

# СИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИНДУЦИРОВАННОГО ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМОСА: СОСТОЯНИЕ ПРОЕКТА

Владимир Алешин<sup>(1)</sup>, Валерий Афанасьев<sup>(2)</sup>, Дмитрий Байгозин<sup>(3)</sup>, Юрий Батулин<sup>(4)</sup>, Александр Бугаев<sup>(3)</sup>, Сергей Бурлаков<sup>(1)</sup>, Мартин Гёбель<sup>(1)</sup>, Борис Долговесов<sup>(5)</sup>, Александр Жирнов<sup>(3)</sup>, Станислав Клименко<sup>(6)</sup>, Михаил Михайлюк<sup>(7)</sup>, Игорь Никитин<sup>(1)</sup>, Ляля Никитина<sup>(1)</sup>, Мартин Райзер<sup>(8)</sup>, Евгений Слободюк<sup>(6)</sup>.

<sup>(1)</sup>Институт физико-технической информатики, Россия; <sup>(2)</sup>Центр управления полетами и моделирования, Россия; <sup>(3)</sup>Московский физико-технический институт, Россия; <sup>(4)</sup>Центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина, Россия; <sup>(5)</sup>Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Россия; <sup>(6)</sup>Институт космических исследований РАН, Россия; <sup>(7)</sup>Институт микропроцессорных вычислительных систем РАН, Россия; <sup>(8)</sup>Фраунгоферовский институт мультимедиакоммуникаций, Санкт-Августин, Германия

[klimenko@sim.ol.ru](mailto:klimenko@sim.ol.ru)

## Аннотация

Материал содержит освещение состояния разработки системы реконструкции и отображения поведения объектов в индуцированной виртуальной среде для задач исследования космоса в рамках проектов, поддерживаемых РФФИ (гранты 04-07-90039 и 04-07-90423).

Визуализацию индуцированной виртуальной среды (ИВС, Induced Virtual Environment - IVE) можно рассматривать как перспективную технологию, сочетающую в себе ряд возможностей уже существующих технологий Telepresence (телеприсутствие) и Augmented Reality (усиленная реальность), но в отличие от них предназначенную прежде всего для трехмерной «визуализации невидимого» средствами виртуальной реальности на основе реконструкции состояния космических орбитальных и планетных аппаратов по данным телеметрии в реальном времени, реконструкции рельефа планет по данным орбитального сканирования поверхности, реконструкции состояния атмосфер и магнитосфер планет и светил и т.п.

К системам визуализации ИВС для задач исследований космоса (в особенности, для центров управления полетами) предъявляются повышенные требования к адекватности и точности реконструкции состояния объектов наблюдения и к точности формирования изображений виртуальной среды.

**Ключевые слова:** индуцированная виртуальная среда, ИВС, телеприсутствие, вектор состояния, редукция и реконструкция состояния, распределенная система визуализации ИВС.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные исследования космоса связаны с обработкой больших объемов информации, поступающих из различных источников – телеметрических систем орбитальных и планетных космических аппаратов, наземных и орбитальных измерительных станций, систем мониторинга атмосфер планет, околопланетного пространства и т.д. Для оперативной обработки и эффективного использования этой информации необходимо привлечение технологий, облегчающих ее восприятие, и позволяющих организовать синхронизированный доступ к этой информации многих

исследователей. Часто большие трудности при интерпретации и принятии решений возникают при обработке информации в виде числовых массивов - данных телеметрии, траекторных данных и т.п. Восприятие и скорость обработки таких данных человеком существенно облегчается, если преобразовать их в форму трехмерных образов и осуществить погружении оператора в трехмерное окружение (виртуальную 3D-среду). При этом важно, что виртуальное окружение может быть использовано для наблюдения за реальной средой даже при отсутствии оптических средств прямого наблюдения. Для такой возможности необходимы, в частности, два условия - виртуальное окружение должно с достаточно высокой точностью копировать физическую среду и ее объекты, и, кроме этого, в реальном времени должны быть доступными необходимые данные о поведении физических объектов. В общем случае полное выполнение этих условий, как правило, невозможно, однако, в некоторых частных случаях, в том числе для техногенных систем, указанные условия можно обеспечить за счет использования априорной информации об объектах мониторинга (технические данные) и апостериорной информации о поведении объектов (данные телеметрии).

Существенно, что при некоторых обстоятельствах система визуализации поведения 3D-моделей на основе реконструкции поведения реальных объектов-прототипов может иметь гораздо большие возможности, чем традиционные телевизионные системы, благодаря принципиальному отсутствию ограничений на свободу перемещения и выбора ракурса наблюдения, а также отсутствию требований к условиям освещенности и оптической видимости.

Среди других важных преимуществ использования систем визуализации виртуального окружения для наблюдения за физическими средами необходимо отметить такие, как замена транспортировки растра на транспортировку вектора состояния (их объемы могут отличаться на несколько порядков), а также возможность организации произвольного разделяемого доступа в виртуальное окружение для любого числа наблюдателей.

Среди наиболее важных задач при создании такой системы можно указать, в частности, такие, как разработка высокоточных 3D-моделей объектов мониторинга;

разработка моделей состояния и поведения объектов мониторинга; разработка протоколов транспортировки и трансляции векторов состояния объектов мониторинга; разработка подсистем управления поведением моделей объектов мониторинга и ряд других.

## 2. МОДЕЛЬ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ

В системах мониторинга состояния технических объектов функции слежения за состоянием, как правило, возлагаются на специализированную систему, регистрирующую в режиме реального времени показания датчиков, которыми оснащены наблюдаемые объекты (систему телеметрии). Адекватность реконструкции состояния объекта мониторинга по данным телеметрии определяется релевантностью набора параметров, регистрируемых системой телеметрии и точностью регистрации. Телеметрические системы для космической техники разрабатывались в расчете на получение максимально полной картины поведения «наблюдаемого» объекта в отсутствии возможности прямого контакта с этого объекта (в том числе визуального). Поэтому в телеметрических данных, как правило, содержится информация, из которой непосредственно или косвенно можно получить необходимые данные о состоянии объекта и его элементов. Точность реконструкции состояния может зависеть (кроме точности регистрации) еще от природы связей внутренних связей объекта и подхода к их моделированию.

### 2.1 Вектор пространственного состояния

В данном случае рассматривается *пространственное состояние* объекта - его положение и ориентация в некоторой системе координат (не только как единого целого, но и всех его элементов, которые могут двигаться автономно). Вектор пространственного состояния объекта можно представить в виде набора векторов  $\{p_j\}$  с концами в узлах полигонального приближения поверхности объекта. Для описания полигональных поверхностей объектов со сложными кинематическими системами используется иерархическая система описаний  $\{\{p_j\}\}$  фрагментов поверхности в локальных системах координат элементов кинематической системы  $\{k_i\}$  (координатных фреймов). При этом множество описаний связей узлов  $\{\{L_j\}\}$  с системами координат фреймов можно рассматривать как априорную информацию о состоянии. Связи могут быть не только статичными, но и зависеть от времени, координат и других параметров (L следует рассматривать как некоторый оператор).

### 2.2 Редукция и реконструкция состояния

Заметим, что с точки зрения регистрации и транспортировки данных о состоянии множество  $\{\{p_j\}\}$  является избыточным. Поскольку связь между векторами узлов полигонального приближения поверхности и координатными фреймами известна, для регистрации и транспортировки данных о состоянии объекта достаточно использования данных о координатных фреймах – *редуцированного вектора пространственного состояния*.

Редуцированный вектор пространственного состояния объекта можно представить в виде множества пар векторов  $\{(s,r)\}$ , соответственно задающих положение и ориентацию (или матриц  $\{T_i\}$  их движения) объектов, состояние которых *непосредственно доступно для слежения и регистрации*. Эти объекты удобно сопоставить с координатными фреймами,

являющимися элементами иерархической системы, граф которой изоморфен одному из деревьев структуры объекта (в том числе, дереву его кинематической системы). Для элементов конструкции, которые не позволяют регистрировать их состояние непосредственно, это состояние может быть реконструировано по косвенным априорным данным (считается, что эти данные доступны). Заметим, что размерности множеств  $\{\{p_j\}\}$  и  $\{(s,r)\}$  (или  $\{T_i\}$ ) могут отличаться на несколько порядков.

После получения потребителем редуцированного вектора состояния на основе априорных данных  $\{\{L_j\}\}$  о связях векторов из множества  $\{\{p_j\}\}$  с локальными системами координат  $\{k_i\}$  производится «реконструкция на месте» полного вектора состояния, то есть вычисляются искомые наборы  $\{\{p_j\}\} = \{\{L_j((s,r))\}\}$  или  $\{\{p_j\}\} = \{\{L_j(T_i)\}\}$ .

Существенно, что, вообще говоря, вектор состояния может использоваться не только для описания движения объекта в 3D-пространстве, но и других моделей поведения (при этом семантика вектора состояния должна быть соответствующим образом изменена или дополнена).

### 2.3 Адекватность реконструкции состояния

На рис.1 проиллюстрирована семантика оценки адекватности реконструкции состояния объекта со сложной пространственной структурой по данным регистрации редуцированного вектора состояния. Буквами A, B и C обозначены состояния, описываемые полным и редуцированным векторами. Буквами  $\alpha$  и  $\beta$  обозначены переходы от полного описания к редуцированному и наоборот ( $\alpha$  - редукция,  $\beta$  - реконструкция), буквами  $\xi$ ,  $\psi$  и  $\theta$  обозначены изменения состояний в «своих пространствах».

В идеальном случае (регистрация состояния без случайных ошибок), очевидно,  $A \equiv C$ ,  $A' \equiv C'$ ,  $\theta \equiv \xi$ ,  $\alpha \equiv \beta^{-1}$ . На практике (регистрация с ошибками, в результате  $A \approx C$ ,  $A' \approx C'$ ,  $\alpha \neq \beta^{-1}$ ) при оценке адекватности необходимо вводить метрику для сравнения соответствующих статистик и т.д., [1-4].

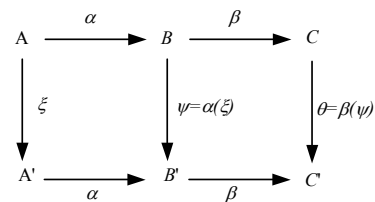
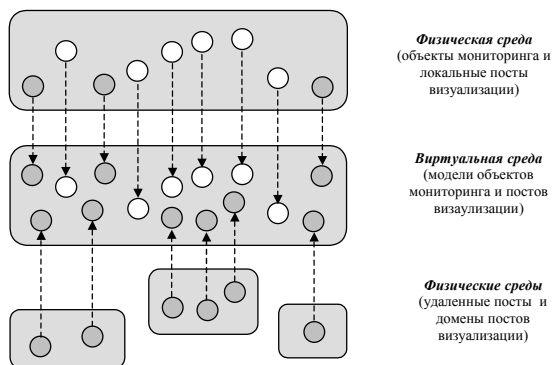


Рис 1: Диаграмма эквивалентности преобразований 3D-состояния объекта.

## 3. СИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИВС

Наибольший интерес для практического применения систем визуализации ИВС в задачах исследования космоса представляет возможность синхронизированного погружения в единую виртуальную среду большого количества исследователей, экспертов, персонала служб поддержки сложных операций и т.д. Другими словами, система визуализации ИВС должна быть распределенной.



**Рис 2:** Структура метафоры распределенной системы визуализации ИВС.

Метафора такой системы проиллюстрирована на рис.2, где условно показаны абстракции нескольких физических сред, которые могут находиться на большом удалении друг от друга (например, несколько территориально автономных Центров управления, экипажи пилотируемых объектов, спутниковая группировка и т.п.).



в) сближение корабля «Союз» с МКС»

**Рис 3:** Примеры визуализации ИВС без применения оптических средств в физической среде.

Наблюдатели из разных сред реально не взаимодействуют, однако на основе непрерывной реконструкции состояния может быть организовано их взаимодействие в общей виртуальной среде на основе синхронной визуализации виртуальных объектов в любом нужном ракурсе, в том числе с одновременным совмещенным наблюдением реальных объектов (Augmented Reality).

На рис. 3 показаны примеры визуализации орбитальных объектов, состояние которых реконструировалось в реальном времени по данным телеметрии (изображения получены системой «Гипервизор» разработанной при поддержке РФФИ для Российского Центра Управления Полетами, [5-7]).

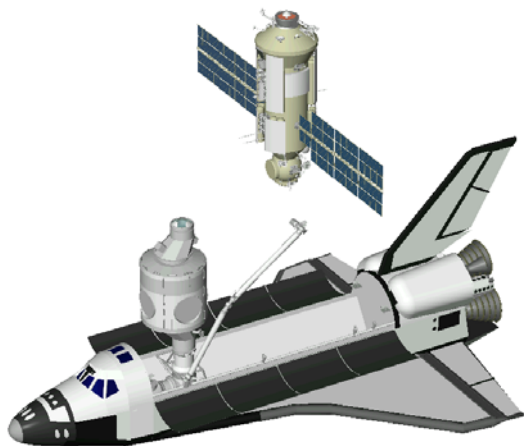
### 3.1 Посты визуализации

При совмещенной визуализации реальных и виртуальных объектов, а также при изолировании зрительного канала оператора с сохранением других видов сенсорного воздействия (гетерогенная сенсорная среда) возрастают требования к точности формирования зрительных образов. Этим требованиям не удовлетворяет широко распространенная в 80-90-х годах прошлого века «пирамидальная» концепция виртуальной камеры [8]. Для развития этой концепции вводится модель поста визуализации – многозвенная иерархическая система формирования изображения (стереоскопического в том числе). Эта система имеет несколько уровней управления состоянием, в которых учитывается локализация поста как единого целого, положение зрительных сенсоров, положение и форма носителей изображения и т.д. В простейшем случае типовую камеру можно рассматривать как один из примитивов в составе поста визуализации.

Таким образом, пост визуализации представляет собой обобщающую абстракцию, которая может использоваться для реализации существующих и перспективных средств визуализации, в том числе, без использования промежуточных носителей (ретиальные дисплеи, системы с 3D-разверткой и т.п.), систем отображения с неплоской



а) раскрытие панелей солнечных батарей



б) сближение ФГБ «Заря» и Space Shuttle «Indeavour»

поверхностью растра (здесь «пирамидальная» камера не применима в принципе) и т.п.

### 3.2 Сервер состояния ИВС

Центральным звеном системы является сервер состояния, при помощи которого организуется параллельный доступ всех потребителей (сопоставляемых с виртуальными зрителями) к данным о состоянии виртуальных объектов. Программная реализация сервера размещается на вычислительном узле центра сбора и обработки данных телеметрии. Для организации доступа к ресурсам используется сетевая модель пакета «Аванго», имеющая API с системой специализированных объектов (разработка с открытым исходным кодом Фраунгоферовского института медиа-коммуникаций, обеспечивающая реализацию известных возможностей существующих технологий распределенных систем, таких как брокеры запросов, компоненты, мобильный код и т.п., используемые в настоящее время в той или иной степени в Corba, Java, COM/DCOM/COM+ и т.п.).

### 3.3 Протокол транспортировки состояния

В настоящее время фактически отсутствует общепринятый *прикладной* протокол транспортировки вектора состояния для распределенных систем виртуальной реальности. В качестве промежуточного решения можно использовать возможности VRML (семантику и синтаксис, парсеры), тем не менее разработка специализированного протокола, остается актуальной. В этой связи для задач проекта признано целесообразным начать собственную разработку базового макетного варианта протокола транспортировки вестора состояния (рабочее название – «Remote Environment State Transfer Protocol» - RESTP). В основу модели протокола RESTP положены возможности сетевых объектов «Аванго» (в которых, в частности, инкапсулированы средства и функции управления, относящиеся к уровню TCP/IP).

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология «виртуальная реальность» имеет большие потенциальные возможности, априори востребованные в задачах исследования космоса. В перспективе эта технология и ее разновидности могут оказаться незаменимыми для поддержки сложных операций в исследованиях и освоении космоса (особенно для пилотируемых и автоматических планетных экспедиций). Появляется возможность использовать принципиально новые постановки и подходы к решению задач управления перспективными орбитальными комплексами в сложных условиях, объектами с большой пространственной протяженностью и разветвленностью (как, например, МКС).

Системы визуализации индуцированной виртуальной среды могут использоваться как альтернативные средства слежения за поведением управляемых объектов и их окружением без использования оптических диапазонов электромагнитного спектра. Такие системы могли бы на принципиально новой основе обеспечивать управление сложными операциями в условиях плохой видимости (задымление, пыль, туман и т.п.), при отсутствии прямой видимости в принципе (в шахтах и тоннелях, внутри зданий со сложными интерьерами и т.п.), в условиях, не совместимых с жизнью (ядерные и химические объекты, очаги пожаров, очаги ядерного и химического заражения, под водой и т.п.).

Однако эффективность применения возможностей виртуальной реальности (систем визуализации ИВС) при управлении техническими системами целиком зависит от адекватности реконструкции и визуализации состояния сред мониторинга [2]-[4],[9],[10]. Практическая реализация системы непосредственно зависит от решения таких задач, как разработка высокоточных 3D-моделей объектов мониторинга, моделей состояния и поведения объектов мониторинга; разработка и адаптации протоколов транспортировки и трансляции векторов состояния объектов мониторинга; обеспечение релевантности информации о состоянии объектов.

## 5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ермаков С.М., Бродский В.З. и др. *Математическая теория планирования эксперимента*. – М.: Наука, 1983, 392с.
- [2] B. Jiang, S. You, U. Neumann, *A Robust Tracking System for Outdoor Augmented Reality*, *IEEE Virtual Reality 2004, Chicago*, pp. 3 - 10, March 27-31, 2004.
- [3] Lee J.W, Neumann U. *Motion Estimation with Incomplete Information using Omnidirectional Vision*. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'00), Vol. 2, pp. 562-565, Vancouver Canada, September 2000*.
- [4] Park J, You S, Neumann U. *Natural Feature Tracking for Extendible Robust Augmented Realities*. *Proceedings of the First International Workshop on Augmented Reality, San Francisco, Nov. 1998*.
- [5] Афанасьев В.О., Бровкин А.Г. и др. *Исследования и разработка системы интерактивного наблюдения индуцированной виртуальной среды (системы виртуального присутствия)* – в сб. *Космонавтика и ракетостроение, ЦНИИМаш, вып., 16, 1999*.
- [6] Афанасьев В.О., Алешин В.И. и др. *Синхронизация погружения в виртуальную среду системы "ГИПЕРВИЗОР"*. //В сб. "Вопросы кибернетики" М.: Изд-во РАН, № 181, 1995.
- [7] Алешин В.И., Афанасьев В.О. и др. *Некоторые аспекты применения имитационных моделей с интерфейсом «Виртуальная реальность»* //В сб. "Вопросы кибернетики" М.: Изд-во РАН, № 181, 1995.
- [8] Хилл Ф. *OpenGL. Программирование компьютерной графики*. – СПб.: Питер, 2002.- 1088с.
- [9] Kan E., Tower e.a. *The JPL Telerobot Operator Control Station: Part 1 - J.Hardware, Proceedings of the NASA Conference on Space Telerobotics, 1989*.
- [10] R. Zimmermann, C. Kyriakakis, C. Shahabi, C. Papadopoulos, A. A. Sawchuk, U. Neumann, *The Remote Media Immersion System*, *IEEE MultiMedia Magazine, April 2004 (Accepted for publication)*.

### Об авторах

Авторы представляют исследовательскую группу VE-GROUP (E-mail: info@ve-group.ru) Института физико-технической информатики, объединяющую ученых и специалистов под руководством профессора С.В.Клименко.