

УДК 004.92; 371.693

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВИЗУАЛЬНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗЕМЛИ С БОРТА МКС

В. С. Бартош¹, И. В. Белого¹, М. С. Дьяков², С. А. Кузиковский¹,
А. С. Переверзев²

¹Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
²ООО «СофтЛаб-НСК»,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: diam@sl.iae.nsk.su

Рассмотрены особенности тренажёрного моделирования для решения задач визуально-инструментальных наблюдений и мониторинга Земли с борта Российского сегмента МКС. Описаны подходы, удовлетворяющие требованию реального времени, к отображению цифровой визуальной модели Земли с разрешением до 15 м/тексел с углами обзора от 2 до 110° при имитации пролёта МКС. Представлено решение, позволяющее имитировать наблюдения через фотоаппарат с использованием системы позиционирования. Приведены характеристики разработанного программно-аппаратного комплекса.

Ключевые слова: тренажёрное моделирование, визуально-инструментальные наблюдения, цифровая визуальная модель Земли, система позиционирования, заполняющие пространство кривые, система виртуальной реальности.

DOI: 10.15372/AUT20160306

Введение. В соответствии с «Долгосрочной программой научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на Российском сегменте МКС» [1] важными направлениями являются изучение процессов, происходящих на поверхности и в атмосфере Земли, и диагностирование природных и техногенных катастроф.

При проведении ряда экспериментов на борту Российского сегмента (РС) МКС используются методы визуально-инструментальных наблюдений (ВИН) за природными и антропогенными объектами, явлениями, происходящими в космосе, атмосфере, на земной и океанической поверхностях. К такого рода экспериментам из перечня экспериментов по направлению «Исследование Земли и Космоса» относятся: «Сейнер», «Терминатор», «Ураган», «Экон-М». Сеансы ВИН применяются для мониторинга образования циклонов, зарождения тайфунов, вулканической активности, гроз, лесных пожаров, биопродуктивных зон в океане и т. д. [2–4].

Цель предлагаемого исследования — разработка подходов к моделированию в реальном времени визуально-инструментальных наблюдений Земли с борта РС МКС. На данный момент не существует аналогов, удовлетворяющих описанным далее требованиям. Полученные результаты могут использоваться в системах компьютерной генерации изображений для визуализации планетарных поверхностей высокого пространственного разрешения и тренажёрах, в которых необходимо отслеживать положение глаз оператора для создания эффекта погружения в виртуальную среду.

Требования к моделированию визуально-инструментальных наблюдений. К основным отработываемым навыкам и умениям при подготовке космонавтов к решению задач ВИН и мониторинга Земли с борта РС МКС относятся:

1) поиск и обнаружение района расположения объекта невооружённым глазом при наблюдении через иллюминатор;

2) поиск заданного объекта при наблюдении в широком поле зрения оптического канала обнаружения (при малых кратностях увеличения), обнаружение и захват объекта для сопровождения;

3) сопровождение объекта с постепенным увеличением масштаба изображения, переход к детальному наблюдению;

4) распознавание объекта и выделение информативных зон;

5) выполнение фокусировки, компоновки кадра и корректирующих действий по точному наведению центра кадра на выбранную информационную зону объекта;

6) фотосъёмка одиночным кадром или серией кадров.

Из отрабатываемых навыков и умений следуют требования к системе компьютерной генерации изображения.

1. Реалистичное моделирование в реальном масштабе времени подстилающей поверхности Земли, наблюдаемой с борта космического аппарата.

2. Моделирование сеансов ВИН Земли через иллюминаторы как невооружённым глазом, так и с использованием инструментальных средств.

3. Поддержка пространственного разрешения подстилающей поверхности Земли 120–150 м/тексел для режима наблюдения невооружённым глазом и 15–20 м/тексел для режима наблюдения с помощью инструментального средства (фотокамеры). Возможность плавной трансфокации угла обзора от 110 до 2°.

4. Отображение отдельных точек детального наблюдения на цифровой визуальной модели Земли с разрешением вплоть до 4 м/тексел.

5. Наложение различных видов облачности и дымки таким образом, чтобы оператор мог регистрировать параллактическое смещение облаков относительно земной поверхности.

6. Имитация пролёта космических аппаратов, характерное время прохождения одного витка которыми составляет приблизительно 90 мин. В тренировочных целях требуется увеличение скорости пролёта вплоть до десятикратной.

В соответствии с данными требованиями были разработаны и реализованы следующие решения.

Специализированный стенд-тренажёр «Тренажёр ВИН». Программно-аппаратный комплекс состоит из шести рабочих мест: инструктора, двух операторов, преподавателя и двух мест подготовки тренировки.

Для отработки навыков ВИН в стенде-тренажёре используется имитатор инструментального средства наблюдения и регистрации со встроенным микродисплеем на основе цифровой зеркальной камеры, который закреплён на устройстве обезвешивания. Изображение на микродисплее формируется в соответствии с положением камеры относительно макета иллюминатора, а на мониторе за макетом иллюминатора — согласно положению головы оператора. Положения головы и камеры определяются с помощью системы позиционирования.

Организация текстурных данных земной поверхности. Изображение земной поверхности строится по обработанным космическим снимкам интересующей части поверхности, формирующим так называемую текстуру. В представленной работе применялась текстура с разрешением около 15 м/тексел*. Для обеспечения возможности масштабирования

*Строго говоря, поскольку текстура является плоской, а земная поверхность — эллипсоид, невозможно создать отображение одного в другое, сохраняющее одинаковое разрешение для всех участков текстуры. В зависимости от применяемой проекции разные участки земной поверхности представлены с разным разрешением, поэтому параметр 15 м/тексел является примерным. Нами была использована проекция Меркатора, и максимальное разрешение в таком случае составляло примерно 13–26 м/тексел в зависимости от географической широты.

для этой текстуры строится несколько уровней детальности, из которых может использоваться любой или два соседних в случае проведения интерполяции между уровнями. При разрешении текстур земной поверхности до 15 м/тексел их объём даже при сжатии составляет сотни гигабайт. При таких объёмах текстуры не помещаются полностью в оперативной памяти и тем более в памяти графической карты, поэтому приходится хранить их на жёстком диске и держать в памяти только участок, находящийся в поле зрения наблюдателя. По мере движения наблюдателя по орбите требуется загружать фрагменты, которые в ближайшее время могут попасть в поле зрения, освобождая память от фрагментов, которые из поля зрения вышли и в ближайшее время не потребуются. Другими словами, реализована так называемая упреждающая подкачка. Для этого текстура поделена на квадраты с разрешением 256×256 текселов, и элементом загрузки является такой квадрат (каждый квадрат загружается в память целиком). Поскольку система допускает режим ускоренного течения времени, поток данных с диска, требуемый подкачкой, может быть значительным. Фактически максимальный коэффициент ускорения времени, при котором не возникает визуальных дефектов (пропуска квадратов), как раз и ограничен производительностью подкачки. На производительность подкачки оказывает большое влияние взаимное расположение квадратов на диске: чем ближе друг к другу находятся соседние квадраты и чем вероятнее, что квадраты, соседствующие на текстуре, соседствуют также и на диске, тем меньше накладные расходы на позиционирование головки жёсткого диска*. В последнем случае квадраты могут быть загружены сразу группой. Добиться этого в 100 % случаев невозможно, так как дисковое пространство одномерно, а текстура двумерна, иначе говоря, если в текстуре у квадрата восемь соседей, считая диагональных (или более, если вспомнить об уровнях детальности), то на диске — только два. Тем не менее можно оптимизировать расположение квадратов для повышения производительности.

Для таких задач часто применяются так называемые *space-filling curves* — кривые, заполняющие пространство, которые обладают желаемым свойством: полученные многократным сворачиванием они минимизируют расстояние вдоль кривой для близких в пространстве (на плоскости) узлов. Кривая позволяет поставить в соответствие координаты квадрата его смещению в дисковом файле. Координаты узла кривой — это координаты квадрата на глобальной текстуре, а смещение вычисляется из расстояния от начала кривой до узла. Примером является кривая Гильберта (рис. 1), вариант которой использован в описываемой системе. Классическая кривая Гильберта определена для квадрата со стороной кратной степени двойки. Глобальная текстура земной поверхности может оказаться прямоугольником с почти произвольной длиной стороны. В [5] разработан вариант кривой Гильберта, который при пренебрежимом ухудшении её желательных свойств позволяет строить кривые, заполняющие прямоугольник с любыми длинами сторон (рис. 2).

Применение этого метода осложнено тем, что картографическая проекция Меркатора даёт значительное изменение разрешения текстуры по географической широте (рис. 3).

Используемые нами файлы с текстурами близкого разрешения (в метрах на тексел) содержат данные от разных уровней текстуры полосами. Поэтому для максимального уровня детальности кривая Гильберта строится на всю площадь текстуры, а затем в тех областях, где текстура имеет меньшее разрешение, узлы кривой прореживаются (рис. 4).

*Использование твердотельных накопителей (SSD) могло бы полностью решить эту проблему, но требуемые разрешения текстур земной поверхности растут быстрее, чем размеры доступных твердотельных накопителей. На момент начала разработки системы на рынке не было SSD-диска, который мог бы вместить одну используемую в работе текстуру земной поверхности целиком. Применение массивов твердотельных накопителей неоправданно удорожило бы систему, так как при эксплуатации необходимо оснастить таким программным обеспечением несколько рабочих мест: операторов, инструктора, подготовки тренировки и разработчиков этой системы.

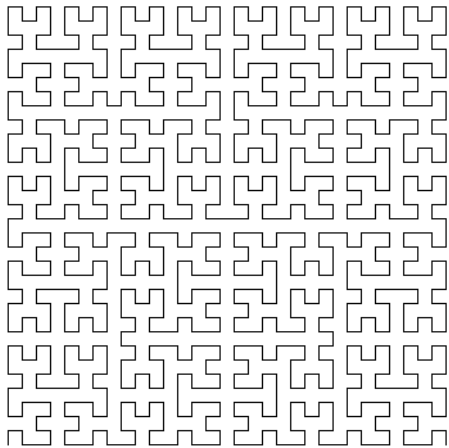


Рис. 1. Кривая Гильберта пятого уровня

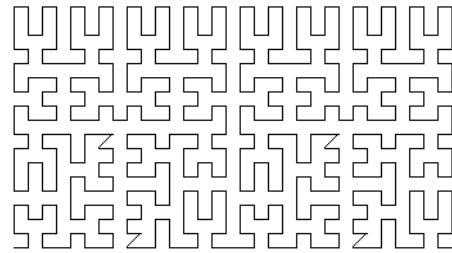


Рис. 2. Вариант кривой Гильберта для прямоугольной области

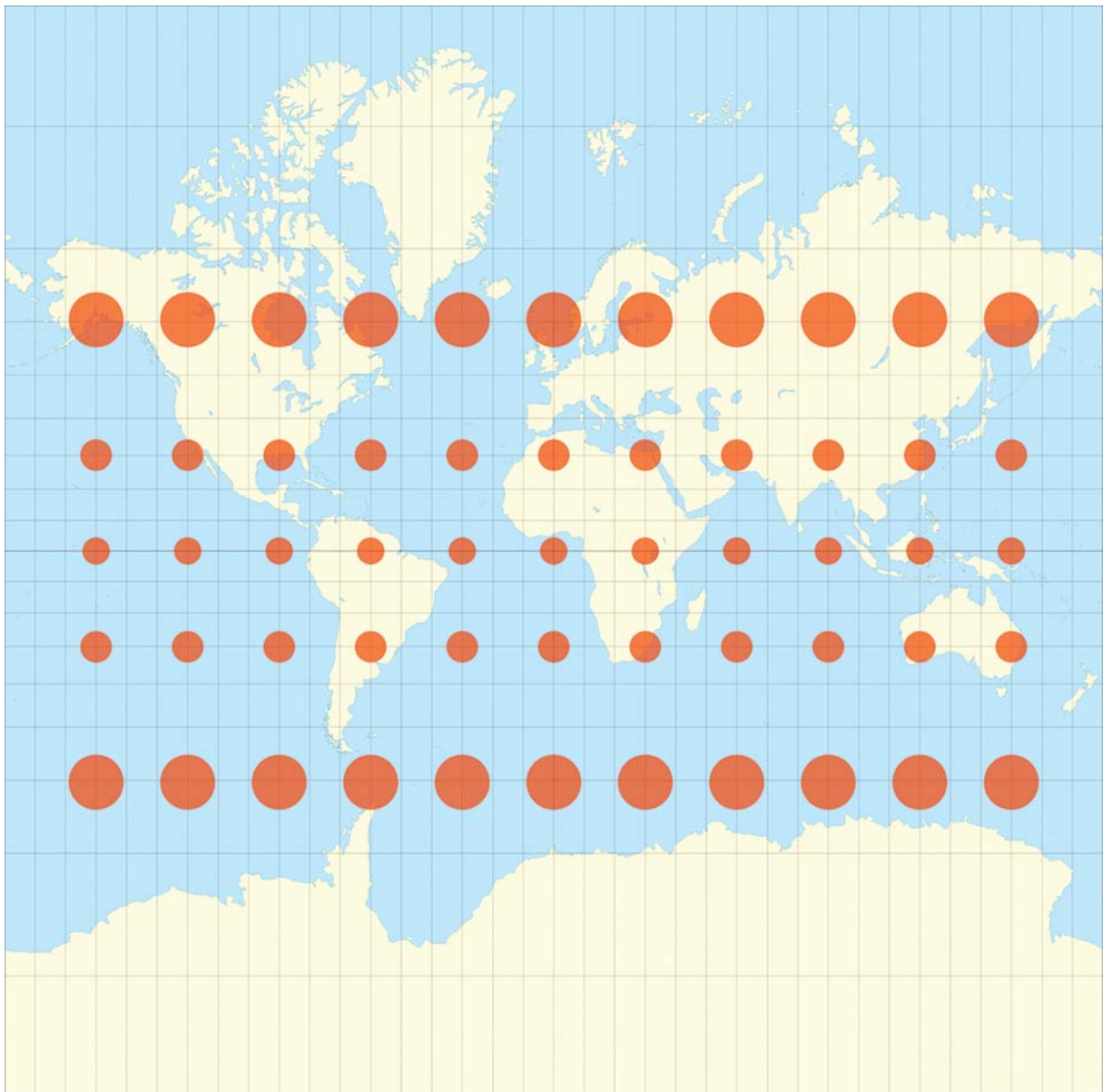


Рис. 3. Искажения площадей в проекции Меркатора [6]

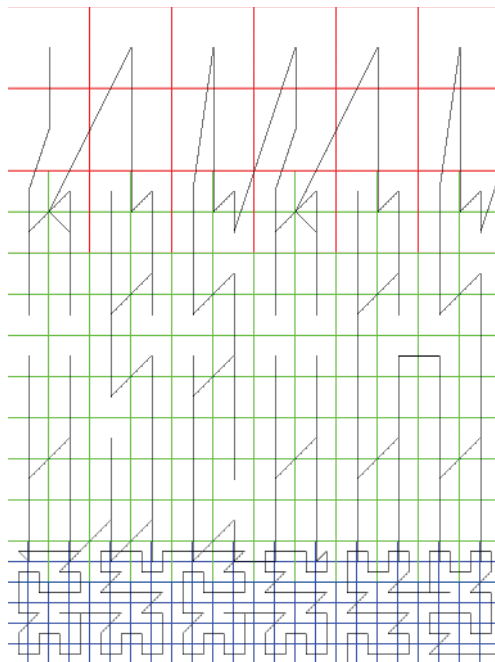


Рис. 4. Фрагмент варианта кривой Гильберта для текстурной информации Земли. Синим, зелёным и красным цветами показаны квадраты разных уровней детальности, собранные в одном файле

Подсистемы подкачки и отображения. Для формирования изображения на мониторе оператора разработана подсистема упреждающей подкачки. Данная подсистема в соответствии с текущей линией визирования и углом обзора виртуальной камеры поддерживает в актуальном состоянии два кэша текстурной информации: JPEG и DXT. Первый формируется из квадратных текстур размером 256×256 текселов, представление которых на жёстком диске описано выше. Подмножеством преобразованных из JPEG-кэша текстур является DXT-кэш меньшего размера. Два кэша необходимы, поскольку DXT-представление текстурной информации, которое поддерживается графическими ускорителями, требует большего объёма памяти. Эти кэши хранят текстуры для всех 13 используемых уровней проекции Меркатора, нужные уровни проекции выбираются в зависимости от текущего угла обзора виртуальной камеры.

Для точек детального наблюдения, пространственное разрешение которых может достигать 4 м/тексел, используется отдельное хранилище. Под него выделяется порядка 1 Гбайт оперативной памяти для хранения текстур в формате DXT, потому что изображение на экране монитора при углах обзора камеры около 2° должно обновляться с такой скоростью, при которой на преобразование форматов недостаточно вычислительных ресурсов в масштабе реального времени.

Подсистема отображения объединяет несколько DXT-текстур размером 256×256 текселов в текстуры большего размера. Далее формируются четыре слоя подстилающей поверхности Земли, соответствующих разным уровням проекции Меркатора. Итоговое изображение состоит из нескольких слоёв (рис. 5): звёзды, четыре слоя подстилающей поверхности Земли, облачность, атмосферный лимб, модель Международной космической станции.

Подход с послойной отрисовкой позволяет не использовать z-тест вплоть до формирования изображения модели МКС, что приводит к экономии вычислительных ресурсов и достижению необходимой частоты смены кадров.

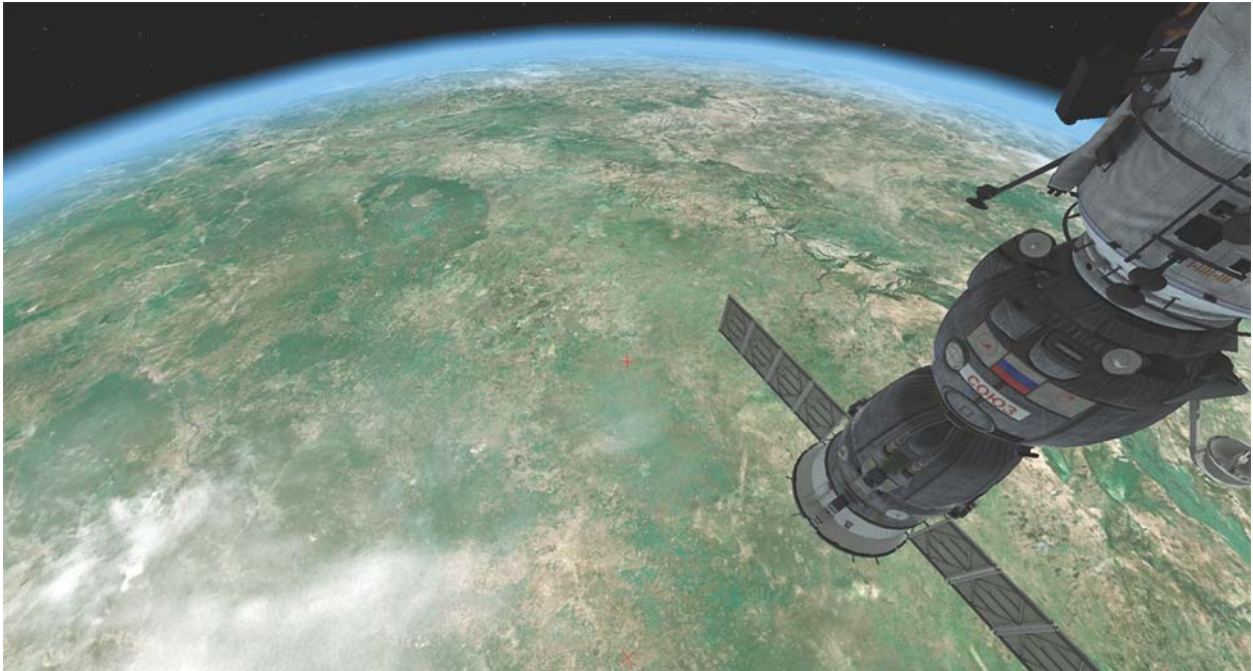


Рис. 5. Перспективное изображение внешней визуальной обстановки

Расчёт оптимального размещения датчиков системы позиционирования. В целях создания у оператора более полной иллюзии того, что видимые через виртуальный иллюминатор объекты находятся не в плоскости монитора, изображение на мониторе должно строиться исходя из положения наблюдателя (глаз оператора). Для этого используется система позиционирования головы оператора, определяющая в реальном времени её положение и ориентацию, из которых программно вычисляются координаты глаз (глаза). Для этих координат и строится изображение. При формировании изображения в окуляре имитатора инструментального средства наблюдения и регистрации (ИИСНР) также необходимо знать положение и ориентацию ИИСНР. Поэтому в данной работе применялась система позиционирования, позволяющая устанавливать положение двух объектов (головы оператора и ИИСНР) одновременно.

В качестве реализации системы позиционирования была взята готовая ультразвуковая модель UM-16 компании RUCAP, определяющая положение ультразвукового передатчика по времени прохождения ультразвукового сигнала до нескольких приёмников. Для определения угловой ориентации объекта необходимы три таких передатчика, закреплённых на объекте. Система содержит два модуля передатчиков, размещённых на позиционируемых объектах, и набор приёмников, расположенных и ориентированных в пространстве.

Выбор был сделан в пользу российской разработки для профессионального сегмента, которая удовлетворяет требованиям проекта к размерам рабочей области, конфигурируемости и точности позиционирования. Так, она позволяет определять положение одновременно двух объектов в требуемой рабочей области, и, кроме того, уже использовалась в других профессиональных тренажёрах и симуляторах. Доступные системы позиционирования нижнего сегмента были отвергнуты по причинам ограниченной рабочей области, недостаточных точности и количества степеней свободы.

Для построения конечной системы требовалось выбрать нужное количество ультразвуковых приёмников, правильно их разместить и ориентировать.

Задача выбора правильной конфигурации приёмников значительно осложнялась следующими факторами.

1. Необходимо обеспечить позиционирование как ИИСНР, так и головы оператора. В силу особенностей их использования передатчики при работе большую часть времени направлены в разные стороны.

2. Рабочая область содержит множество объектов, препятствующих прохождению ультразвукового сигнала: обезвешивающее устройство, кабели, идущие к ИИСНР, руки оператора и т. д.

3. Область, в которой могут быть размещены приёмники, ограничена размерами помещения, а также имитацией панелей космического модуля.

4. Приёмники и передатчики имеют узкую диаграмму направленности и ограниченный снизу и сверху диапазон расстояний, на которых они уверенно работают.

5. Оператор мог наблюдать обстановку через иллюминатор, находясь как на расстоянии около метра от него (при работе с ИИСНР), так и вплотную. Система позиционирования должна обеспечивать работу во всех таких режимах.

Предварительные оценки показали, что с учётом характеристик датчиков требуется около двух десятков приёмников (при дальнейших расчётах было установлено, что необходимо не менее 24), но даже с таким количеством нужно разместить приёмники оптимально.

Найти оптимальное положение для датчиков путём натуральных экспериментов методом проб и ошибок не представлялось возможным, поскольку тестирование только одной конфигурации, включающее закрепление датчиков, проверку работы системы на многих положениях головы и ИИСНР, заняло бы не один день. А таких конфигураций пришлось бы проконтролировать очень много — задача имеет размерность, равную количеству датчиков, помноженному на пять. Поэтому было решено применить компьютерное моделирование и рассчитать оптимальную конфигурацию.

Была построена компьютерная модель, включающая:

1) диаграммы направленности, минимальные и максимальные расстояния уверенной работы приёмников и передатчиков;

2) конфигурацию рабочего места оператора, а также панели, иллюминатора и т. д.;

3) модели объектов, составляющих препятствия для прохождения ультразвукового сигнала, т. е. обезвешивающего устройства, ИИСНР, рук оператора, кабелей и т. д.

Данная модель для любого расположения приёмников и их количества позволяла вычислить меру того, насколько это расположение эффективно для заданного набора положений головы и ИИСНР. Набор состоит из нескольких тысяч положений и рассчитан таким образом, чтобы равномерно заполнить область положений, которые могут принимать голова оператора и ИИСНР в процессе работы. Мера эффективности вычислялась из совокупной ошибки определения положения головы и ИИСНР по всему заданному набору положений при условии, что расстояния между приёмниками и передатчиками вычисляются с некоторой погрешностью. Такая погрешность, в свою очередь, учитывала диаграммы направленностей: чем дальше в той или иной паре приёмник—передатчик датчики выходили за пределы диаграмм направленностей друг друга, тем значительнее была эта погрешность*. Мера эффективности далее использовалась в качестве критерия оптимальности в алгоритме имитации отжига, который и позволил выбрать субоптимальное положение приёмников, хорошо удовлетворяющее всем необходимым критериям, уточнить их количество и определить оптимальное положение передатчиков на голове оператора.

Таким образом, система с расположением датчиков, рассчитанным вышеописанным способом, оказалась работоспособной во всей рабочей области и не потребовала перена-

*Вообще говоря, конкретная система позиционирования устроена таким образом, что при выходе за диаграмму направленности не просто растёт погрешность определения расстояния между датчиками, а сама пара датчиков начинает функционировать нестабильно и выключается из работы. В алгоритме это моделировалось резким ростом погрешности.

стройки расположения. Сбоев в функционировании системы, которые объяснялись бы недоступностью датчиков вследствие их неправильного размещения или перекрытия объектами в рабочей зоне, не наблюдалось, а точность позиционирования оказалась не менее заявленной и достаточной для работы системы.

Заключение. В данной публикации описаны три оригинальных подхода, использованных при тренажёрном моделировании визуально-инструментальных наблюдений с борта Международной космической станции:

1. Эффективная организация текстурных данных земной поверхности на основе модифицированных кривых Гильберта, которая дала возможность увеличить производительность упреждающей подкачки.

2. Подсистемы упреждающей подкачки и отображения.

3. Компьютерное моделирование для обеспечения оптимального размещения датчиков системы позиционирования, позволившее исключить зоны нестабильной работы этой системы и повысить её точность и надёжность.

Предлагаемые подходы дают возможность в ограничениях реального времени моделировать визуально-инструментальные наблюдения с борта РС МКС и удовлетворить сформулированным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Долгосрочная** программа научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на Российском сегменте МКС // Федеральное космическое агентство. 2012. 84 с. URL: <http://knts.tsniimash.ru/ru/src/Files/dp.pdf> (дата обращения: 07.09.2015).
2. **Евгуценко А. Н., Коновалов Б. В.** К оценке информационного потенциала космических визуально-инструментальных методов изучения природной среды Мирового океана // ЦНИИМАШ. 2013. 15 с. URL: http://knts.tsniimash.ru/ru/src/Mat/Inform_potencial.pdf (дата обращения: 07.09.2015).
3. **Итоги** 35-й экспедиции на Международную космическую станцию // Федеральное космическое агентство. 2013. URL: <http://www.federalspace.ru/19810/> (дата обращения: 07.09.2015).
4. **Лупян Е. А., Лаврова О. Ю., Барталев С. А. и др.** «Дни космической науки 2010» — дистанционное зондирование Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. **7**, № 4. С. 319–328.
5. **Zhang J., Kamata S.-I., Ueshige Y.** A pseudo-Hilbert scan for arbitrarily-sized arrays // IEICE Trans. Fundam. Electron., Commun. Comput. Sci. 2007. **E90-A**, N 3. P. 682–690.
6. **Gaba E.** Tissot indicatrix world map Mercator proj.svg // Wikipedia. 2008. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Tissot_indicatrix_world_map_Mercator_proj.svg (дата обращения: 04.09.2015).

Поступила в редакцию 13 октября 2015 г.