

На правах рукописи

АХМЕТОВ Марат Искадарович

**СИНТЕЗ
БОРТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ
СИСТЕМ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ**

**Специальность
05.13.01 – Системный анализ, управление и
обработка информации**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа 2006

Работа выполнена на кафедре авиационного приборостроения
Уфимского государственного авиационного технического университета

Научный руководитель	д-р техн. наук, проф. ЕФАНОВ Владимир Николаевич
Официальные оппоненты	д-р техн. наук, проф. СОЛДАТКИН Владимир Михайлович
	д-р техн. наук, проф. ПАВЛОВ Сергей Владимирович
Ведущая организация	ФГУП Уфимское научно- производственное предприятие «Молния»

Защита состоится 28 декабря 2006 г. в ____ часов
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03
Уфимского государственного авиационного технического университета
по адресу: 450000, Уфа-центр, ул. К.Маркса, 12, УГАТУ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан 25 ноября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.

В.В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Повышение эффективности эксплуатации воздушного транспорта тесно связано с необходимостью увеличения пропускной способности воздушного пространства и, как следствие, с увеличением пассажиропотоков и регулярности выполнения авиарейсов, с сокращением эксплуатационных затрат за счет выбора кратчайших и наиболее экономичных маршрутов к пунктам назначения, а также с повышением безопасности полетов при росте интенсивности воздушного движения. Чтобы выполнить такие, во многом противоречивые требования, международное авиационное сообщество разработало концепцию CNS/ATM, согласно которой каждому летательному аппарату, находящемуся в установленном воздушном пространстве, должна быть задана индивидуальная траекторию движения, оптимальная с точки зрения эффективности выполнения его полетного задания. При этом задача обеспечения высокоточной реализации индивидуальных траекторий движения возлагается на автоматическую бортовую систему управления (АБСУ), способную управлять всеми фазами полета от запуска до посадки. Функции АБСУ предусматривают также выполнение всех сложных навигационных расчетов, включая наиболее точную оценку местоположения самолета по информации, собранной из всех навигационных датчиков, и прогноз поведения других участников воздушного движения с целью предотвращения конфликтных ситуаций.

Большая заслуга в разработке современных бортовых систем управления принадлежит видным отечественным ученым и конструкторам Ю.И. Белому, С.П. Крюкову, П.П. Парамонову, В.М. Петрову, В.М. Солдаткину, Е.А. Федосову, Б.Е. Федуну. Вопросам повышения эффективности систем авиационной автоматики посвящены работы Б.Н. Петрова, В.Ю. Рутковского, В.И. Васильева, О.С. Гуревича, Ю.М. Гусева, С.Д. Землякова, Б.Г. Ильясова, Г.Н. Лебедева, В.Г. Крымского, Г.Г. Куликова, Н.И. Юсуповой.

Однако по мере усложнения функций, возлагаемых на АБСУ, и увеличения их количества на повестку дня выходит задача разработки интегрированной системы управления полетом на базе многопроцессорных вычислительных комплексов с параллельной архитектурой. Дело в том, что АБСУ относятся к системам жесткого реального времени, работающим в широком диапазоне температурных и других неблагоприятных внешних воздействий. В связи с этим к ним предъявляются повышенные требования по быстродействию и, в то же время, накладываются ограничения на применение перспективных высокопроизводительных микропроцессоров из-за бортовых условий эксплуатации. Одним из наиболее перспективных решений данной задачи является распараллеливание алгоритмов управления и их реализация в форме параллельно протекающих вычислительных процессов. В настоящее время достигнуты значительные успехи в области создания высокопроизводительных вычислительных систем с массовым параллелизмом, которые закреплены в целом ряде международных стандартов или стали общепризнанными из-за их широкого применения в различных технических приложениях.

Тем не менее, ряд важных аспектов построения бортовых информационных и управляющих вычислительных систем с параллельной архитектурой остается не достаточно исследованным. В первую очередь это относится к взаимной увязке процедур синтеза алгоритмов управления, планирования вычислительного процесса и выбора структурной организации аппаратной части комплекса, поскольку независимое осуществление этих этапов может привести к неэффективному, в целом, решению задачи проектирования. Кроме того, существующие методы планирования и диспетчеризации вычислительных процессов либо ориентируются на поиск любого допустимого варианта распараллеливания вычислений, что не гарантирует оптимального решения, либо нацеливаются на поиск наилучшего расписания, поиск которого может занимать слишком долгое время. Указанные обстоятельства определяют актуальность диссертационной работы.

Цель работы состоит в повышении эффективности автоматических бортовых систем управления за счет совмещения процедур синтеза алгоритмов управления, планирования вычислительных процессов, выбора оптимальной структурной организации аппаратной части и формирования на этой основе бортовых информационно-управляющих систем с параллельной архитектурой.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе на основе проведенных системных исследований принципов построения бортовых информационно-управляющих систем были сформулированы следующие задачи:

1. Провести исследование условий, при выполнении которых последовательность операций синтеза алгоритмов управления, планирования вычислительных процессов и выбора оптимальной структурной организации аппаратной части приводит к формированию архитектуры бортовых информационно-управляющих систем с заданным набором свойств.

2. Разработать метод совмещенного синтеза алгоритмов управления и топологии автоматических бортовых систем управления с параллельной архитектурой.

3. Разработать процедуру формирования алгоритмического облика бортовой информационно-вычислительной системы на основе глобального и локального распараллеливания задачи спутниковой навигации.

4. Разработать методика составления расписания, обеспечивающего оптимальную загрузку вычислительных модулей при реализации параллельных процессов, протекающих в бортовых информационно-управляющих системах, на основе адаптивного генетического алгоритма.

5. Разработать программное обеспечение для бортовых информационно-управляющих систем с параллельной архитектурой, с помощью которого оценить эффективность предложенных подходов к синтезу алгоритмов управления, планированию и диспетчеризации вычислительных процессов, а также к выбору оптимальной топологии систем данного класса.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы теории управления, системного анализа, композиционного проектирования, искусственного интеллекта, линейной алгебры, теории вероятно-

стей, структурного программирования, компьютерного моделирования.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Метод совмещенного синтеза алгоритмов управления и топологии автоматических бортовых систем управления с параллельной архитектурой.

2. Аналитическая модель вычислительных процессов, позволяющая с точностью до такта макрокоманд описывать состояние последних при реализации рекурсивных алгоритмов управления с контекстными переключениями.

3. Процедура формирования алгоритмического облика бортовой информационно-вычислительной системы на основе глобального и локального распараллеливания задачи спутниковой навигации.

4. Адаптивный генетический алгоритм, обеспечивающий поиск оптимального плана загрузки многопроцессорной бортовой информационно-управляющей системы посредством достижения компромисса между скоростью сходимости и качеством найденного решения.

5. Результаты исследования эффективности предложенных методов синтеза алгоритмов управления, планирования и диспетчеризации вычислительных процессов, а также выбора оптимальной топологии бортовых информационно-управляющих систем с параллельной архитектурой, выполненные с использованием разработанного программного комплекса.

Научная новизна

1. Разработан метод совмещенного синтеза алгоритмов управления и топологии автоматических бортовых систем управления, отличающийся тем, что выбор структуры управляющей части осуществляется с учетом показателей эффективности вычислительного процесса, реализующего синтезируемые алгоритмы, в результате чего последовательная оптимизация локальных критериев обеспечивает формирование системы с заданным набором свойств.

2. Предложена аналитическая модель для описания вычислительных процессов, отличающаяся способом решения системы уравнений, описывающей состояние исследуемого вычислительного процесса, который позволяет исключить операцию обращения матриц высокой размерности и представить в аналитической форме результаты распределения множества фрагментов алгоритма управления между виртуальными вычислительными процессами.

3. Научная новизна процедуры формирования алгоритмического облика бортовой информационно-вычислительной системы состоит в механизме объединения ресурсов ВСС, ВСУП и других бортовых вычислительных систем для реализации заданной совокупности совместно протекающих вычислительных процессов, полученных в результате глобального и локального распараллеливания задачи спутниковой навигации.

4. Научная новизна генетического алгоритма состоит в способе автоматической настройки параметров генетических операторов, которые меняются в зависимости от предыстории поиска наилучшего варианта с целью достижения компромисса между шириной и глубиной поиска оптимального решения.

Практическая значимость и реализация результатов работы

1. Метод совмещенного синтеза алгоритмов управления и топологии автоматических бортовых систем управления позволяет повысить производи-

тельность комплекса бортового оборудования при одновременном обеспечении требуемого качества управления, что особенно важно для систем жесткого реального времени, к которым предъявляются требования безусловного, мгновенного, непрерывного, длительного выполнения всех запланированных функций.

2. Предложенная процедура формирования алгоритмического облика бортовой информационно-вычислительной системы позволяет сократить время на поиск оптимального созвездия, обеспечивающего максимальную точность позиционирования летательного аппарата, примерно в 3 раза при переходе к 3-процессорной системе и почти в 11 раз при переходе к 12-процессорной системе.

3. Адаптивный генетический алгоритм находит оптимальное решение в 2 – 2,5 раза быстрее по сравнению со стандартным, что обеспечивает существенное повышение эффективности бортовых информационно-управляющих систем.

4. Программный комплекс исследования и оптимизации архитектуры бортовых информационно-управляющих систем (свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2006611926 «Поиск оптимального созвездия навигационных спутников с использованием принципа глобального распараллеливания» и № 2006611927 «Оптимальное распределение загрузки между узлами многопроцессорной вычислительной системы с использованием адаптивного генетического алгоритма») обеспечивает совместимость с широким классом программно-аппаратных средств, что делает его доступным для применения на многих предприятиях авиаприборостроительного профиля.

Практическая значимость полученных результатов подтверждается актом внедрения в производственную деятельность корпорации «Аэрокосмическое оборудование».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Международная молодежная научная конференция «XXX Гагаринские чтения» (Москва, 2004), Всероссийская научно-практическая конференция «Авиакосмические технологии и оборудование. Казань-2004» (Казань, 2004), 3-я международная выставка и конференция «Авиация и космонавтика-2004» (Москва, 2004), Международная молодежная научная конференция «XII Туполевские чтения» (Казань, 2004), VII Всероссийская научная конференция молодых ученых и аспирантов «Новые информационные технологии. Разработка и аспекты применения» (Таганрог, 2004), Международная конференция «CSIT'2005» (Уфа, 2005), IV Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии» (Томск, 2006), 13-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика-2006» (Москва, 2006).

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 16 работах, включая 2 статьи в научных изданиях из списка ВАК, 12 публикаций в центральных журналах, трудах и материалах конферен-

ций, 2 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ по теме диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из перечня сокращений, введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Основное содержание работы изложено на 158 страницах машинописного текста, включая 32 рисунка и 19 таблиц. Список литературы включает 142 наименования и занимает 13 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, новизна и практическая значимость выносимых на защиту результатов.

В первой главе проводятся системные исследования алгоритмического и функционального облика современных бортовых информационно-управляющих систем (БИУС), в составе которых можно выделить инвариантное ядро – автоматическую бортовую систему управления (АБСУ) и вспомогательную бортовую информационно-вычислительную систему (БИВС). АБСУ и БИВС относятся к системам жесткого реального времени, что предъявляет чрезвычайно высокие требования к их производительности. Указанное обстоятельство заставляет искать новые подходы к разработке БИУС в классе многопроцессорных структур с параллельной архитектурой. Приводятся результаты исследований основных компонентов вычислительных систем с параллельной архитектурой: алгоритмического, программного и аппаратного обеспечения. Рассматриваются различные подходы к решению задачи планирования вычислительных процессов в параллельных вычислительных системах, в т.ч. с применением средств искусственного интеллекта. На основе проведенного анализа ставится задача исследования.

Во второй главе рассматривается задача совмещенного синтеза алгоритмов управления и топологии АБСУ с параллельной архитектурой. Показано, что независимое осуществление этих этапов может привести к неэффективному, в целом, решению задачи проектирования АБСУ. Для того чтобы в результате двухэтапной процедуры был сформирован оптимальный вариант облика $X_i^* \in X$, где X - полное множество возможных вариантов построения АБСУ, необходимо выполнение следующего условия

$$X^* \left[\cdot, k_1 \right] \supseteq X^* \left[\cdot, k_2 \right] \sim X_i^*, \quad (1)$$

здесь $X^* \left[\cdot, k_1 \right], X^* \left[\cdot, k_2 \right]$ - оптимальные элементы фактор-множеств, полученных при разбиении множества X на классы эквивалентности с точки зрения, соответственно, критерия $\varepsilon^{(1)}$, определяющего качество синтезированных алгоритмов управления, и $\varepsilon^{(2)}$, оценивающего вычислительную эффективность работы многопроцессорной системы.

Чтобы обеспечить соблюдение условия (1), требуется доказать существование монотонных преобразований, переводящих области значений функций $\varepsilon^{(1)}$ в области значений $\varepsilon^{(2)}$. С этой целью в диссертации разработана аналитическая модель пространственно-временной декомпозиции управляющих алгорит-

мов, позволяющая с точностью до такта макрокоманд описывать в среде виртуальных процессоров состояние вычислительного процесса. Данная модель включает следующие элементы:

- исходное описание рекурсивного алгоритма управления с контекстными переключениями:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= A_i x_i(k) + B_i u_i(k); \\ y_i(k) &= C_i x_i(k); \quad i = 1, 2, \dots, N; \\ u(k) &= LE(k) y(k) + L_0 E_0 g(k); \\ q &= \rho_K, \mu, q_c, \end{aligned} \quad (2)$$

где векторы $x_i(k)$ описывают текущее состояние i -го фрагмента вычислительного процесса на k -м временном такте, векторы $u_i(k)$ определяют состояние внешних воздействий, влияющих на ход вычислительного процесса, векторы $y_i(k)$ содержат массивы выходных данных; $u(k)$, $y(k)$ – прямые суммы векторов $u_i(k)$ и $y_i(k)$, $g(k)$ – вектор задающих воздействий; $E(k), E_0(k)$ – матрицы, элементы которых определяют участие в реализации q -го контекста соответствующих фрагментов алгоритма управления; q – функция переключения контекста по текущей информации о состоянии вычислительного процесса x , внешней среды μ , а также по командам на переключение q_c , поступающим из внешних систем;

- граф операций, задающий отображение:

$$\Omega: f \rightarrow z, \quad (3)$$

где f – множество фрагментов алгоритма управления (2), z – совокупность результатов вычислительных операций, реализующих данный алгоритм;

- систему алгебраических уравнений, описывающих граф операций:

$$z = \Pi_1 z + \Pi_2 v, \quad (4)$$

здесь $v = [f(k); u(k)]^T$ – вектор исходных данных; Π_1, Π_2 – матрицы, определяющие последовательность выполнения операций в соответствии с алгоритмом управления в зависимости от результатов выполнения предыдущих операций и исходных данных, соответственно.

Аналитическое решение системы уравнений (4) требует обращения матриц высокой размерности. Для устранения данного препятствия в работе получено следующее соотношение:

$$z = \prod_{i=f}^1 \left[E_i + 1 \right]_r - \sum_{j=p_i+1}^{p_i+d_i} H_j \Pi_2 v, \text{ где } p_i = \sum_{k=1}^{i-1} d_k. \quad (5)$$

Здесь $H_j = I_r - e_j \Pi_j^{(1)}$, где $\Pi_j^{(1)}$ – j -я строка матрицы Π_1 , e_j – j -й координатный вектор, $r = \dim z$ – размерность вектора z .

Предложенная модель позволяет в простой форме описывать результаты распределения загрузки между процессорами в АБСУ. Формально процедура распределения загрузки может рассматриваться как отображение множества номеров операций в совокупность подмножеств номеров операций, реализуемых каждым из процессоров:

$$O = \{1, \dots, r\} \Rightarrow O_i^j = \{l_{i,1}^j, l_{i,2}^j, \dots\} \quad (6)$$

Для аналитического описания этой процедуры вводится матрица $\Theta = \text{diag}\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_r\}$, элементы которой $\varepsilon_i = \delta_{k,l}$ показывают, что операция с номером i , соответствующая l -му отсчету времени, выполняется на процессоре с номером k . Вводятся также матрицы $G_1^* = \Theta P_1$, $G_2^* = \Theta P_2$, строки которых оказываются помеченными в соответствии с номерами процессоров, выполняющих данные операции.

Поскольку структура матрицы G_1^* аналогична структуре матрицы P_1 , то формула, определяющая аналитическое решение (5), сохраняется при замене матриц P_1 и P_2 на G_1^* и G_2^* . В результате алгоритм управления может быть описан системой уравнений состояния, отражающей характер распределения вычислительных операций между отдельными процессорами:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A \begin{pmatrix} G_1^* \\ G_2^* \end{pmatrix} x(k) + B \begin{pmatrix} G_1^* \\ G_2^* \end{pmatrix} u(k); \\ y(k+1) &= C \begin{pmatrix} G_1^* \\ G_2^* \end{pmatrix} x(k+1). \end{aligned} \quad (7)$$

Подобное представление алгоритма управления с учетом распределения вычислительных операций между процессорами позволяет сформировать процедуру совмещенного синтеза алгоритма управления с планированием и организацией параллельных вычислительных процессов. Результатом такой процедуры становится не только обеспечение желаемого качества управления, но и оптимизация основных показателей эффективности вычислительного процесса, например, длительности $T_{\text{и}}$ исполнения алгоритма, выраженной в тактах макрокоманд, и средней загрузки процессоров ω .

С помощью полученной аналитической модели вычислительного процесса в диссертационной работе решена задача совмещенного синтеза АБСУ на основе приближения ее временных характеристик к допустимой области.

Каждая из областей, определяющих желаемый вид вектора выходных координат системы $y_c(k)$, описывается при некотором фиксированном векторе управлений $g(k)$ своими верхней $y_i^I(k)$ и нижней $y_i^{II}(k)$ границами. Тогда исследуемые выходные координаты системы будут принадлежать допустимым областям при выполнении системы неравенств

$$y_i^I(k) - y_i^c(k) \geq 0; \quad y_i^c(k) - y_i^{II}(k) \geq 0. \quad (i=1,2,\dots,M_c) \quad (8)$$

Метод синтеза базируется на разложении временных характеристик системы в ряд по системе дискретных ортогональных полиномов Хана:

$$\begin{aligned} y_c(k) &= H \cdot \Phi(k) = H \cdot \Lambda \cdot \Psi(k) = R^C \cdot \Psi(k); \\ y^I(k) &= R^I \cdot \Psi(k); \quad y^{II}(k) = R^{II} \cdot \Psi(k), \end{aligned} \quad (9)$$

где матрица H коэффициентов ортогонального ряда ищется по системе разностных уравнений, описывающих объект управления и управляющую часть, заданную в виде (7).

В результате система ограничений для временных функций преобразуется в систему алгебраических неравенств относительно искомых параметров управляющей части $\mathcal{C} = \{0, 1, \dots, q-2\}$; $i = 1, 2, \dots, M_c$:

$$\sum_{j=1}^{q-k} \frac{(q-j)!}{(q-k-j)!} (R_{ij}^I - R_{ij}^C) \geq 0; \quad (R_{i1}^I - R_{i1}^C) \geq 0;$$

$$\sum_{j=1}^{q-k} \frac{(q-j)!}{(q-k-j)!} (R_{ij}^C - R_{ij}^{II}) \geq 0; \quad (R_{i1}^C - R_{i1}^{II}) \geq 0. \quad (10)$$

Полученная система неравенств определяет множество допустимых структурно-параметрических вариантов управляющей части системы и, следовательно, вычислительного алгоритма управления. Критерием отбора структур служат показатели эффективности вычислительного процесса, реализующего соответствующий алгоритм управления. С этой целью используются введенные матрицы P_1^* и P_2^* , которые посредством распределения вычислительных операций ставят в соответствие каждому структурному варианту значения показателей эффективности. Поиск оптимальных значений этих матриц связан с решением задачи дискретной оптимизации большой размерности, что потребовало разработки специального генетического алгоритма.

Третья глава посвящена разработке методики выбора оптимальной архитектуры бортовых информационно-вычислительных систем с использованием адаптивного генетического алгоритма. Анализ тенденций развития систем данного класса, обусловленных переходом к концепции CNS/ATM, свидетельствует о том, что спутниковая навигация становится основным средством высокоточного позиционирования летательных аппаратами при управлении ими на всех фазах полета. При этом наиболее трудоемкой в вычислительном отношении является задача поиска оптимального созвездия навигационных спутников (НИСЗ), обеспечивающего максимальную точность определения текущих координат летательного аппарата.

Для существенного сокращения времени поиска оптимального созвездия предлагается способ глобального распараллеливания вычислений, который подразумевает разбиение задачи поиска на ряд слабо связанных подзадач и программное распределение этих подзадач между процессорами бортовых вычислительных систем. Блок-схема соответствующего параллельного алгоритма приведена на рис. 1.

После полного перебора всех созвездий из 4-х спутников, образованных из исходного множества радиовидимых НИСЗ, каждый из процессов передает результаты своих вычислений нулевому процессу. Этот процесс формирует массив результатов и находит в нем минимальный элемент, по которому определяет номер оптимального созвездия.

Полученная в результате совокупность параллельно протекающих вычислительных процессов должна быть распределена оптимальным образом между вычислительными модулями многопроцессорной БИВС. При этом используется описанная ранее модель распределения вычислительных операций между процессорами, которая определяет показатели эффективности вычислительного процесса. Использование этих показателей позволяет формализовать задачу выбора оптимального варианта распределения загрузки между процессорами БИВС. Суть данной задачи дискретной оптимизации заключается в поиске ва-

рианта распределения загрузки, удовлетворяющего условиям $T_H \rightarrow \min$ и $\omega \rightarrow \max$. Эта задача относится к классу NP-сложных проблем и, как отмечалось ранее, может быть решена с использованием генетических алгоритмов (ГА).

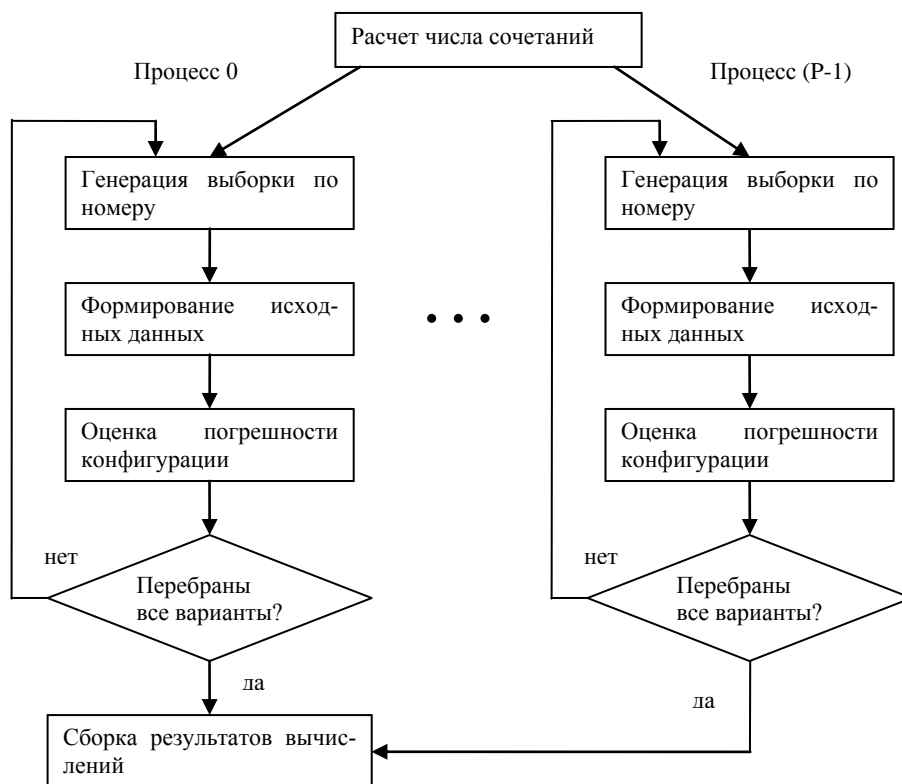


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма поиска оптимального созвездия

Стандартный ГА имеет существенный недостаток: чем выше скорость сходимости алгоритма, тем больше вероятность получения локально-эффективного решения. Для устранения указанного противоречия предлагается адаптивный генетический алгоритм, параметры которого настраиваются в процессе поиска оптимального плана загрузки многопроцессорной БИВС таким образом, чтобы обеспечить компромисс между скоростью сходимости и качеством найденного оптимального решения. Главное отличие этого алгоритма от стандартного заключается в адаптивном принципе отбора особей в соответствии с их функцией пригодности.

Специфика вычисления функции пригодности применительно к рассматриваемой задаче заключается в том, что критерий оптимальности является векторным. Для расчета функции пригодности используется метод обобщенных рангов, при котором в качестве значения функции берется сумма рангов, присвоенных данной особи по каждому из показателей. Суть предлагаемого механизма адаптации сводится к тому, что вероятность отбора особей гибко меняется в зависимости от предыстории поиска. С этой целью используется нормальный закон распределения вероятности отбора. Математическое ожидание принимается равным значению функции пригодности наилучшей для данного поколения хромосомы популяции. Если в очередном поколении произошла смена наилучшей хромосомы, то дисперсия принимает максимальное значение, рас-

ширяя тем самым диапазон поиска. Если же на протяжении нескольких поколений более предпочтительная хромосома не находится, то дисперсия уменьшается пропорционально числу поколений:

$$D = D_{\max} - \beta \cdot g, \quad (11)$$

где D_{\max} – максимальное значение дисперсии; β – коэффициент, определяющий скорость сходимости алгоритма; g – число «неудачных» поколений.

Описанный механизм формирует предпосылки для элитного отбора, сохраняющего наилучшую из найденных хромосом популяции.

Рассмотренный принцип отбора используется в трех случаях:

- перед этапом кроссинговера для выбора скрещиваемых особей;
- перед этапом мутации для выбора мутируемых особей;
- после применения всех операторов ГА для отбора наиболее пригодных особей в следующее поколение.

Предложенный механизм адаптации обеспечивает еще одно важное преимущество – задает логически обоснованный критерий останова поиска. Обычно в качестве такого критерия используется либо произвольно заданное число поколений, либо желаемое значение функции пригодности, при достижении которых поиск прекращается. В нашем случае поиск прекращается, если дисперсия уменьшается до такой величины, когда вероятность изменения лучшего из найденных вариантов загрузки становится пренебрежимо малой. Было выбрано пороговое значение, равное 10% от максимального значения дисперсии.

В предлагаемом ГА реализуется односточный кроссинговер, причем точка разрыва выбирается только на границах тех участков хромосом, которые кодируют операции, допускающие параллельное исполнение.

После осуществления кроссинговера к хромосомам применяется оператор мутации. Использование классической схемы мутации в нашем случае неприемлемо, поскольку может приводить к недопустимым вариантам загрузки процессоров. В связи с этим предлагается осуществлять мутацию не одного бита, а всего гена, состоящего из s бит и кодирующего номер некоторой операции p_i . Его код заменяется другой допустимой комбинацией с последующей проверкой следующего условия. Если машинный такт, на котором выполняется операция p_i , не содержит других операций, то мутация заканчивается. В противном случае значение гена, кодирующего некоторую другую операцию из этого же такта, заменяется исходным значением гена, соответствующего p_i .

Блок-схема разработанного ГА приведена на рис. 2.

Предложенный метод диспетчеризации вычислительных процессов позволяет сравнивать между собой многопроцессорные структуры с различной топологией и, следовательно, выбирать наиболее эффективные в вычислительном отношении.

Как показывают исследования, один из наиболее перспективных вариантов построения коммуникационной среды БИВС основан на сетевой технологии Fibre Channel (FC). Данный стандарт широко используется в различных технических приложениях и поддерживается всеми основными производителя-

ми. Кроме того, FC выбран для обеспечения высокоскоростного соединения между бортовыми подсистемами перспективного англо-американского истребителя Joint Strike Fighter. В работе описываются специфика протоколов FC, возможные топологические варианты и их аппаратная реализация.

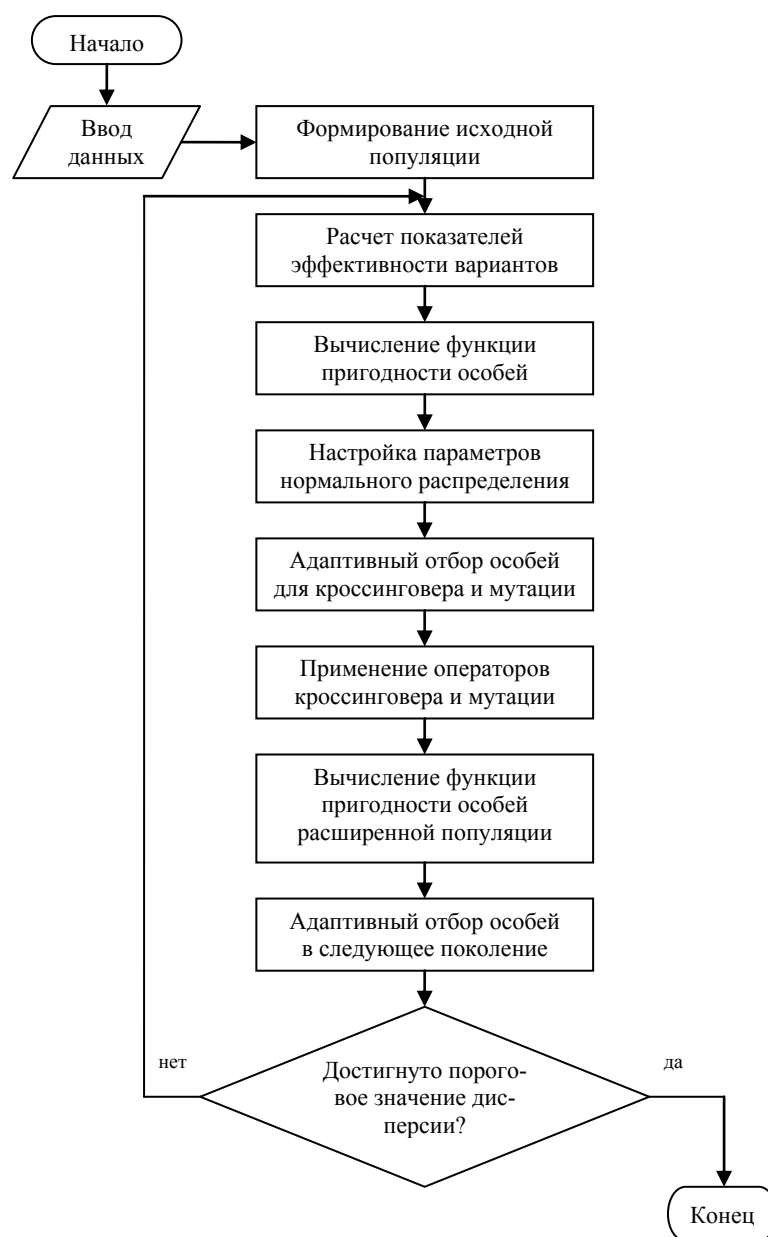


Рисунок 2. Блок-схема адаптивного ГА

На рис. 3 приведена блок-схема алгоритма выбора топологии БИВС, оптимальной для синтезированного алгоритма управления.

В четвертой главе представлены результаты разработки программного комплекса исследования и оптимизации архитектуры бортовых информационно-управляющих систем, включающего модули, реализующие процедуры глобального распараллеливания задачи поиска оптимального созвездия НИСЗ, планирования и диспетчеризации вычислительных процессов на базе адаптивного генетического алгоритма, а также модуль, формирующий коммуникационную среду для многопроцессорной БИВС.

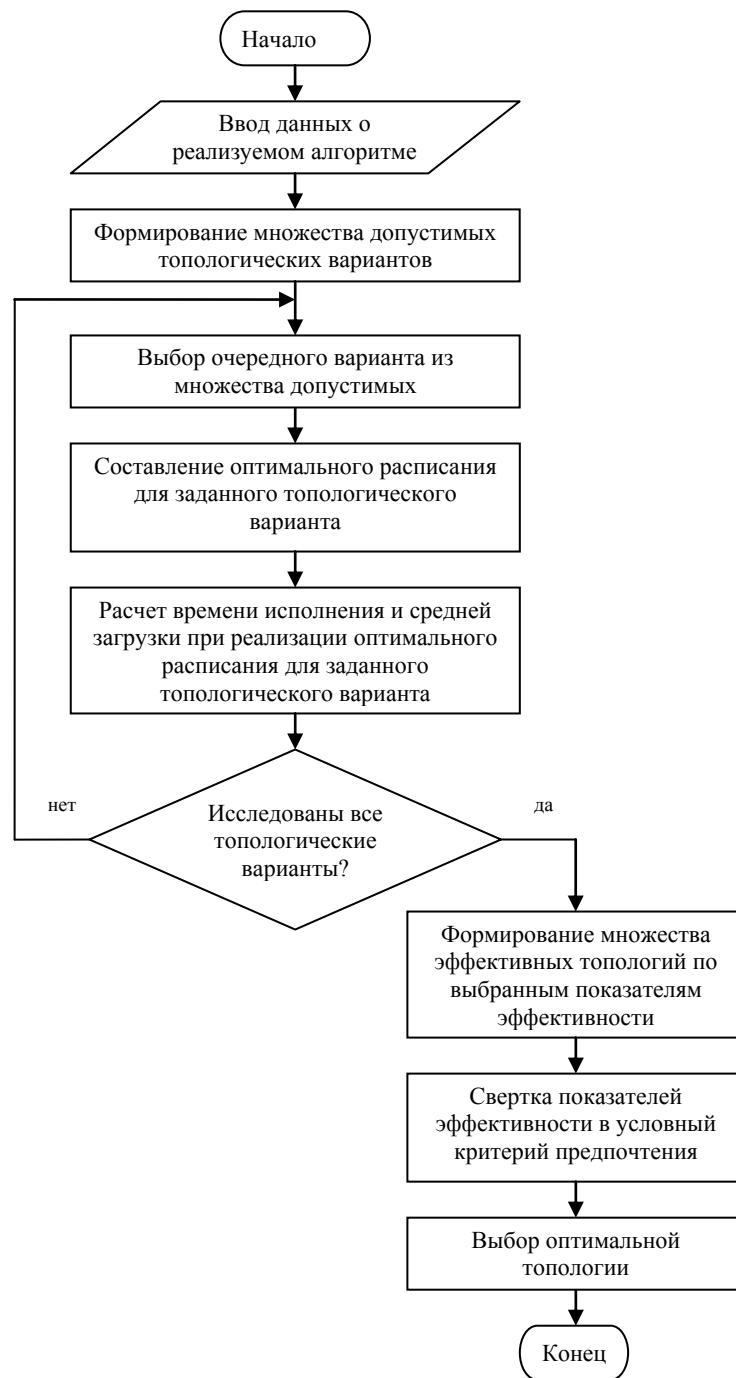


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма выбора оптимальной топологии

Алгоритм глобального распараллеливания навигационной задачи реализован в виде программы, представленной на языке высокого уровня C++ с использованием библиотеки MPI. В работе приводится структура модулей разработанного параллельного программного обеспечения. Для оценки эффективности разработанного алгоритмического и программного обеспечения была проведена его апробация на высокопроизводительном вычислительном комплексе Уфимского государственного авиационного технического университета с кластерной архитектурой. Как показали результаты компьютерных экспериментов, предложенный принцип параллельной обработки информации позволяет существенно увеличить производительность вычислительных средств, в том числе и бортовых. Из графика, представленного на рис. 4, следует, что с ростом числа

процессоров наблюдается устойчивое уменьшение длительности выполнения программы. Таким образом, разработанная параллельная программа обладает хорошей степенью масштабируемости и может эффективно выполняться на различных конфигурациях бортовой информационной системы.

Процедура поиска оптимального созвездия подразумевает многократное решение навигационной задачи, т.е. определение пространственно-временных координат летательного аппарата. Для повышения вычислительной эффективности решения этой задачи предлагается специальный алгоритм локального распараллеливания. Его суть состоит в разбиении исходной вычислительной процедуры на два процесса, один из которых выполняется вычислительной системой самолетовождения (ВСС), а другой – вычислительной системой управления полетом (ВСУП). Тестовые примеры, просчитанные с использованием ОС LINUX, показали, что использование предложенного алгоритма локального распараллеливания позволяет уменьшить время расчетов на 30-45%.



Рисунок 4. График зависимости времени выполнения от числа процессоров

Адаптивный генетический алгоритм также реализован в виде программы на языке C++, которая выполняется под управлением ОС Linux. Была проведена оценка параметров адаптивного ГА, а также оценка его эффективности по сравнению со стандартным ГА. При этом были получены статистически устойчивые характеристики, которые свидетельствуют о том, что в среднем адаптивный ГА находит оптимальное решение в 2–2,5 раза быстрее стандартного.

Следующий модуль программного комплекса решает задачу выбора топологии многопроцессорной бортовой информационно-управляющей системы, оптимальной с точки зрения принятых показателей эффективности. Для оценки предлагаемого подхода было проведено сравнение результатов реализации ал-

горитма (7) на 5-процессорных системах с различной топологией коммуникационной среды и протоколом обмена FC. Проведенные исследования показали, что наилучшей по выбранному векторному критерию эффективности является система с радиальной топологией (рис. 5).

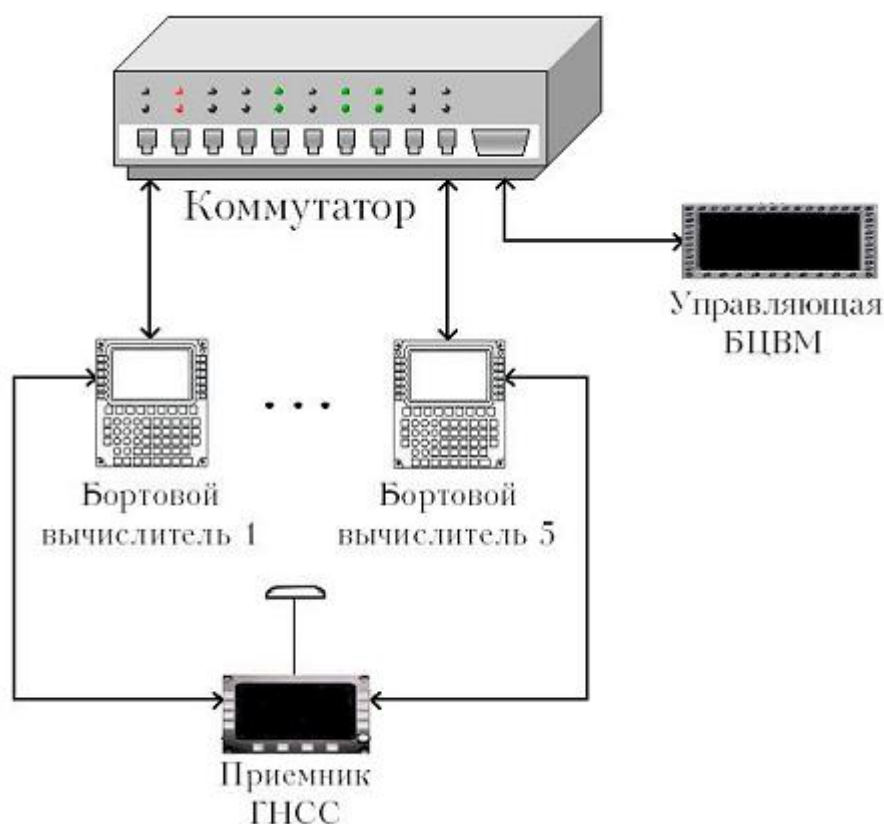


Рисунок 5. Схема реализации БИВС в классе систем с радиальной топологией

При этом коммуникационная среда 5-процессорной БИВС включает сетевые адаптеры FC (модель 3Com Gigabit Fiber 3C996-SX) и 16-портовый коммутатор Compaq StorageWorks 2/16-EL.

На разработанное программное обеспечение получены государственные свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан и исследован метод совмещенного структурно-параметрического синтеза автоматической бортовой системы управления с параллельной архитектурой, предусматривающий, что выбор структуры управляющей части осуществляется с учетом показателей эффективности вычислительного процесса, реализующего синтезируемые алгоритмы, в результате чего последовательная оптимизация локальных критериев обеспечивает формирование системы с заданным набором свойств.

2. Предложена аналитическая модель вычислительных процессов, позволяющая с точностью до такта макрокоманд описывать состояние последних при реализации рекурсивных алгоритмов управления с контекстными переключениями, что дает возможность исключить операцию обращения матриц высо-

кой размерности и представить в аналитической форме результаты распределения множества фрагментов алгоритма управления между виртуальными вычислительными процессами.

3. Разработана процедура формирования алгоритмического облика бортовой информационно-вычислительной системы на основе глобального и локального распараллеливания задачи спутниковой навигации, которая предусматривает разбиение задачи поиска оптимального созвездия на ряд слабо связанных подзадач и программное распределение этих подзадач между процессорами бортовых вычислительных систем.

4. Предложен адаптивный генетический алгоритм поиска оптимального плана загрузки многопроцессорной бортовой информационно-управляющей системы, обеспечивающий нахождение решения в 2–2,5 раза быстрее по сравнению со стандартным генетическим алгоритмом.

5. Разработан программный комплекс исследования и оптимизации архитектуры бортовых информационно-управляющих систем, результаты апробации которого на высокопроизводительном кластере УГАТУ свидетельствуют о том, что предложенный алгоритм глобального распараллеливания позволяет уменьшить время расчетов почти в 3 раза при переходе к 3-процессорной системе и примерно в 11 раз при переходе к 12-процессорной системе, а алгоритм локального распараллеливания приводит к сокращению времени расчетов на 30-45%.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях из списка ВАК:

1. Совмещенный синтез алгоритмического облика и архитектуры бортовых информационно-управляющих систем / **М.И. Ахметов, В.Н. Ефанов** // Вестник УГАТУ : научный журнал УГАТУ. 2006. Т. 8, № 1. С. 16–22.

2. Принципы разработки высокопроизводительных бортовых вычислительных систем реального времени / **М.И. Ахметов, В.Н. Ефанов** // Вестник УГАТУ : научный журнал УГАТУ. 2006. Т. 7, № 1. С. 93–102.

Другие публикации:

3. Системная интеграция БРЭО на базе параллельных архитектур / **М.И. Ахметов** // XXX Гагаринские чтения : матер. междунар. молодеж. науч. конф. М. : МАТИ, 2004. Т. 6. С. 62–63.

4. Архитектура бортового вычислительного комплекса с глобальным и локальным распараллеливанием / **М.И. Ахметов** // Авиакосмические технологии и оборудование : матер. Всерос. науч.-практ. конф. Казань : Изд-во КГТУ, 2004. С. 581–586.

5. Модель параллельных вычислений в информационно-управляющих системах жесткого реального времени / **М.И. Ахметов, В.Н. Ефанов** // 6-я междунар. конф. по компьютерным наукам и информационным технологиям CSIT'2004 : сб. науч. тр. Т. 1. Уфа, 2004. С. 235–238. (На англ. яз.).

6. Принципы реализации бортовых информационно-управляющих систем на базе вычислительных средств с параллельной архитектурой / **М.И. Ах-**

метов // XII Туполевские чтения : матер. междунар. молодеж. науч. конф. Т. 2. Казань : Изд-во КГТУ, 2004. С. 109–110.

7. Принципы многопроцессорной обработки навигационной информации в бортовых вычислительных комплексах / **М.И. Ахметов** // Авиация и космонавтика-2004 : матер. 3-й междунар. конф. М. : Изд-во МАИ, 2004. С. 27–28.

8. Оптимизация архитектуры ИУС с использованием генетического алгоритма / **М.И. Ахметов** // Новые информационные технологии. Разработка и аспекты применения : тр. 6-й Всерос. науч. конф. Таганрог, 2004. С. 82–87.

9. Исследование архитектуры сложных ИУС с использованием аналитической модели вычислительного процесса / **М.И. Ахметов, В.Н. Ефанов** // Информационные технологии моделирования и управления. Воронеж : Научная книга, 2004. Вып. 17. С. 19–29.

10. Интеграция бортовых информационно-вычислительных систем на базе стандарта FDDI / **М.И. Ахметов** // Мир авионики. 2004. № 6. С. 41–46.

11. Параллельные алгоритмы обработки информации в спутниковых навигационных системах / **М.И. Ахметов, В.Н. Ефанов** // Вопросы управления и проектирования в информационных и кибернетических системах. Уфа : УГАТУ, 2005. С. 133–141.

12. Структурный синтез коммуникационной среды параллельной вычислительной системы / **М.И. Ахметов, В.Н. Ефанов** // 7-я междунар. конф. по компьютерным наукам и информационным технологиям CSIT'2005 : сб. науч. тр. Т. 2. Уфа, 2005. С. 235–238. (На англ. яз.).

13. Синтез архитектуры многопроцессорных вычислительных систем с использованием адаптивного генетического алгоритма / **М.И. Ахметов** // Микроэлектроника и информатика – 2006 : матер. 13-й Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. М. : МИЭТ, 2006. С. 140.

14. Параллельный алгоритм решения навигационной задачи с использованием компьютерной модели СНС / **М.И. Ахметов, В.Н. Ефанов** // Молодежь и современные информационные технологии : сб. тр. IV Всерос. науч.-практ. конф. Томск : Изд-во ТПУ, 2006. С. 81–83.

15. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ № 2006611926. Поиск оптимального созвездия навигационных спутников с использованием принципа глобального распараллеливания / **М.И. Ахметов, В.Н. Ефанов**. М. : Роспатент, 2006. Зарег. 05.06.2006.

16. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ № 2006611927. Оптимальное распределение загрузки между узлами многопроцессорной вычислительной системы с использованием адаптивного генетического алгоритма / **М.И. Ахметов, В.Н. Ефанов**. М. : Роспатент, 2006. Зарег. 05.06.2006.

АХМЕТОВ Марат Искандарович

СИНТЕЗ
БОРТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ
С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 24.11.2006. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Суг.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.-отг. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 701. Бесплатно.

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет
Центр оперативной полиграфии
450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12