приборов и др.).

3.1.2. Аппаратные средства визуализации данных для автоматизированного рабочего места специалиста коллективного пользования

Основным предназначением видеоотображающих устройств, входящих в состав АРМ специалиста коллективного пользования, является отображение информации более чем для одного пользователя одно-

временно. А так как работа с экранами стандартного размера для нескольких пользователей является затруднительной, то с этой целью обычно используются панели большой площади (ЖК или плазменные экраны с диагональю более 50"), проекционные системы или видеостены.

Основным преимуществом отображающих устройств первого типа является то, что они не требуют специальной сборки и вместе с тем позволяют получать картинку высокого качества. Однако средняя длина диагонали таких дисплеев обычно не превышает 80". Площадь же экранов проекционных систем и видеостены практически не ограничена сверху, но в обоих случаях необходима специальная сборка. Так, в состав любой проекционной системы входят проекционный экран, один или несколько видеопроекторов. В зависимости от взаимного расположения экрана, проектора(ов) и зрителей различают системы прямой (проектор(ы) и зрители располагаются по одну сторону экрана) и обратной (проектор(ы) и зрители находятся по разные стороны экрана) проекции. Третий тип устройств — видеостена — представляет собой систему видеоотображающих устройств (проекционные видеокубы, ЖК или плазменные дисплеи), которые объединены друг с другом в единый экран, разрешение которого определяется количеством и разрешением составляющих её модулей. При этом на качество итоговой картинки влияет не только тип и разрешение модуля, но и толщина его окантовки, так как стыки между дисплеями визуальнo искажают изображение (толщину шва необходимо учитывать при формировании вывода), кроме того, зазоры между экранами при длительном просмотре приводят к повышенной утомляемости пользователя.

Как можно заметить из приведённого выше краткого обзора, количество аппаратных способов отображения информации для коллективного просмотра довольно велико. А выбор того или иного типа устройства отображения обычно обуславливается не только свойствами визуализируемой сцены (статичная или динамичная, требуемый уровень детализации и т. п.) и форматом сигнала, но и количеством пользователей, использующих устройство одновременно, площадью и интерьером помещения, условиями освещения во время просмотра, стоимостью оборудования и другими характеристиками. Так, панели большой площади в силу ограниченности своего размера подходят для работы не более чем 3-5 пользователей одновременно (в зависимости от длины диагонали), в то время как количество пользователей видеостены или проекционной системы зависит только от площади этой видеостены/экрана. Однако стоимость таких

панелей значительно ниже, они не требуют специальной сборки, просты в управлении и занимают меньше места. Проекционные системы и видеостены ориентированы на помещения большой площади. В общем случае видеостены проще в управлении, так как для крупномасштабной визуализации посредством проекционных систем обычно необходима совместная работа нескольких проекторов, что влечёт за собой необходимость согласования яркости и цветности в области сшивки.

Панели большой площади обычно применяются для оборудования переговорных, конференц-залов, в качестве информационных табло и др. Область же применения видеостен и проекционных систем довольно широка: от оперативного планирования и управления полётом КА (см. рис. 3.1) до анализа данных посредством научной визуализации.

3.2. Программные средства визуализации данных

Некоторые примеры прикладных приложений, используемых для визуализации данных при решении задач наземного сегмента научных космических проектов, были рассмотрены в разд. 2, остановимся теперь более подробно на программном обеспечении, позволяющем создавать подобные системы.

В основе большинства настольных прикладных программ, реализующих графический вывод, лежат DirectX и OpenGL. DirectX — это набор API, разработанный Microsoft, позволяющий осуществлять двухмерную и трёхмерную визуализацию данных на базе платформы Windows. OpenGL же, в отличие от DirectX, — это спецификация, описывающая набор функций и их точное поведение, используемых для написания приложений с трёхмерной и двухмерной графикой. Конкретными реализациями спецификации OpenGL обычно занимаются разработчики видеокарт, при этом все функции в основном реализуются на аппаратном уровне, а в том случае, если такой возможности нет, эмулируются программно. Подобная идеология позволяет OpenGL быть кроссплатформенным и не привязанным к конкретному языку программирования, однако в тоже время это влечёт за собой накладные расходы, связанные с довольно длительной процедурой внесения изменений в стандарт.

Структуры DirectX и OpenGL для разработчика принципиально различны. Так, DirectX основан на модели COM, тогда как ядро OpenGL является процедурным. Следование DirectX моде-

ли COM влечёт за собой в общем случае снижение читабельности кода. Именно в силу своей сложности DirectX практически никогда не использовался для построения графических интерфейсов клиентских приложений Windows [Мак-Дональд, 2011], с целью решения этой проблемы Microsoft было разработано высокоуровневое API WPF для платформы .Net. К основным преимуществам WPF (только в смысле графики) относят аппаратное ускорение визуализации через DirectX, независимость от разрешения, декларативный графический пользовательский интерфейс, отрисовку элементов не посредством пикселей, а с помощью примитивов, поддержку анимации и другое.

Однако использование графических API не всегда целесообразно, особенно, когда от разрабатываемого настольного приложения требуется наличие стандартного функционала в смысле визуализации (например, графиков, диаграмм и т.п.). В этой ситуации обычно принято использовать различные пакеты прикладных программ. Например, одним из таких пакетов является MATLAB, предназначенный для автоматизации инженерных и научных вычислений. Набор встроенных в MATLAB функций визуализации данных довольно разнообразен: от 2D- и 3D-графиков функций до создания анимированных роликов. Кроме того, преимуществом среды является наличие одноимённого интерпретируемого языка программирования, позволяющего ускорить по сравнению с традиционными языками программирования процесс написания новых алгоритмов. Близким по набору функций визуализации к языку программирования MATLAB является язык программирования IDL, популярный в определённых областях науки. Например, IDL широко распространён в астрономии, что объясняется большим количеством готовых библиотек на нём, предназначенных для обработки и анализа астрономических данных.

Возможности же веб-приложений в плане визуализации данных не столь богаты, как у настольных приложений. В настоящее время для добавления графики на страницу существует два подхода. Согласно первому, на клиентскую машину передаются лишь растровые изображения, сформированные на сервере, во втором же случае изображения создаются на стороне клиента. Ключевое различие (в смысле визуализации) между первым и вторым подходом заключается в отсутствии (в первом случае) и наличии (во втором случае) возможности создания динамического контента. Причём до недавнего времени основной способ создания анимаций состоял в использовании плагинов вроде Flash или Silverlight. Довольно часто также

применялся (и продолжает применяться) подход, заключающийся в формировании интерактивных визуализаций посредством сочетания HTML, JavaScript и CSS. Ещё один из способов создания динамического контента подразумевает использование HTML5. К его основным преимуществам, прежде всего, относят нативную поддержку HTML5 (в той или иной степени) всеми современными версиями популярных браузеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Визуализация является одним из самых распространённых и наглядных способов анализа полученных данных. Выбор метода визуализации при этом зависит от характера данных, решаемой задачи, а также от предполагаемой области использования результатов данной визуализации.

При решении задач наземного сегмента научного космического проекта визуализация обрабатываемых данных не является самоцелью. Её основное предназначение заключается в предоставлении возможности проведения визуального анализа данных научно-инженерному составу проекта, а также в объяснении в случае необходимости того или иного этапа миссии и (или) её результатов в наглядной и интересной форме широкой общественности.

Специфика применения визуализации при решении задач наземного сегмента во многом определяется предполагаемой областью использования её результатов. Так, особенность применения визуализации при решении задач наземного научного комплекса заключается в том, что в большинстве случаев она носит отложенный характер, т. е. результат не требуется сразу же после события на борту КА. При решении же задач наземного комплекса управления результат должен быть получен в максимально короткий срок с момента события (а лучше всего в реальном масштабе времени). Данные различия во многом предопределили подход, согласно которому под определённые задачи (и даже проекты) создаются свои собственные системы визуализации. Причем новые решения разрабатываются преимущественно не с нуля, что зачастую позволяет снизить сроки и стоимость разработки на конкретном этапе. Кроме того, при разработке новых систем и развитии уже существующих обычно стараются придерживаться единообразного способа взаимодействия как пользователя с системой, так и систем между собой.

ЛИТЕРАТУРА

- [БЭС, 2000] Большой энциклопедический словарь (БЭС). 2-е изд., перераб. и доп. М.: Большая Российская энциклопедия; СПб.: Норинт, 2000.
- [Группа Джей Си, 2010] Группа Джей Си. Современные марсианские хроники // *Аэрокосм. обозрение*. 2010. № 5. С. 74–76.
- [Мак-Дональд, 2011] *Мак-Дональд М.* WPF 4: Windows Presentation Foundation в .Net 4.0 с примерами на С# 2010 для профессионалов. М.: Изд. дом «Вильямс». 2011. С. 26–30.
- [Марков и др., 2011] *Марков Я., Назаров В., Якушкин П.* Концепция реализации «толстого» клиента для визуализации и операций над событиями, упорядоченными во времени: докл. // Выездной семинар «Механика, управление и информатика» (секция «Наземные средства обеспечения перспективных научных космических проектов — проблемы и перспективы»). 5–8 июля 2011. Таруса, Калужская обл. [Электронный текст]. 2011. URL: <http://www.iki.rssi.ru/seminar/2011070508> (дата обращения 07.10.2013).
- [Плазма-Ф, 2013] Экспресс-визуализация данных первичной обработки данных прибора БМСВ // Плазменно-магнитный эксперимент «Плазма-Ф» на КА «Спектр-Р». Проект РАДИОАСТРОН. 2013. [Электронный текст]. URL: <http://www.plasma-f.cosmos.ru/bmsw-express-vis> (дата обращения 07.10.2013).
- [Третьяков, 2011] *Третьяков А.* Система экспресс-обработки НТМИ: докл. // Выездной семинар «Механика, управление и информатика» (секция «Наземные средства обеспечения перспективных научных космических проектов — проблемы и перспективы»). 5–8 июля 2011. Таруса, Калужская обл. [Электронный текст]. 2011. URL: <http://www.iki.rssi.ru/seminar/2011070508> (дата обращения 07.10.2013).
- [Форсайт, Понс, 2004] *Форсайт Д., Понс Ж.* Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. С. 837.
- [Шапиро, Стокман, 2006] *Шапиро Л., Стокман Дж.* Компьютерное зрение / Пер. с англ. А.А. Богуславского; под ред. С.М. Соколова. М.: Бином. Лаборатория знаний. 2006. С. 608–614, 685–688.
- [Almeida et al., 2012] *Almeida M., Costa M., Cardesín A., Altobelli N.* Solar system operations lab for constructing optimized science observations // SpaceOps 2012 Conf. Proc. June 2012, Stockholm, Sweden.
- [Baumgartner et al., 2005] *Baumgartner A., Heras J.M., Donati A., Quintana M.* MUST — a platform for introducing innovative technologies in operations // Proc. 8th Intern. Symp. Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space. Sept. 2005, Munich, Germany.
- [Brown, 2012] *Brown K.* NASA team drives Mars rover like a 3D game. [Электрон. текст]. 2012. URL: <http://blogs.nvidia.com/2012/08/nasa-team-drives-mars-rover-like-a-3d-game> (дата обращения 07.10.2013).

- [Brumfitt et al., 2011] *Brumfitt J., Gomez-Alvarez P., Villacorta A., Garcia-Lario P., Lorente R., O'Rourke L.* Herschel Mission Planning Software. 2011. [Электрон. текст]. URL: <http://arxiv.org/pdf/1106.3245v1.pdf> (дата обращения 07.10.2013).
- [Dubois, 2000] *Dubois E.* Generation of anaglyph stereoscopic images [Электрон. ресурс]. 2000. URL: http://www.site.uottawa.ca/~edubois/anaglyph_000614.pdf (дата обращения 07.10.2013).
- [Edwards et al., 2005] *Edwards L., Sims M., Kunz C., Lees D., Bowman J.* Photo-realistic terrain modeling and visualization for Mars Exploration Rover science operations // Proc. IEEE Systems, Man and Cybernetics. Oct. 2005, Hawaii, USA.
- [ESA ISO, 2013] ISO Data Archive. 2013. [Электронный ресурс]. URL: <http://iso.esac.esa.int/ida/#> (дата обращения 07.10.2013).
- [ESA MEX, 2013] Map-based Search Interface. 2013. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=PSA&page=map> (дата обращения 07.10.2013).
- [Hartman et al., 2010] *Hartman F., Cooper B., Maxwell S., Wright J., Yen J.* A Commanding and visualization software suite for controlling the Mars rovers and other planetary robots // J. Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics. 2010. V. 14. N. 1. P. 4–12.
- [Hartman, Maxwell, 2004] *Hartman F., Maxwell S.* Driving the Mars Rovers [Электрон. ресурс] // Linux Journal. Sept. 01, 2004. URL: <http://www.linuxjournal.com/article/7570> (дата обращения 07.10.2013).
- [Johnson, 2013] *Johnson P.* RSVP Required: The Code that Drives the Mars Curiosity Rover [Электрон. ресурс] // IT World. 2013. URL: <http://www.itworld.com/mobile-wireless/334372/rsvp-required-code-drives-mars-curiosity-rover?page=0,0> (дата обращения 07.10.2013).
- [Luna, 2008] *Luna F.D.* Introduction to 3D game programming with DirectX 10. Plano: Wordware Publishing, Inc., 2008. P. 395.
- [Martínez-Heras et al., 2012] *Martínez-Heras J., Francisco T., Donati A.* More observability for less bandwidth ...Where's the trick? // SpaceOps 2012 Conf. Proc. June 2012, Stockholm, Sweden.
- [Maxwell et al., 2005] *Maxwell S., Cooper B., Hartman F., Wright J., Yen J.* The Best of Both Worlds: Integrating Textual and Visual Command Interfaces for Mars Rover Operations [Электрон. ресурс] // Jet Propulsion Laboratory California Inst. of Technology. Oct. 2005. URL: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/handle/2014/37504> (дата обращения 07.10.2013).
- [NASA PDS, 2013] Welcome to the PDS: The Planetary Data System. 2013. [Электрон. ресурс]. URL: <http://pds.nasa.gov> (дата обращения 07.10.2013).
- [Nazirov et al., 2012] *Nazirov R., Nazarov V., Kazakevich Yu., Shirshakov A., Elshansky L., Voron V.* Open architecture of the space operations in the pro-

- spective Russian science missions // SpaceOps 2012 Conf. Proc. June 2012, Stockholm, Sweden.
- [Norris et al., 2005] *Norris J., Powell M., Vona M., Backes P., Wick J.* Mars Exploration Rover operations with the Science Activity Planner // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation. April 2005, Barcelona, Spain.
- [Oliveira et al., 2012] *Oliveira H., Lais A., Francisco T., Donati A.* Enabling visualization of large telemetry data sets // SpaceOps 2012 Conf. Proc. June 2012, Stockholm, Sweden.
- [Parrilla et al., 2008] *Parrilla E., Ortiz I., Freschi M., Barbarisi I., Osuna P., Arviset C., Salgado J.* Data visualization in the ESA Science Archives and ESA Virtual Observatory // Astronomical Data Analysis Software and Systems (ADASS) XVII. 2008. V. 394. P. 331–334.
- [Pomerantz et al., 2012] *Pomerantz M., Lim C., Myint S., Woodward G., Balaram J., Kuo C.* Multi-Mission Simulation and Visualization for Real-time Telemetry Display, Playback and EDL Event Reconstruction // Proc. AIAA Space 2012 Conf. and Exposition. Sept. 2012, Pasadena, California, USA.
- [Powell et al., 2010] *Powell M., Rossi R., Shams K.* A Scalable Image Processing Framework for gigapixel Mars and other celestial body images // Proc. IEEE Aerospace Conf. Mar. 2010, Big Sky, MT, USA.
- [Powell, 2011] *Powell M.* Innovations and integrations: applying trendy technologies to NASA mission operations planning // Proc. QCon Conf. March 2011, London, UK.
- [Stoneking et al., 2010] *Stoneking E., Shah N., Chai D.* Real-time visualization of spacecraft telemetry for the GLAST and LRO missions // SpaceOps 2010 Conf. Proc. May 2010, Huntsville, Alabama, USA.
- [Witt et al., 2010] *Witt R., Fritz M., Kuwahara T., Brandt A., Laurel C., Röser H.-P., Eickhoff J.* Real-time 3D visualization in satellite development // Proc. 4th Intern. Conf. Astrodynamics Tools and Techniques. May 2010, Madrid, Spain.
- [Wright et al., 2006] *Wright J., Hartman F., Cooper B., Maxwell S., Yen J., Morrison J.* Driving on the Surface of Mars with the Rover Sequencing and Visualization Program [Электрон. ресурс]. 2006. URL: http://www-dial.jpl.nasa.gov/public_html/john/papers/Robotics_Journal/JRW_5011_1.pdf (дата обращения 07.10.2013).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Методы визуализации данных	3
1.1. Методы двухмерной визуализации данных	4
1.2. Методы трёхмерной визуализации данных	7
1.3. Методы стереовизуализации данных	9
2. Визуализация в задачах наземного сегмента научных космических проектов	12
2.1. Визуализация в задачах наземного научного комплекса	12
2.1.1. Визуализация как способ планирования проведения научных экспериментов.	13
2.1.2. Визуализация как способ доступа к данным научных архивов	16
2.1.3. Визуализация как способ интерпретации результатов научных экспериментов.	19
2.1.4. Некоторые примеры программных средств визуализации данных ИКИ РАН	21
2.2. Визуализация в задачах наземного комплекса управления	24
2.2.1. Визуализация как способ имитации полёта космического аппарата	31
2.2.2. Визуализация как способ оперативного планирования и управления движением планетохода	32
3. Программные и аппаратные средства визуализации данных в задачах наземного сегмента научных космических проектов	34
3.1. Аппаратные средства визуализации данных	35
3.1.1. Аппаратные средства визуализации данных для автоматизированного рабочего места специалиста индивидуального пользования	35

3.1.2. Аппаратные средства визуализации данных для автоматизированного рабочего места специалиста коллективного пользования	38
3.2. Программные средства визуализации данных.	40
Заключение	42
Литература	43

Корнева Наталья Николаевна — ведущий программист.

Назаров Владимир Николаевич — начальник лаборатории 801.