

На правах рукописи

Милов Алексей Николаевич



**Разработка и анализ программно-алгоритмических средств
высокоскоростной обработки графической информации и
управления в бортовых приборах визуализации изображений**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(в области приборостроения)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена на Государственном унитарном предприятии «Научно-производственный центр «Электронные вычислительно-информационные системы».

Научный руководитель: доктор технических наук,
Петричкович Ярослав Ярославович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
Щагин Анатолий Васильевич

кандидат технических наук,
Панасенко Сергей Петрович

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно-исследовательский институт «Субмикрон»,
г. Москва

Защита состоится « 19 » мая 2009 г. в 14 часов 30 минут в аудитории 3103 на заседании диссертационного совета Д 212.134.02 Московского государственного института электронной техники (технического университета) по адресу: 124498, Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Московского государственного института электронной техники (технического университета).

Автореферат разослан « 23 » марта 2009 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.134.02,
доктор технических наук



Гуреев А. В.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Одной из критически важных современных задач бортовых микроэлектронных приборов с точки зрения требуемой производительности является визуализация подстилающей поверхности. Для ее решения на борту пилотируемого летательного аппарата (ПЛА) предусмотрены специальные устройства отображения – индикаторы. До настоящего времени индикаторы имели возможность отображать самые необходимые параметры полета: положение ПЛА в системе координат, заданный курс, отклонение и др. Приборы, преобразующие и обрабатывающие информацию для отображения на индикаторе, получили название бортовых приборов визуализации изображений (БПВ). Визуальное изображение подстилающей поверхности позволит пилоту оперативно оценить обстановку и принять управляющее решение особенно в плохих погодных условиях или в темное время суток.

Зарубежные центры проектирования СБИС, работающие в области компьютерной графики, широко применяют свой опыт в области разработки коммерческих специализированных микросхем для создания БПВ. Число отечественных предприятий, работающих в области проектирования СБИС, весьма ограничено. Среди них необходимо отметить такие известные предприятия, как ОАО «Ангстрем», ОАО «НИИ МЭ и завод Микрон», ЗАО «МЦСТ», ГУП НПЦ «ЭЛВИС», НИИСИ РАН, НТЦ «Модуль», которые специализируются на выпуске универсальных программируемых СБИС общего применения. Разработка и изготовление отечественных бортовых приборов ведется на ряде предприятий, среди которых: ОАО «Раменское Приборостроительное Конструкторское Бюро», ФГУП «НИИ «Субмикрон», ОАО «Научно-Конструкторское Бюро Вычислительных Систем» г. Таганрог. Критически важным аспектом в обеспечении обороноспособности страны является построение бортовых приборов на отечественной элементной базе. В связи с этим **актуальными** являются исследования, направленные на создание БПВ нового поколения, решающих задачи интерактивной визуализации подстилающей поверхности с использованием универсальных СБИС с программируемой многоядерной архитектурой.

Значительный вклад в развитие компьютерной графики внесли отечественные и зарубежные учёные: Ю.М. Баяковский, В.А. Галактионов, Б. Фонг, А. Гуро, К. Акели, и др. Большой вклад в развитие отечественной информатики, автоматики и микроэлектроники внесли такие известные отечественные ученые, как академики Е. П. Велихов, С. Н. Васильев, В. Б. Бетелин, Г. Я. Красников, А. Л. Стемпковский.

Исходя из анализа современных бортовых задач визуализации изображений и аппа-

ратных средств для их реализации сформулированы следующие цели и задачи работы.

Цель диссертационной работы – разработка и анализ комплекса программно-алгоритмических средств высокоскоростной обработки графической информации и управления в БПВ на основе гетерогенных многоядерных систем на кристалле, экспериментальная оценка возможностей универсальных цифровых процессоров по обработке векторных и растровых типов данных, используемых в графическом конвейере БПВ. Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи**:

- разработать алгоритмы управления БПВ на основе многоядерных систем на кристалле;
- разработать алгоритмы обработки информации в БПВ и модель взаимодействия ядер в гетерогенной многоядерной системе на кристалле с учетом возможного увеличения количества ядер;
- предложить способ декомпозиции компонентов программного обеспечения между бортовой цифровой вычислительной машиной (БЦВМ) и БПВ с учетом клиент-серверной архитектуры OpenGL;
- разработать комплексную методику и алгоритм оценки производительности БПВ на основе программируемых многоядерных систем на кристалле;
- разработать математические модели производительности БПВ и экспериментально проверить соответствие им практических показателей БПВ на тестовых сценах;
- разработать алгоритмы и рекомендации по реализации прикладного программного обеспечения для достижения наилучшей производительности БПВ.

Методы исследования

Для теоретического и практического решения поставленных задач использовались теория множеств, теория информационных систем, теория программирования, теория параллельных вычислительных систем, теория цифровой обработки сигналов, алгоритмы и методы обработки графической информации, теория ошибок.

Научная новизна работы состоит в разработке и анализе программно-алгоритмических средств для высокоскоростной обработки графической информации и в применении их для управления приборами визуализации изображений. Работа посвящена развитию научных основ построения приборов управления летательными аппаратами и визуализации подстилающей поверхности на основе гетерогенных многоядерных систем на кристалле с программируемой архитектурой. При этом получены следующие новые научные результаты.

- На основе анализа бортовых задач визуализации определены необходимые требования к аппаратуре БПВ по производительности – 500 MFLOPS, по пропускной способности каналов передачи данных – 400 МБ/с.
- Аналитически формализованы критерии эффективного управления обработкой графической информации в гетерогенных многоядерных системах на кристалле в виде минимизации времени простоя вычислительных ядер и минимизации общего времени подготовительных операций заданий обработки.
- Впервые разработан алгоритм постадийной конвейеризации для эффективного управления БПВ на основе систем на кристалле с программируемой архитектурой. Достигнутая по результатам экспериментальных исследований и испытаний производительность составила 92% от теоретических возможностей вычислительных ядер.
- Разработан параллельный флажковый алгоритм, обеспечивающий эффективное управление обработкой графической информации в многопроцессорных БПВ. С применением алгоритма производительность двухпроцессорного БПВ увеличилась на 92-95%.
- Предложен способ функциональной декомпозиции программной архитектуры OpenGL в БПВ с учетом разработанных алгоритмов управления и обработки информации.
- Разработаны эффективные алгоритмы управления обработкой вызовов OpenGL в многопроцессорных БПВ.
- Разработаны алгоритмы прикладного программного обеспечения БЦВМ по эффективной визуализации двумерных карт и трехмерной подстилающей поверхности.
- Разработаны алгоритм и методика комплексной оценки параметров производительности БПВ нового поколения.
- Разработан комплексный алгоритм бортовой визуализации, который позволяет интерактивно отображать трехмерную подстилающую поверхность, а также визуализировать двумерную карту местности в БПВ.

Практическая значимость заключается в том, что на основе разработанных программно-алгоритмических средств обработки графической информации и управления в БПВ: алгоритма постадийной конвейеризации, параллельного флажкового алгоритма обработки графической информации в многопроцессорном БПВ, модели взаимодействия программных компонентов OpenGL в БПВ достигнуты следующие результаты:

- разработано специализированное программное обеспечение на основе языков ассемблера и Си, обеспечивающее эффективное управление БПВ при интерактивной визуализации

лизации двух- и трехмерных сцен стандарта OpenGL;

- результаты экспериментальных исследований и испытаний показали следующую производительность БПВ: 10-12 кадров в секунду при визуализации трехмерной подстилающей поверхности из 1200 текстурированных треугольников и 18 кадров в секунду при отображении двухмерной картографической сцены сложностью 3 тыс. треугольников (10 тыс. вершин), 16 тыс. линий;
- предложенный комплексный алгоритм бортовой визуализации позволяет отображать двухмерную карту местности площадью 3000 км² в масштабе 1 : 200 000, а также интерактивно визуализировать трехмерную подстилающую поверхность площадью до 210 км² при полете ПЛА на малых высотах на скорости 1,25 М, что дает возможность пилоту различать объекты с габаритными размерами 100 м на расстоянии 12,6 км;
- разработанные программно-алгоритмические средства позволили создать на базе отечественной универсальной программируемой многоядерной архитектуры компоненты авионики, осуществляющие визуализацию необходимой в бортовых условиях информации с характеристиками производительности и качества изображения, соответствующими современным мировым требованиям;
- внедрение разработанных программно-алгоритмических средств в серии БПВ МГК на основе отечественных микросхем «Мультикор» пиковой производительностью 480 MFLOPS, предназначенных для современных ПЛА (Су-35, Ми-28Н) показало, что они могут быть применены в широком классе задач визуализации: в морской, сухопутной, космической технике, а также при визуализации информации в системе ГЛОНАСС;
- созданы программно-аппаратные средства и алгоритм тестирования компонентов БПВ для осуществления автономного контроля на приемо-сдаточных испытаниях БПВ у изготовителя, а также входного контроля у потребителя.

Разработанную на основе результатов исследования серию БПВ отличает программируемый характер вычислений, который обеспечивает широкие возможности по модернизации штатного программного обеспечения, а также высокоуровневый характер взаимодействия (OpenGL) с несущей БЦВМ.

С точки зрения Государственной стратегии импортозамещения микроэлектронных компонентов проведенное исследование является критически важным ввиду использования в нем отечественных высокопроизводительных СБИС типа «система на кристалле». Автор проводил исследования в рамках «Стратегии развития электронной промышленно-

сти России на период до 2025 года», утвержденной министром промышленности и энергетики РФ в 2007 г., а также «Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ».

Изделия серии МГК включены в «Перечень серийно производимых и перспективных базовых средств вычислительной техники, разработанных на основе отечественной элементной базы, архитектурных, системных, программных и конструктивных решений, принятых в КЦП «Интеграция – СВТ», для межвидового применения» от 01.01.2006 г., утвержденный начальником вооружения Вооруженных Сил Российской Федерации.

Достоверность результатов работы обусловлена использованием общепринятых математических методов обработки изображений и векторных данных, методов разработки и верификации программного обеспечения, а также хорошей сходимостью теоретических оценок с результатами экспериментальных исследований и испытаний.

Внедрение результатов работы. С использованием проведенных в диссертации разработок была создана серия БПВ (МГК, МГК-4, МГК-6) на основе разработанной в ГУП НПЦ «ЭЛВИС» отечественной платформы проектирования систем на кристалле «Мультитор», что подтверждено актами о внедрении соответствующих изделий на предприятиях ОАО «Раменское Приборостроительное Конструкторское Бюро», ФГУП «НИИ «Субмикрон» г. Москва, ГУП НПЦ «ЭЛВИС» г. Москва. Серия БПВ МГК предназначена для использования в бортовом оборудовании современных ПЛА (Ми-28Н, Су-35).

В рамках диссертационной работы **лично автором** решены следующие задачи.

1. Проведен анализ требуемой вычислительной мощности (500 MFLOPS) и пропускной способности каналов передачи данных (не менее 400 МБ/с) БПВ при визуализации с частотой 25 Гц трехмерной подстилающей поверхности при движении ПЛА на малых высотах со скоростью 1,25 М.
2. Аналитически формализованы критерии эффективного управления обработкой графической информации в гетерогенных многоядерных системах на кристалле.
3. Разработан алгоритм постадийной конвейеризации для эффективного управления БПВ на основе программируемых систем на кристалле.
4. В терминах сетей Петри разработан параллельный флажковый алгоритм, обеспечивающий эффективное управление обработкой графической информации в многопроцессорных БПВ.
5. Предложен способ функциональной декомпозиции программной архитектуры OpenGL

- в БПВ, учитывающий особенности гетерогенной структуры ядер систем на кристалле.
6. Разработаны эффективные алгоритмы управления обработкой вызовов OpenGL в многопроцессорных БПВ, а также алгоритмы прикладного программного обеспечения БЦВМ по эффективной визуализации двух- и трехмерной бортовой обстановки.
 7. Определены компоненты и разработано ПО OpenGL с учетом требований к производительности и отказоустойчивости мезонинного БПВ.
 8. Разработан комплексный алгоритм бортовой визуализации, позволяющий интерактивно отображать трехмерную подстилающую поверхность, а также визуализировать двухмерную карту местности в БПВ.
 9. Разработан алгоритм тестирования компонентов, реализовано ПО технологической контрольно-проверочной аппаратуры БПВ и ПО для диагностики, отладки и поддержки обновлений графической визуализации БПВ.
 10. Разработаны алгоритм и методика комплексной оценки параметров производительности БПВ, проведено экспериментальное исследование производительности БПВ по визуализации двух- и трехмерной подстилающей поверхности.
 11. Проведено внедрение результатов исследования мезонинных БПВ серии МГК на предприятиях ФГУП «НИИ «Субмикрон» и ОАО «Раменское Приборостроительное Конструкторское Бюро».
 12. Автор участвовал в разработке программной, текстовой и конструкторской документации, а также непосредственно проводил инсталляционные и сопроводительные работы в местах эксплуатации созданных изделий.

На защиту выносятся:

- анализ требуемой вычислительной мощности (500 MFLOPS) и пропускной способности внутренних каналов передачи данных (400 МБ/с) в БПВ;
- формализованные автором критерии эффективного управления обработкой графической информации в БПВ на основе гетерогенных многоядерных систем на кристалле;
- алгоритм постадийной конвейеризации для эффективного управления БПВ на основе систем на кристалле с программируемой архитектурой, позволяющий получить производительность растеризации изображения, равную 92% от теоретических возможностей вычислительных ядер;
- параллельный флажковый алгоритм управления БПВ на основе сетей Петри, при котором достигается повышение производительности обработки графической информации

двухпроцессорного БПВ на 92-95%;

- способ функциональной декомпозиции программной архитектуры OpenGL в БПВ, учитывающий гетерогенную структуру ядер системы на кристалле;
- разработанное ПО OpenGL для интерактивной визуализации подстилающей поверхности в БПВ, ПО технологической контрольно-проверочной аппаратуры БПВ;
- алгоритмы управления обработкой вызовов OpenGL в многопроцессорных БПВ, а также алгоритмы прикладного программного обеспечения БЦВМ по эффективной визуализации двух- и трехмерной подстилающей поверхности;
- комплексный алгоритм бортовой визуализации, позволяющий интерактивно отображать трехмерную подстилающую поверхность площадью до 210 км² при полете ПЛА на малых высотах на скорости 1,25 М, визуализировать двухмерную карту местности площадью 3000 км² в масштабе 1 : 200 000;
- алгоритм и методика комплексной оценки параметров производительности БПВ, а также результаты экспериментальной оценки производительности созданных БПВ по визуализации двух- и трехмерной подстилающей поверхности;
- внедрение результатов исследования на предприятиях ГУП НПЦ «ЭЛВИС», ФГУП НИИ «Субмикрон» и ОАО «Раменское Приборостроительное Конструкторское Бюро».

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: 14-й и 15-й Всероссийских межвузовских научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2007, 2008», Москва, МИЭТ; 17-й Международной конференции по компьютерной графике и компьютерному зрению «Graphicon'2007», Москва, МГУ; 6-й Международной конференции «Авиация и космонавтика 2007», Москва, МАИ; V Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и кибернетика 2007», Днепропетровск, ИТН НАН; 10-й международной научно-технической конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2008», Москва, ИПУ РАН; Всероссийской конференции молодых ученых и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике-2008», Москва, МАИ; Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2008», Истра, ИППМ РАН; XXXIV международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2008», Москва, МАТИ.

По теме диссертации опубликовано 19 научных работ. Из них в ведущих рецензи-

руемых журналах, входящих в перечень, утвержденный ВАК – 8, тезисов докладов все-российских и международных конференций – 10, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Без соавторов опубликовано 15 работ.

Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи работы, перечисляются элементы научной новизны и практической значимости, дается краткое содержание глав работы.

В **первой** главе на основе анализа целевой области использования доказаны функциональные требования к БПВ, а именно: визуализация трехмерной подстилающей поверхности и двумерных географических карт; возможность вывода видеоизображения; индикация состояния бортовых систем. При этом для решения задачи визуализации трехмерной подстилающей поверхности требуются наибольшие вычислительные ресурсы, с ее помощью на индикаторе обычно подсвечиваются области опасных высот. Площадь визуализируемой земной поверхности при перспективном зрении задается соотношением

$$S_v = \frac{1}{2} \cdot 2h_F^2 \operatorname{tg} \beta - \frac{1}{2} \cdot 2h_N^2 \operatorname{tg} \beta = \frac{W}{H} \cdot (h_F^2 - h_N^2) \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

где h_F - дальняя плоскость отсечения; h_N - ближняя плоскость отсечения; W , H - ширина и высота кадра; α , β - соответственно вертикальный и горизонтальный углы перспективного проецирования.

Визуализация трехмерной подстилающей поверхности актуальна при полете ПЛА на малых высотах, в этих условиях современные ПЛА способны развивать максимальную скорость около 420 м/с (1,25 М). Для обеспечения своевременной реакции пилота необходима визуализация объектов на дальности, соответствующей подлётному времени 20-30 с, это дает возможность рассчитать расстояние до дальней плоскости проективного отсечения равное 12,6 км. Подставляя в (1) значения $h_F = 12,6$ км, $h_N = 1$ км, $\frac{W}{H} = \frac{4}{3}$, $\alpha = 45^\circ$,

получаем $S_v = 210,3$ км². В теории компьютерной графики визуализацию реальных объектов принято осуществлять посредством их аппроксимации триангулированной координатной сеткой. Если поверхность оцифрована с фиксированным шагом $d = 100$ м, то для визуализации всей области видимости посредством фиксированной прямоугольной сетки

высот потребуется порядка $2 \cdot \left(\frac{S_v}{d^2} \right) = 2 \cdot \left(\frac{210,3}{0,1^2} \right) = 42060$ треугольников. Однако из особенностей перспективного преобразования ясно, что фиксированный шаг сетки, равный

$d = 100\text{ м}$, является избыточным на значительном удалении от точки просмотра. Адаптированный к перспективному проецированию шаг сетки позволяет сократить число треугольников, необходимых для визуализации приблизительно до

$$T = 2 \cdot \log_{\frac{h_n+d}{h_n}}(h_F - h_N) \cdot \frac{2h_N \cdot W \cdot \text{tg} \alpha}{d \cdot H} \approx 1404. \quad (2)$$

Оценку вычислительной сложности визуализации Θ в аппаратуре программируемого БПВ сцены, заданной треугольниками, условимся считать:

$$\Theta = n \cdot (T \cdot 3 \cdot (t_1 + t_2 + t_3) + T \cdot (t_4 + t_5 + t_6) + W \cdot H \cdot (t_7 + t_8)), \quad (3)$$

где $n = 25$; T - число треугольников в сцене; t_1 - число операций модельно-видового преобразования; t_2 - число операций для расчета освещения; t_3 - число операций проекционного преобразования; t_4 - число операций отсечения областью просмотра; t_5 - число операций удаления невидимых элементов; t_6 - число операций разбиения на фрагменты; t_7 - число операций алгоритма Z-буфера; t_8 - число операций текстурной фильтрации.

На основе (3) получена оценка $\Theta = 436\text{ MFLOPS}$ вычислительной сложности при визуализации сцены из 1500 текстурированных треугольников. Производительность существующих отечественных процессоров класса 1890BM2T недостаточна (50 MFLOPS) для решения обозначенных задач визуализации. Анализ современных аппаратных средств для реализации БПВ показал, что при учете требований к аппаратуре и стоимости разработки целесообразно построение БПВ на основе высокопроизводительных гетерогенных многоядерных систем на кристалле.

На основе анализа методов организации программного последовательно-параллельного графического конвейера показано, что все существующие методы предназначены для гомогенных мультимедийных систем, не используют в полной мере ресурсов вычислительных узлов, а также не учитывают гетерогенную структуру программируемых многоядерных систем на кристалле.

Обосновано использование программного интерфейса OpenGL версии 1.x с сокращенным набором команд, необходимых для решения обозначенных задач БПВ.

Вторая глава посвящена синтезу структуры параллельно функционирующего программного графического конвейера (ГК) в гетерогенной многоядерной системе на кристалле, состоящей из управляющего m -(*master*) ядра, нескольких вычислительных s -(*slave*) ядер. На рис. 1 приведена разработанная модель функционирования ГК по обработке графической информации. Последовательность вычислений s -ядрами задается ал-

горитмами $A_k, k = \overline{1, q}$ обработки информации, $q = 3$ - число стадий ГК. Выходные данные $\{Y_k\}$ k -й стадии сортируются и подаются на вход $\{X_{k+1}\}$ ($k < q$).

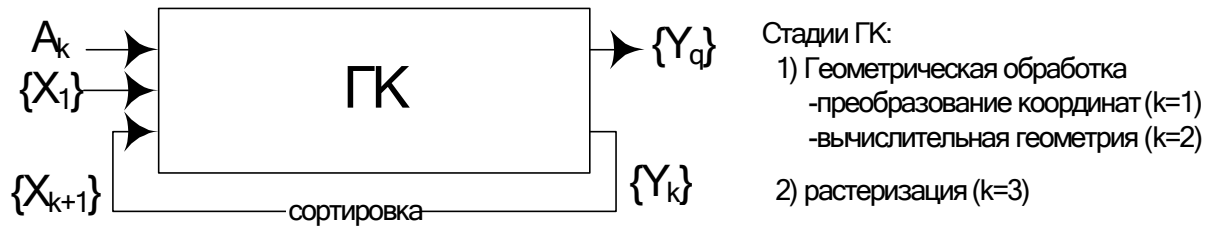


Рис. 1. Функционирование ГК по обработке входных и промежуточных данных.

Полученные в работе формальные описания $\{X_k\}$ и A_k позволяют представлять их в виде $\{X_k\} = \bigcup_{d=1}^{P_k} \{X_{k,d}\}$, $P_k \leq |\{X_k\}|$. Под заданием обработки будем понимать $I_{k,d} = \langle X_{k,d}, A_k \rangle$.

Для эффективного управления ГК необходимо минимизировать дисбаланс времени загрузки ядер, поэтому

$$F_1(X_{k,d}) = \max_{\forall s \in S} t_n(s) - \min_{\forall s \in S} t_n(s) \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $t_n(s) = t_{n-1}(s) + \sum_{k=1}^q \sum_{d_s} \tau_n(I_{k,d_s}^s)$, ($t_0(s) = 0$) - момент окончания обработки n -го кадра ядром s , $\tau(I_{k,d}^s)$ - время обработки задания $I_{k,d}$ ядром s .

Вместе с тем, преимущество многоядерных масштабируемых решений оценивается также эффективностью параллельной обработки (5):

$$E_p = \frac{T_1(I_k)}{p \cdot T_p(I_k)} = \frac{T'_k + T''_1(I_k)}{p \cdot (P_k \cdot T'_k + T''_p(I_k))}, \quad (5)$$

где $T_p(I_k)$ - время обработки задания I_k p узлами в системе, T'_k - время подготовительных операций задания k -й стадии; $T''_p(I_k)$ - эффективное время обработки задания I_k p вычислительными узлами (за вычетом времени подготовительных операций).

Максимум (5) достигается при

$$F_2(X_{k,d}) = \sum_{k=1}^q T'_k \cdot P_k \rightarrow \min. \quad (6)$$

Для эффективного управления ГК в многоядерной системе необходимо найти такой алгоритм управления, для которого при заданных $\{X_k\}$ и A_k были бы выполнены условия (4) и (6). Задача осложняется тем, что для разбиения $\{X_k\}$ необходимо знать $|\{X_k\}|$, а для выполнения (4) необходимо знать $t_{n-1}(s), \forall s$ - фронт обработки задания, что возможно

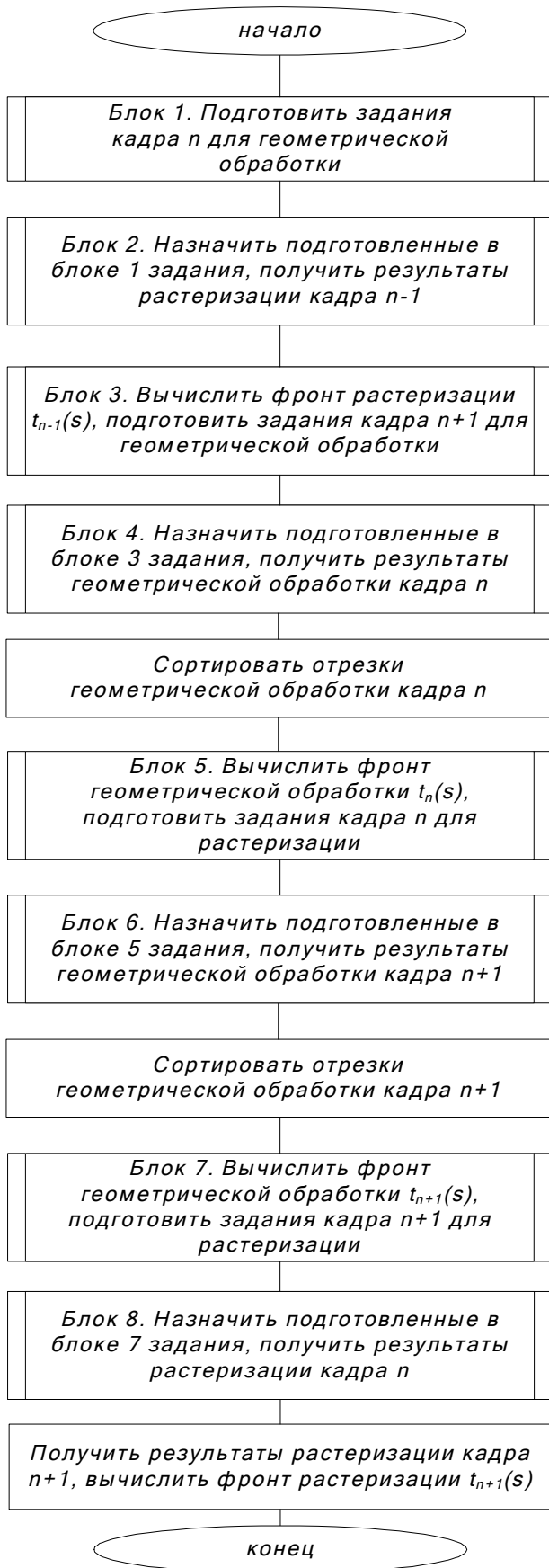


Рис. 2. Блок-схема алгоритма постадийной конвейеризации.

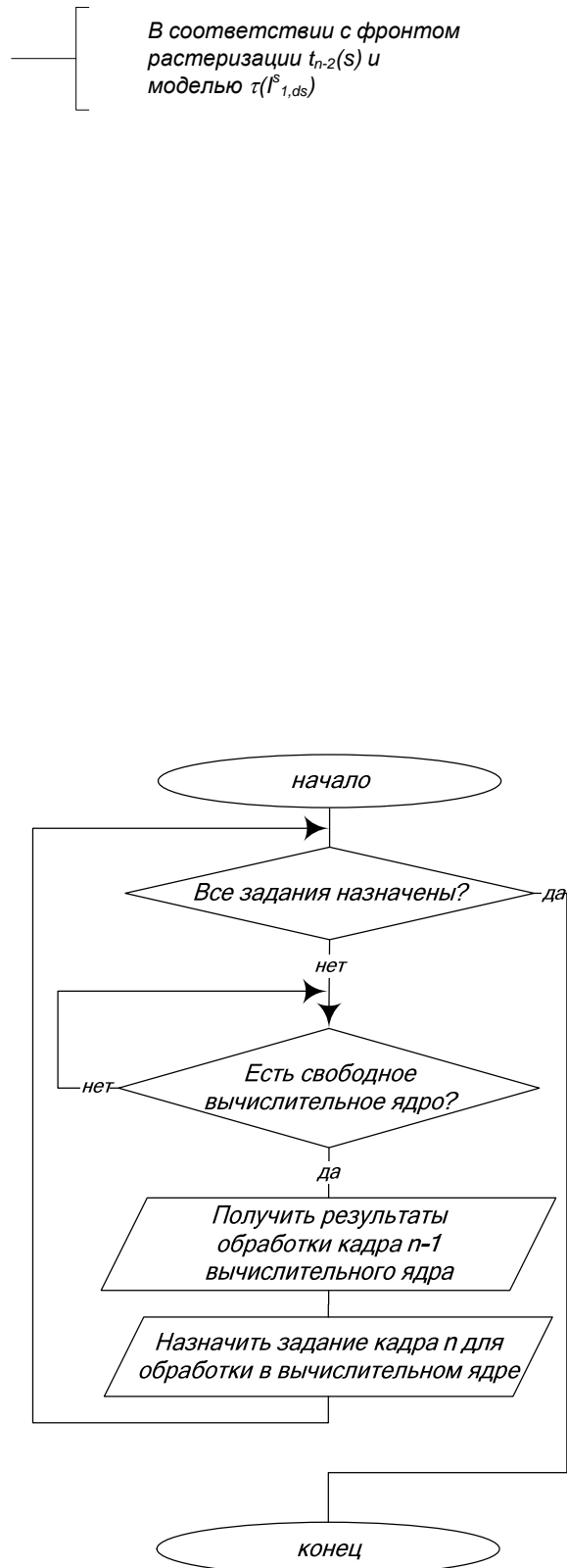


Рис. 3. Блок-схема типового алгоритма обработки заданий блоков 2,4,6,8 алгоритма рис. 2.

только после окончания обработки всего задания I_{k-1} . Кроме этого, разбиение $\{X_k\}$ сопряжено с сортировкой данных $\{Y_{k-1}\}$.

В работе впервые предложен алгоритм постадийной конвейеризации, заключающийся в попеременном чередовании стадий ГК соседних кадров в s -ядрах, при этом сортировка данных $\{Y_{k-1}\}$ происходит управляющим m -ядром. На рис. 2 приведена блок-схема алгоритма управления s -ядрами. Алгоритм обработки заданий блоков 2,4,6,8 представлен на рис. 3. Основные преимущества алгоритма состоят в следующем. При обработке s -ядрами добавленных стадий у m -ядра появляется время на обслуживание системы, сортировку данных, а также на формирование последующих заданий для текущего кадра. s -ядра осуществляют обработку данных без простоев. Апостериорные отклонения $\tau(I_{k,d}^s)$ нивелируются балансировкой времени загрузки вычислительных ядер.

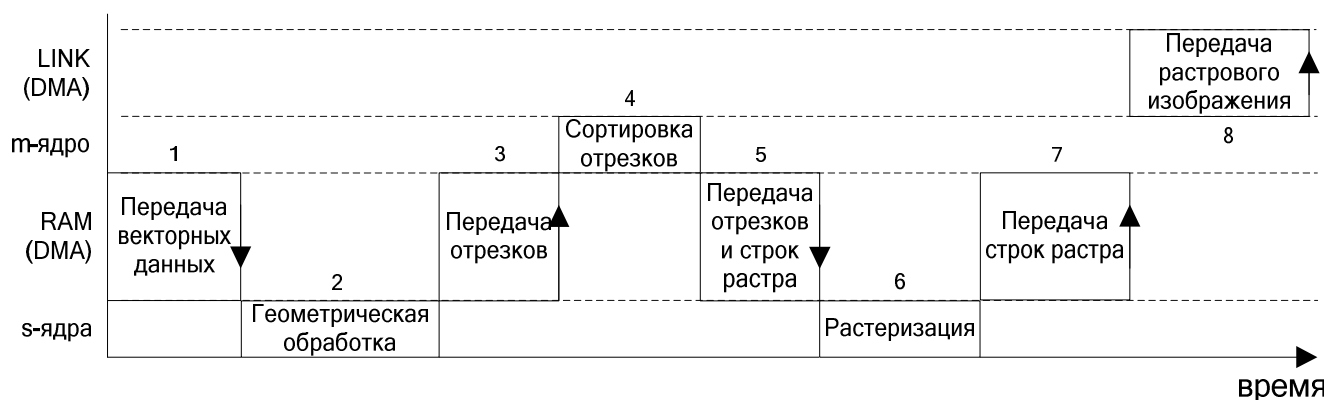


Рис. 4. Диаграмма функционирования узлов БПВ по обработке информации.

На рис. 4 приведена диаграмма функционирования основных узлов БПВ при обработке каждого кадра алгоритмом постадийной конвейеризации. Суммарный объем данных, передаваемых по системной шине в единицу времени (участки 1,3,5,7,8), не превосходит

$$S_{\Sigma} = N_{fr} \cdot (N_{tri} \cdot S_{vect} + 2 \cdot (S_{trim} + W \cdot H \cdot (S_{px} + S_z)) + 2 \cdot W \cdot H \cdot S_{px}) = 390,33 \cdot 10^6 < 400 \text{ МБ/с}, \quad (7)$$

где $N_{fr} = 25$ (необходимое число кадров в секунду), $W = 800, H = 600, S_{px} = 4$ (число байт для кодирования пикселя), $N_{tri} = 1500$ (число треугольников), $S_{vect} = 108$ (число байт для кодирования треугольника), $S_z = 4$ (глубина Z-буфера), $S_{trim} = 1965600$ (объем информации кодирования фрагментов сцены).

При выборе числа и конфигурации s -ядер в гетерогенной многоядерной системе на кристалле необходимо учитывать формулу (7). В том случае, если пропускная способность шины данных в конкретной системе не обеспечивает выполнение формулы (7), целесообразно рассмотреть вариант построения многопроцессорных БПВ.

Для реализации многопроцессорной обработки графической информации в БПВ предложен новый параллельный флажковый алгоритм на основе маркированных сетей Петри (рис. 5, N1, N2 - первая и вторая система на кристалле). При последовательной обработке (рис. 5, слева) N1 осуществляет геометрическую обработку, N2 формирует окончательное растровое изображение. Второй случай (рис. 5, справа) – когда N1 и N2 имеют общий ресурс – кадровый буфер. При помощи флажка-семафора право работы с ним переходит от одной системы к другой. Основные условные обозначения в терминах Петри: s_1, s_{11}, s_{21} - состояния готовности; s_2, s_{12}, s_{22} - геометрическая обработка; s_3, s_{13}, s_{23} - растеризация фрагментов; s_4, s_{14}, s_{24} - передача растрового изображения; s_5 - состояние готовности N2 к растеризации; s_{15}, s_{25} - состояния владения флажком после передачи кадра соответственно первой и второй системой на кристалле.

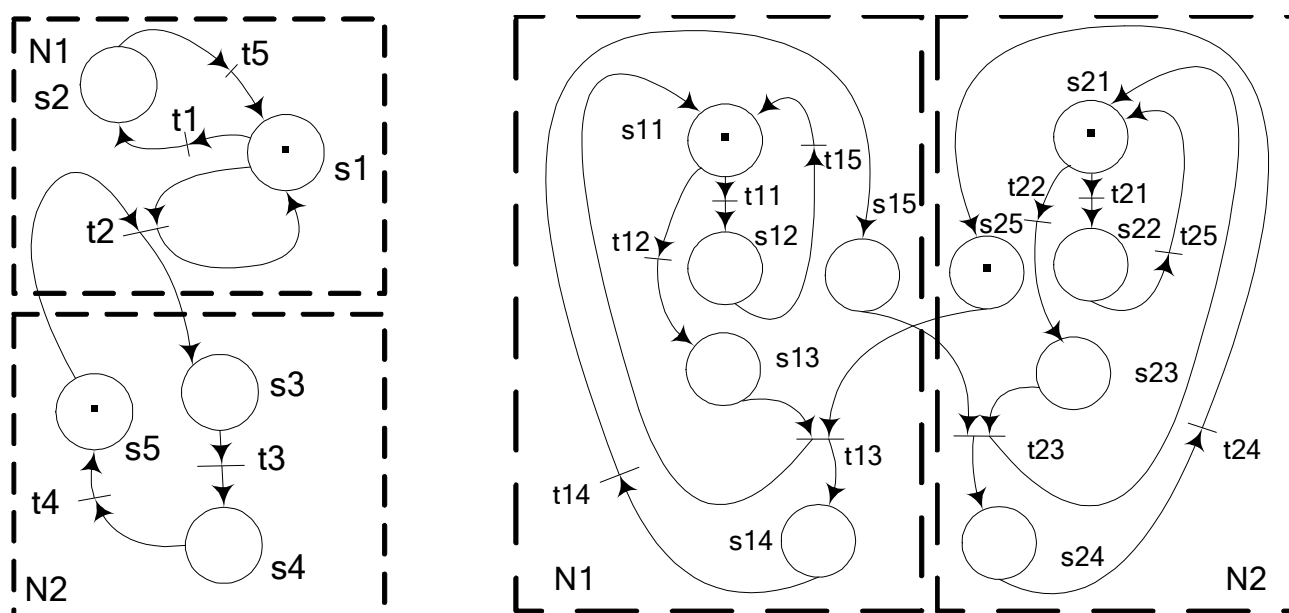


Рис. 5. Маркированные сети Петри разработанных алгоритмов последовательной (слева) и параллельной флажковой (справа) обработки кадров в многопроцессорном БПВ.

К недостаткам первого подхода можно отнести как существенный информационный поток данных между N1 и N2 на переходе t_2 (согласно (7) он составляет 145,14 МБ/с), так и дисбаланс во времени обработки стадий вычислительной геометрии и растеризации.

Второй способ является предпочтительным, поскольку осуществляется параллельная флажковая обработка соседних кадров. Промежуточный обмен данными между N1 и N2 отсутствует, поскольку они обрабатывают различные кадры. Таким образом, предложенный параллельный флажковый алгоритм работы двухпроцессорного БПВ может быть применен и к БПВ с большим числом систем на кристалле.

В **третьей** главе разработаны программно-аппаратные средства управления БПВ. С

применением метода декомпозиции выделены следующие основные компоненты в цепи функционирования ПО БПВ на программном уровне (рис. 6): библиотека OpenGL, интерфейс OpenGL, менеджер заданий, программное обеспечение вычислительных узлов (ВУ). Библиотека OpenGL исполняется на стороне клиента и содержит точки входа для функций OpenGL. Интерфейс OpenGL функционирует на вычислительных мощностях сервера OpenGL, осуществляет прием закодированных вызовов OpenGL, производит их декодирование и формирование внутренних блоков данных задания трехмерной сцены (для обработки в ВУ) и других команд, предусмотренных стандартом OpenGL. Менеджер заданий управляет назначением блоков данных для обработки в ВУ, сформированных интерфейсом OpenGL согласно алгоритмам и методикам, предложенным во второй главе.

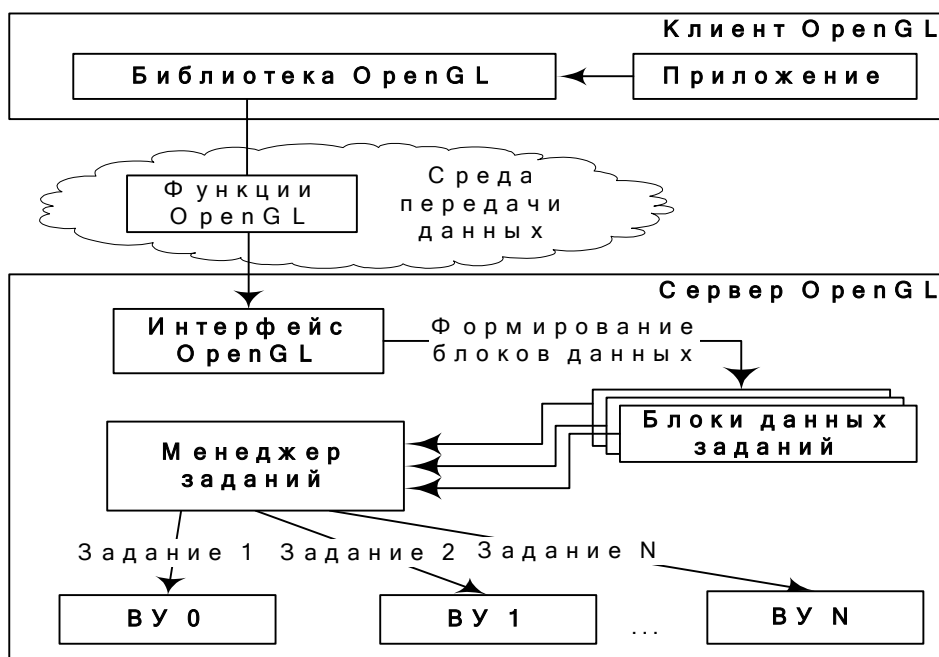


Рис. 6. Информационный поток в архитектуре ПГИ OpenGL БПВ.

На основе приведенного сравнительного анализа преимуществ и недостатков известных языков программирования для управления в БПВ обоснована реализация ПО вычислительных узлов на языке ассемблера. Для ПО управляющего ядра предпочтительным является выбор языковых инструментов GNU C.

В соответствии с разработанной архитектурой ПГИ OpenGL предложена структура блоков данных OpenGL, описанная на языке Си, размер которой определяется

$$DS_{prim_block}(wCnt) = S_{const} + wCnt \cdot \left(\sum_j S_{attr}^j \right), \quad (8)$$

где $wCnt$ - число вершин в блоке; $DS_{prim_block}(wCnt)$ - размер блока; S_{const} - размер заголовка структуры, определяемый A_k (80 байт); j - количество атрибутов вершин (коор-

динаты, нормали, цвета, координаты текстуры); S_{attr}^j - размер данных j -го атрибута.

На рис. 7 приведена предложенная обобщенная схема БПВ. Для передачи входной информации предложено использовать шину PCI (PMC). В качестве канала выходного изображения предлагается использовать совместимый с бортовыми индикаторами интерфейс передачи, например канал Fibre Channel.

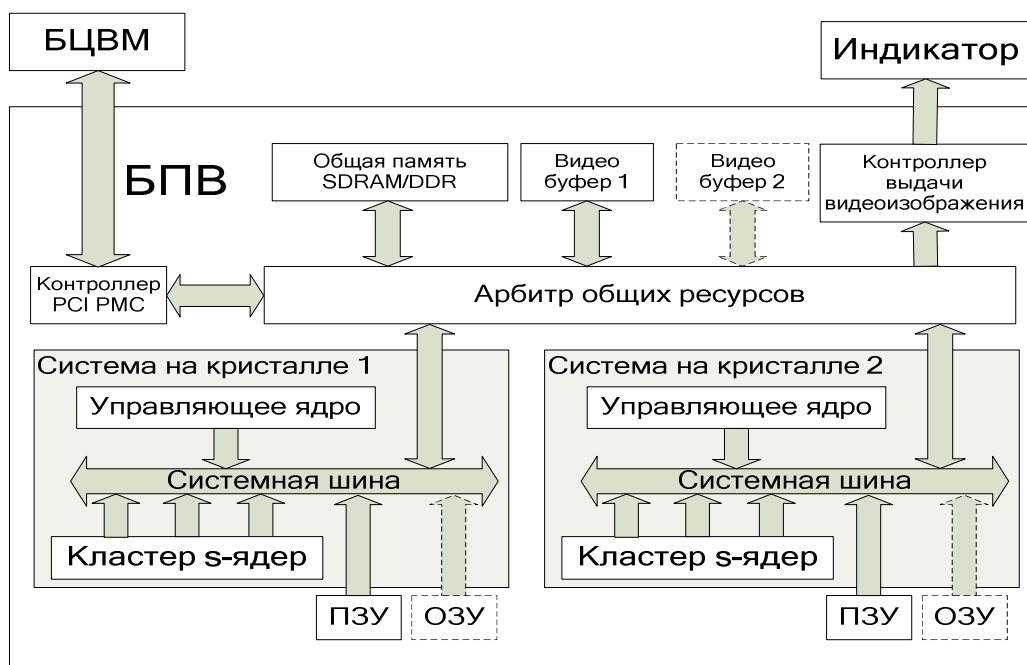


Рис. 7. Обобщенная схема БПВ.

Разработаны концептуальные элементы и алгоритмы ПО технологической контрольно-проверочной аппаратуры для осуществления прямо-сдаточных испытаний БПВ и обеспечения необходимого уровня контролепригодности БПВ.

В четвертой главе проведена экспериментальная оценка эффективности разработанных алгоритмов и программ, рассмотрены практические особенности работы БПВ.



Рис. 8. БПВ серии «Модуль графического контроллера».

На основе результатов внедрения проведенных разработок в серии двухпроцессорных БПВ (МГК, МГК-4, МГК-6, рис. 8) показано преимущество программируемой архитекту-

ры БПВ при визуализации сцен, имеющих бортовую специфику. Рассмотрены практические аспекты создания ПО БПВ. Приведено описание программно-аппаратных средств технологической контрольно-проверочной аппаратуры.

Для оценки эффективности предложенных алгоритмов и разработанного ПО, анализа параметров быстродействия БПВ, а также адекватности модели (3) применен следующий подход. Модель (3) представлена в виде

$$n(T, R) = \frac{\Theta}{(T \cdot C_T + R \cdot C_R)}, \quad (9)$$

где $C_T = 3 \cdot (t_1 + t_2 + t_3) + (t_4 + t_5 + t_6)$, $C_R = (t_7 + t_8)$, $R = W \cdot H$.

Поскольку для конкретного БПВ $\Theta = const$, то получена зависимость числа кадров в секунду от числа треугольников трехмерной сцены и ее площади на экране. Коэффициенты C_T, C_R отражают согласно модели (3) удельное число векторных и растровых операций соответственно. Для оценки производительности БПВ необходимо определить C_T, C_R из практически полученных значений $n(T, R)$ и соотнести их с теоретическими оценками, полученными в первой главе. Для определения C_T, C_R в работе применен нелинейный вариант метода наименьших квадратов. Расчет коэффициентов C_T, C_R модели (9) проводился в интегрированной среде MATLAB с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта. По результатам расчета получены значения $C_T = 1,8703 \cdot 10^4$, $C_R = 67$. Данные экспериментального исследования и моделирования представлены в табл. 1 и на рис. 9.

Табл. 1. Отклонения экспериментальных значений от теоретической модели $n(T, R)$.

R_j , пикс.	T_i , шт. треугольников								
	302	602	902	1202	1502	1802	2102	2402	2702
48 000	5,717	2,673	-0,054	-0,341	0,040	-0,434	0,040	-0,374	0,374
96 000	1,786	0,382	-0,843	-1,099	-0,913	-0,921	-0,887	-0,647	-0,379
144 000	0,958	-0,005	-0,717	-0,422	-0,518	-0,735	-0,315	-0,637	-0,761
192 000	-0,398	-1,099	-0,548	-0,555	-1,005	-1,041	-0,493	-0,760	-0,684
240 000	-0,305	-0,525	-0,907	-0,188	-0,301	-0,544	-0,650	-0,500	-0,442
288 000	-0,702	-0,789	-0,883	-0,933	-0,843	-0,455	-0,626	-0,583	-0,802
336 000	-1,071	-0,378	-0,503	-0,677	-0,628	-0,463	-0,129	-0,250	-0,348
384 000	-0,949	-1,245	-0,617	-0,641	-0,555	-0,102	-0,226	-0,170	-0,258
432 000	-0,843	-1,057	-1,258	-0,761	-0,751	-0,611	-0,623	-0,619	-0,592

За исключением краевого эффекта в точке $(T = 302, R = 48 \cdot 10^3)$, вызванного ограничением каналов передачи растрового изображения, модель (3) достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными (отклонение $< 14\%$).

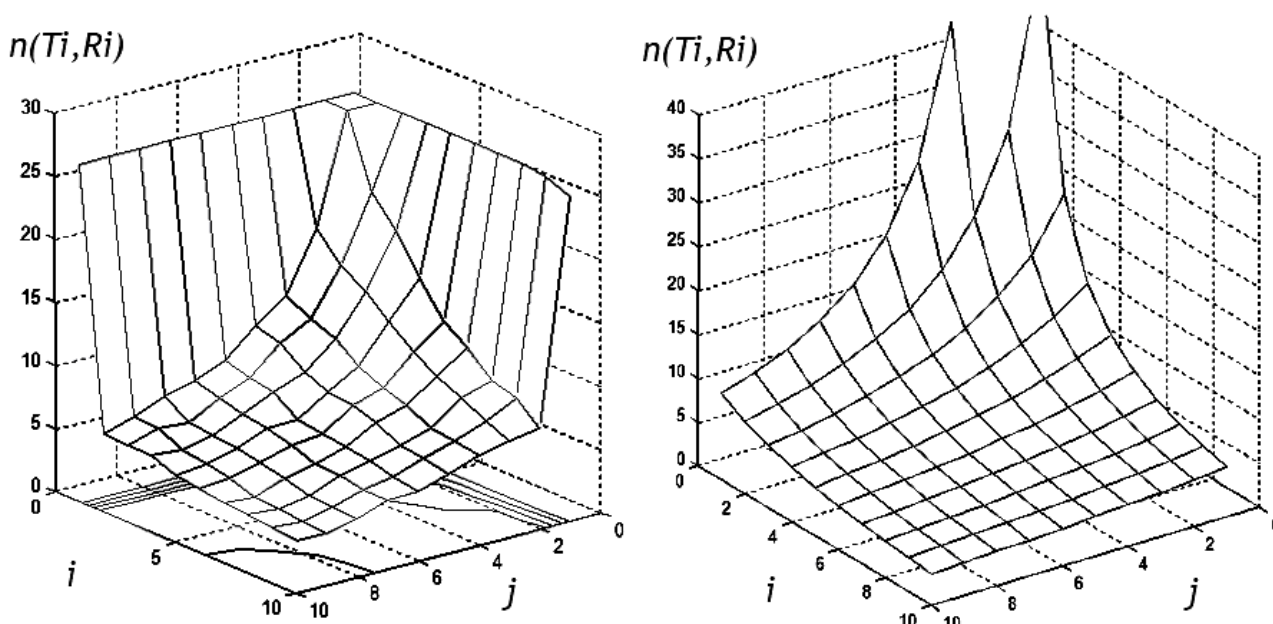


Рис. 9. Быстродействие МГК (слева) и теоретическая модель (справа).

Учитывая экспериментальные результаты, модель производительности БПВ на основе систем на кристалле «Мультикор» примет вид

$$\Theta = n \cdot (C_T \cdot T + C_R \cdot W \cdot H), \text{ где } n = 25; C_T = 1,8703 \cdot 10^4; C_R = 67.$$

Тогда для достижения производительности в 25 кадров в секунду при визуализации сцены из 1500 треугольников при разрешении 640x480 практически потребуется $\Theta = 1,216$ GFLOPS. Таким образом, на основе экспериментальных исследований и испытаний показано, что производительности эквивалентного БПВ на основе двух микросхем 1892BM4Я (1,6 GFLOPS) или одной микросхемы 1892BM7Я (4 GFLOPS) вполне достаточно для интерактивной визуализации бортовой обстановки со скоростью не менее 25 кадров в секунду.

Разработан механизм компенсации задержки интерактивности визуализации. Вычисленное значение задержки визуализации, определяемое сложностью сцены, составило 100-150 мс. Практически это означает, что растровое изображение отображается индикатором на 100-150 мс позже, чем вся входная информация об очередном кадре подана на вход БПВ. За это время на малых высотах ПЛА преодолевает около 60 м. Для решения ряда боевых задач необходимо обеспечить большую точность позиционирования ПЛА при визуализации, а, следовательно, и меньшую задержку визуализации.

Идея предлагаемого алгоритма состоит в использовании для определения значения времени компенсации полученной модели производительности БПВ (9), согласно которой, например, для визуализации кадра, состоящего из 1200 треугольников, покрывающих 288 000 пикселей экрана, потребуется время

$$t = \frac{(C_T \cdot T + C_R \cdot W \cdot H)}{\Theta} = 144,92 \text{ мс}, \quad (10)$$

где $\Theta = 288 \text{ MFLOPS}$, $C_T = 1,8703 \cdot 10^4$; $C_R = 67$, $W \cdot H = 288 \cdot 10^3$, $T = 1200$.

Учитывая максимум величины отклонения 14% теоретической модели от эксперимента, получаем доверительный интервал для задержки визуализации $t = [124,63; 165,2]$, которому удовлетворяют результаты экспериментальных исследований. С использованием разработанного алгоритма компенсации удастся уменьшить задержку визуализации почти в 8 раз – до 20,2 мс, за это время на малых высотах ПЛА преодолевает не более 8,4 м, что значительно увеличивает точность позиционирования ПЛА при визуализации.

Разработанный комплексный алгоритм бортовой визуализации (рис. 10) включает всю последовательность действий от получения регулярной сетки высот из базы данных до вывода изображения трехмерной подстилающей поверхности на бортовой индикатор ПЛА. Обозначения на рисунке: $y_{x,z}^{(i)}$ - высота подстилающей поверхности в точке (x, z) , $e_{x,z}^{(i)}$ - ошибка аппроксимации подстилающей поверхности на i -м уровне разрешения, $\{N\}$ - множество точек подстилающей поверхности; $\{N_k\}$ - подмножество точек подстилающей поверхности всех уровней разрешения в квадрате $(x_k, z_k) - (x_{k+1}, z_{k+1})$, m, J - глобальный и локальный счетчики кадров, W - габаритная координатная рамка, задаваемая плоскостями проективного отсечения, $\{N_{wf}\}$ - подмножество точек подстилающей поверхности внутри квадратов, пересекающих или находящихся внутри текущей габаритной координатной рамки, ε_n - допустимая геометрическая ошибка аппроксимации подстилающей поверхности квадрата n . Примеры изображений, полученных в БПВ МГК-6 ПЛА Су-35 с помощью комплексного алгоритма бортовой визуализации, приведены на рис. 11 и 12.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Приложения содержат акты о внедрении проведенных в диссертации исследований, поясняющие схемы стенда ТКПА ЮШКР.468261.177, фрагменты программ, иллюстрирующие основные разработанные алгоритмы, материалы для обработки экспериментальных данных и результаты моделирования, а также копии свидетельства регистрации программы для ЭВМ и диплома лауреата конференции.

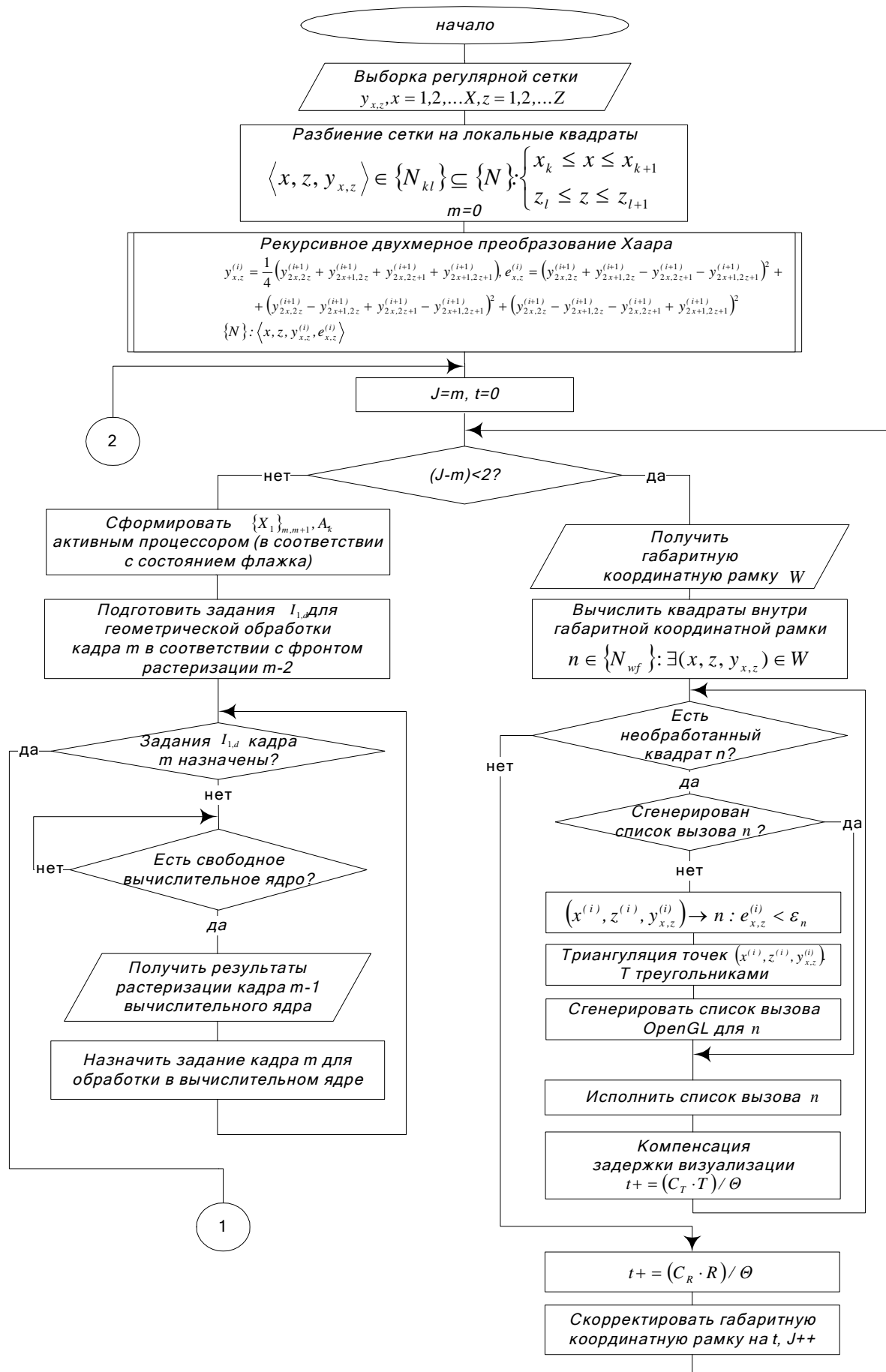


Рис. 10. Блок-схема комплексного алгоритма визуализации подстилающей поверхности в бортовом приборе визуализации МГК-6 ПЛА Су-35.

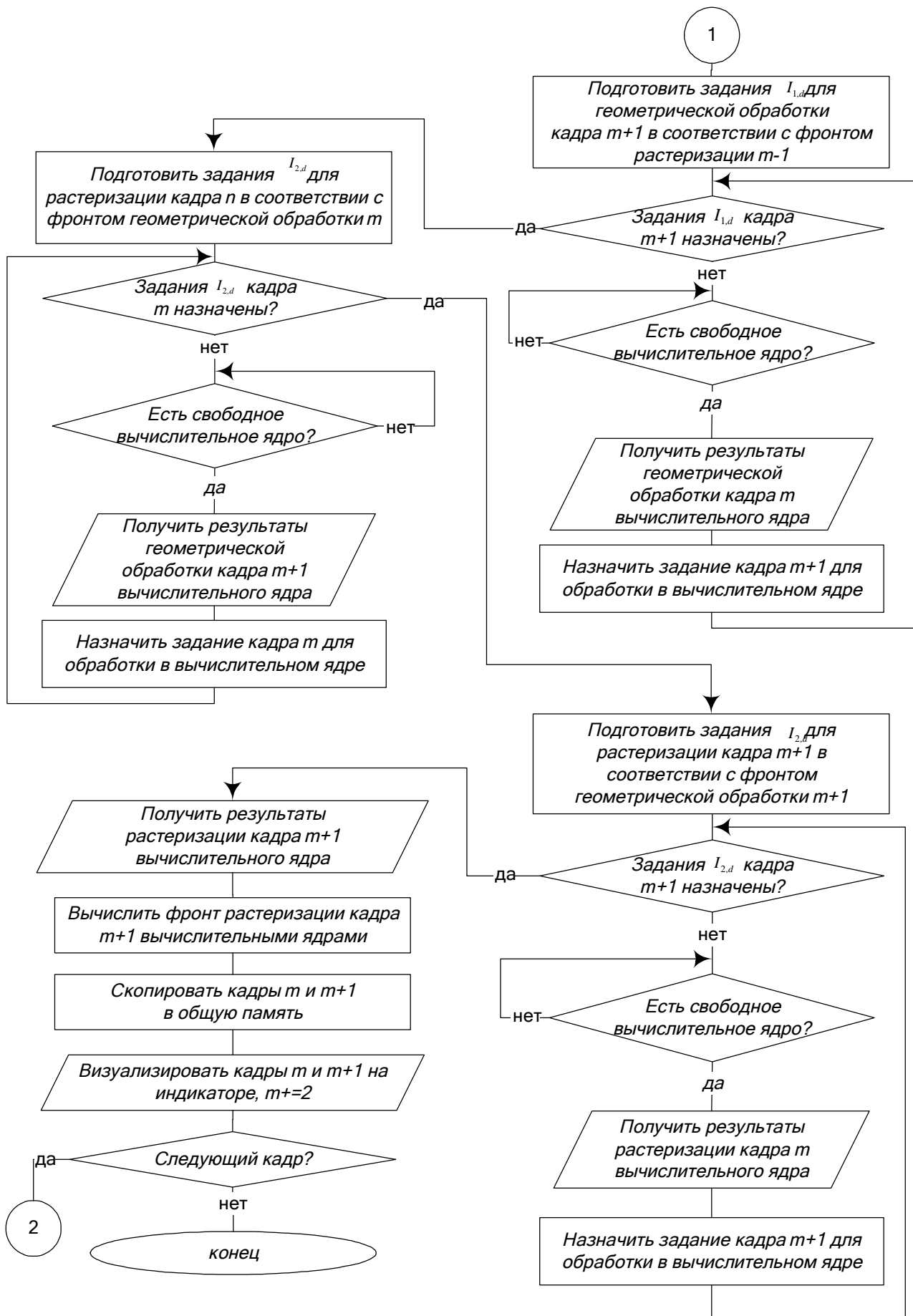


Рис. 10. Блок-схема комплексного алгоритма визуализации подстилающей поверхности в бортовом приборе визуализации МГК-6 ПЛА Су-35 (продолжение).

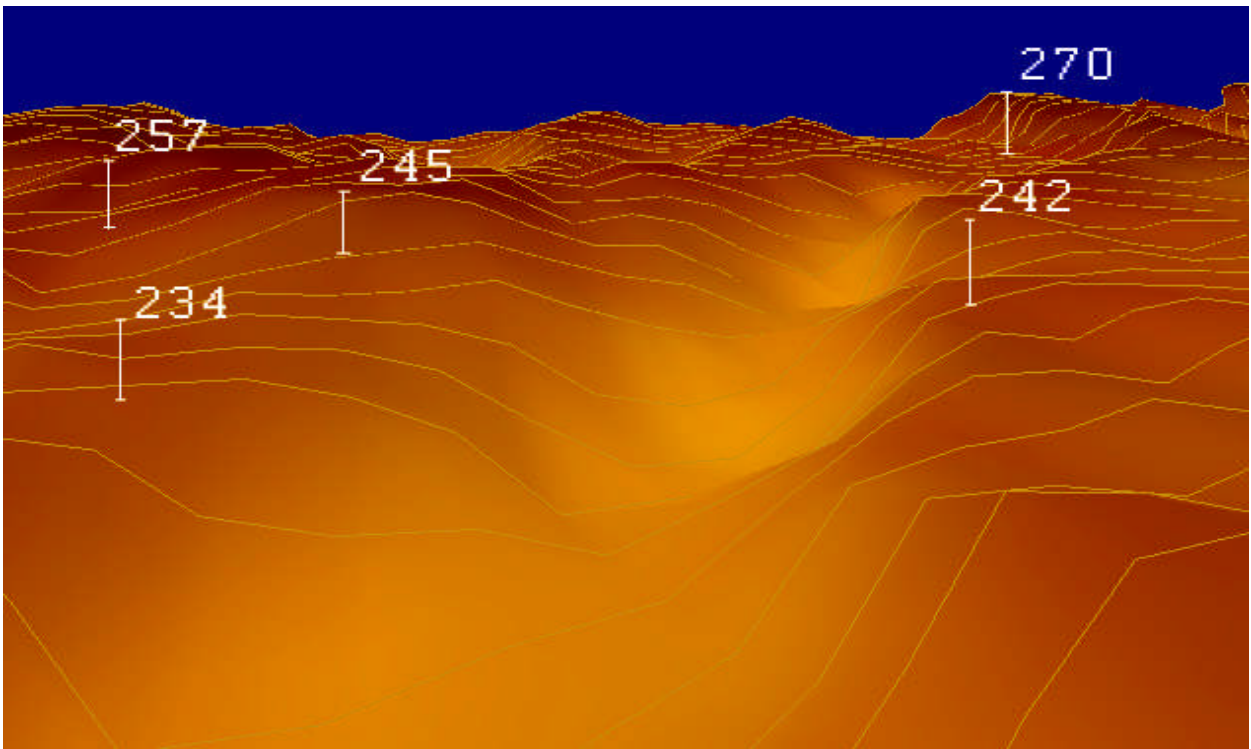


Рис. 11. Визуализация подстилающей земной поверхности с использованием комплексного алгоритма бортовой визуализации в БПВ МГК-6 для ПЛА Су-35 (области опасных высот обозначены высотными метками).

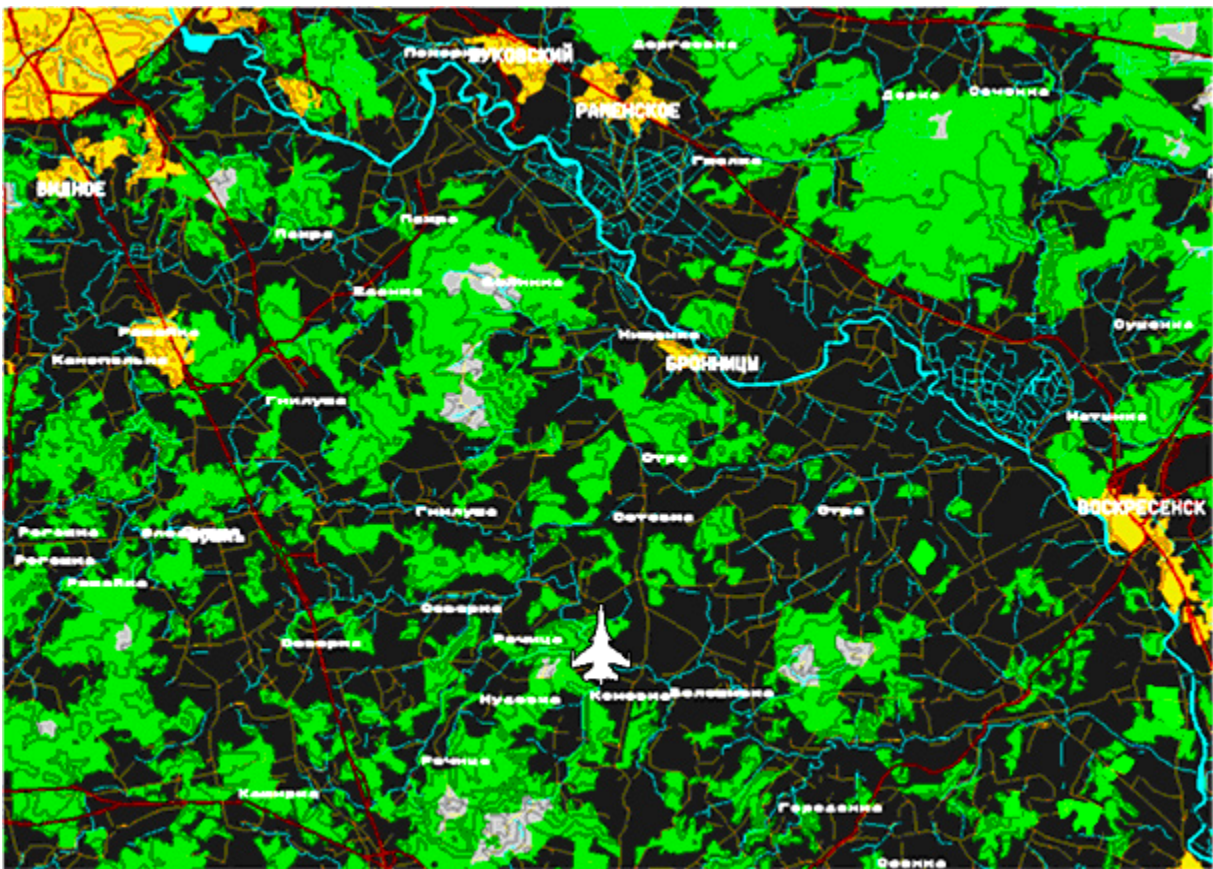



Рис. 12. Визуализация двумерной карты местности в БПВ МГК-6 для ПЛА Су-35 (фрагмент Московской области, 3000 км², положение ПЛА показано знаком ).

Основные результаты и выводы:

- на основе анализа бортовых задач визуализации определены необходимые требования к аппаратуре БПВ по производительности – 500 MFLOPS, по пропускной способности каналов передачи данных – 400 МБ/с;
- обосновано построение БПВ на базе гетерогенных многоядерных систем на кристалле, аналитически сформулированы критерии эффективного управления обработкой графической информации в БПВ на основе гетерогенных многоядерных систем на кристалле в виде минимизации времени простоев вычислительных ядер при минимизации общего времени подготовительных операций заданий обработки;
- впервые разработан алгоритм постадийной конвейеризации для эффективного управления БПВ на основе программируемых систем на кристалле, полученная производительность системы на кристалле составила 92% от теоретических возможностей ядер;
- разработан параллельный флажковый алгоритм на основе маркированных сетей Петри, обеспечивающий эффективное управление обработкой графической информации в многопроцессорных БПВ, применение которого позволило увеличить производительность двухпроцессорного БПВ на 92-95%;
- предложен способ функциональной декомпозиции программной архитектуры OpenGL в многопроцессорных БПВ с учетом предложенных алгоритмов управления и обработки графической информации в БПВ;
- разработаны алгоритмы прикладного программного обеспечения БЦВМ по эффективной визуализации двух- и трехмерной подстилающей поверхности;
- разработан алгоритм и методика комплексной оценки производительности БПВ нового поколения, достигнутая по результатам экспериментальных исследований и испытаний производительность БПВ составила 18 кадров в секунду при формировании двухмерной сцены из 3 тыс. треугольников и 16 тыс. линий и 10-12 кадров в секунду при визуализации сцены из 1200 текстурированных треугольников;
- разработан комплексный алгоритм бортовой визуализации, позволяющий отображать двухмерную карту местности площадью 3000 км² в масштабе 1 : 200 000, а также интерактивно визуализировать трехмерную подстилающую поверхность площадью до 210 км² при полете ПЛА на малых высотах на скорости 1,25 М, что дает возможность распознавать объекты с габаритными размерами 100 м на расстоянии 12,6 км;
- внедрение разработанных программно-алгоритмических средств в серии БПВ МГК,

предназначенных для современных ПЛА (Су-35, Ми-28Н), показало, что они могут быть применены в морской, сухопутной, космической технике, а также при визуализации картографической информации системы ГЛОНАСС.

Основные публикации по теме диссертации

1. Милов А.Н. Два подхода к организации масштабируемых графических архитектур стандарта OpenGL на базе ЦПОС. // Информационные технологии №1 (137) 2008. М.: Новые технологии. 2008. с. 51-56.
2. Милов А.Н. Масштабируемая бортовая графическая система на основе гетерогенных многоядерных систем на кристалле. // Вестник компьютерных и информационных технологий № 3, 2008. М.: Машиностроение. с. 47-55.
3. Милов А.Н. Теоретико-множественная формализация задачи управления графическим конвейером в гетерогенной многоядерной системе на кристалле // Естественные и технические науки № 1 (33). М.: Спутник-Плюс. 2008. с. 286-288.
4. Милов А.Н. Формализация задачи оптимального управления графическим конвейером обработки данных в гетерогенной многоядерной системе на кристалле. // Вестник компьютерных и информационных технологий № 7, 2008. М.: Машиностроение. с. 47-55.
5. Милов А.Н. Модель функционирования графической системы на основе гетерогенных многоядерных систем на кристалле // Естественные и технические науки № 1 (33). М.: Спутник-Плюс. 2008. с. 282-285.
6. Милов А.Н. Особенности построения архитектуры масштабируемой графической системы стандарта OpenGL на основе ЦПОС. // Труды 17 международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению «Графикон-2007», М.:МГУ. с. 85-87.
7. Милов А.Н. Методика оптимизации нелинейных алгоритмов многомасштабного анализа изображений для DSP // 10-я международная научно-техническая конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2008». Доклады. Выпуск X-2. М.:РНТОЭС им. Попова. 2008. с. 508-511.
8. Милов А.Н. Концептуальный подход к построению устройства визуализации трехмерных изображений в формате OpenGL на процессорах серии «Мультикор» // Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем». Истра. ИППМ РАН. 2008. с. 482-485.
9. Милов А.Н. Алгоритмические особенности построения бортовых графических приборов на основе многоядерных систем на кристалле. // «Микроэлектроника и информа-

- тика – 2008». 15-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. - М.: МИЭТ. 2007. с. 203.
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2007612961 от 9 июля 2007 г. Правообладатели: ГУП НПЦ «ЭЛВИС», ОАО «РПКБ». Авторы: Петричкович Я. Я., Сомиков В. П., Никольский В. Ф., Милов А. Н., Качоровский Д. А.
 11. Милов А.Н., Качоровский Д.А. Метод априорной оценки производительности графических библиотек стандарта OpenGL для цифровых процессоров обработки сигналов. // Информационные технологии № 9 (133) 2007. М.: Новые технологии. 2007. с. 50-56.
 12. Милов А.Н. Оптимизированные алгоритмы преобразований Хаара и их применение в задачах графической обработки данных. // Цифровая обработка сигналов № 3. М.:РНТОЭС им. Попова. 2007. с. 52-56.
 13. Милов А.Н. Концептуальный подход к построению бортовых графических систем с программным графическим конвейером на основе гетерогенных многоядерных систем на кристалле. //Естественные и технические науки №1. М.:Спутник-Плюс.2008. с. 277-281.
 14. Милов А.Н. Модель бортового многоядерного устройства визуализации изображений на основе гетерогенных многоядерных систем на кристалле. // Труды XXXIV Международной научной конференции «Гагаринские чтения».М.:МАТИ.2008.Том 4. с. 92-94.
 15. Милов А.Н. Масштабируемая бортовая графическая система стандарта OpenGL на основе ЦСП с универсальной системой команд. // 6-я международная конференция «Авиация и космонавтика 2007». Тезисы докладов. М.:МАИ, 2007. с. 43.
 16. Качоровский Д.А., Милов А.Н. Бортовой модуль графического ускорителя стандарта OpenGL на базе ЦПОС серии «Мультикор» // Микроэлектроника и информатика – 2007. 14-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. - М.:МИЭТ, 2007. с. 244.
 17. Качоровский Д.А, Милов А.Н. Бортовая графическая система стандарта OpenGL на базе цифровых сигнальных процессоров серии «Мультикор». // Труды V Международной научно-практической конференции и выставки «Информационные технологии и кибернетика – 2007», Украина, Днепрпетровск. ИТМ НАН. 2007. с. 22-24.
 18. Милов А.Н. Модель функционирования бортового многоядерного устройства визуализации трехмерных изображений на основе систем на кристалле серии «Мультикор» // Всероссийская конференция молодых ученых и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике-2008». М.:МАИ. 2008 г. с. 89.

Подписано в печать 16.03.2009.

Заказ № . Уч.-изд. л. Тираж 100 экз. Формат 60Ч84 1/16.

Отпечатано в типографии ИПК МИЭТ.

124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ.