

16. *Suchetha M., Kumaravel N.* Empirical Mode Decomposition Based Filtering Techniques for Power Line Interference Reduction in Electrocardiogram Using Various Adaptive Structures and Subtraction Methods // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2013. Vol. 8, № 6. P. 575–585.
17. *Tompkins W.J.* *Biomedical Digital Signal Processing*. New Jersey: Upper Saddle River, 2000.
18. *Zaitsev E.V.* Elimination on Power Line Interference from ECG Signal Using Combined Bidirectional Narrow-band Notch Filter // *Biophysics*. 2015. Vol. 60, № 4. P. 656–658.

DOI: 10.25586/RNU.V9187.20.02.P.028

УДК 004.23

И.В. Захаров, П.В. Корчагин

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ КОНФИГУРИРОВАНИЕ
БОРТОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЕЕ ДЕГРАДАЦИИ

Решение вопросов оперативного автономного управления бортовыми вычислительными системами космических аппаратов требует рационального выбора их конфигураций в целях достижения максимального полезного эффекта целевой системы. Разработанный подход отличается функционально-параметрической реконfigurацией бортовых вычислительных систем космических аппаратов посредством оперативного управления составом выполняемых задач и параметрами функционирования элементов структуры на основе прогнозирования их состояния с учетом анализа ресурса и условий функционирования. Он может быть использован при разработке алгоритмов оперативной автономной реконfigurации бортовых вычислительных систем перспективных специализированных космических аппаратов, функционирующих в условиях влияния неблагоприятных факторов различного происхождения.

Ключевые слова: бортовая вычислительная система, реконfigurируемая система, конфигурация, деградация, прогнозирование.

I.V. Zakharov, P.V. Korchagin

FUNCTIONAL-PARAMETRIC CONFIGURATION
OF THE ONBOARD COMPUTER SYSTEM OF THE SPACECRAFT
BASED ON THE PREDICTION OF ITS DEGRADATION

The decision of questions of operational autonomous control onboard computer systems of spacecrafts by means of a flexible control modes of components and dispatching computational process requires a rational choice of their configuration in order to achieve the maximum beneficial effect from the target system. Developed approach is functional-parametric reconfiguration onboard computer systems of spacecrafts through the operational management structure of the tasks and operational parameters of the elements of the structure-based prediction of its state, including analysis of the system resource and the conditions of its functioning. It can be used in the development of algorithms for operational autonomous reconfiguration of the onboard computer systems of promising specialized spacecrafts operating under the influence of adverse factors of different origin.

Keywords: on-board computer system, reconfigurable system, configuration, degradation, forecasting.

Введение

Вопросы, связанные с повышением автономности космических аппаратов (КА), все теснее связаны с интеллектуализацией их бортовых комплексов управления (БКУ) в интересах достижения целей применения космической системы. Интеллектуальным ядром БКУ современных КА выступают многофункциональные бортовые вычислительные системы (БВС). Важным аспектом реализации данного направления является обеспечение возможности оперативной самореконфигурации БВС посредством гибкого управления режимами работы компонентов и диспетчеризации вычислительного процесса на основе прогнозирования ее состояния с учетом анализа ресурса и условий функционирования [9; 15]. Важным результатом комплексного использования многофункциональных БВС в системах управления КА является возможность организации на аппаратно-программном уровне взаимосогласованной работы всех подсистем КА. При этом решаются задачи сбора информации о состоянии элементов системы и внешней среды; накопление, обработка и анализ информации для выработки управляющих решений; принятие решения по управлению и проведение реконфигурации системы.

Под конфигурацией БВС будем понимать параметры функционирования ее элементов (параметрическое конфигурирование) и функциональный режим – выполняемый комплекс вычислительных задач, соответствующий режиму функционирования КА и параметрам соответствующих целевых задач (функциональное конфигурирование) на заданном интервале времени. Под реконфигурацией БВС понимается целенаправленное изменение ее конфигурации [4; 13].

Выбор конфигурации БВС, как правило, неоднозначен (рис. 1). Так, конфигурации БВС с высокой производительностью обеспечивают высокое качество решения задач и целевой эффект на данном интервале времени, но вследствие более интенсивного расходования ресурсов снижают ожидаемый целевой эффект при дальнейшем функционировании; при этом зависимости целевого эффекта и расхода ресурсов БВС от ее производительности меняются во времени.



Рис. 1. Вопросы выбора конфигурации БВС КА

Таким образом, возникает вопрос выбора конфигурации по какому-либо критерию с учетом текущих и прогнозируемых условий. Это вызывает необходимость поиска конфигурации на заданном интервале, обеспечивающей максимизацию показателя целевого эффекта за время функционирования в предположении аналогичного способа выбора конфигураций на последующих интервалах [7].

*Постановка задачи функционально-параметрического конфигурирования
бортовой вычислительной системы*

При достаточно общей постановке задачи, опирающейся на модель функционирования БВС КА [5], будем считать, что заданы следующие исходные данные.

1. Вектор $\bar{\mathfrak{Q}}(t_0) = \langle \mathfrak{Q}_k \mid k = 1, \dots, \text{card } \bar{\mathfrak{Q}} \rangle$ параметров состояния КА в данный момент времени t_0 , включающий показания датчиков внешних воздействий, результаты диагностики БВС и бортовой аппаратуры КА, сигналы от наземного комплекса управления и т.д.

2. Множество классов событий

$$\mathbb{D} = \{D_i \mid i = 1 \dots \text{card } \mathbb{D}\}, D_i = \{V_j \mid j = 1 \dots n_i\}, V_j \in \mathbb{V},$$

где V_j – сценарий неблагоприятных воздействий.

3. Классифицирующая функция $\mathcal{F}: \bar{\mathfrak{Q}} \rightarrow D_i, D_i \in \mathbb{D}$.

4. Параметры $\bar{h}(t_0)$ факторов космического пространства, регистрируемые датчиками внешних воздействий.

5. Структура БВС в виде множества элементов $\langle \zeta_j \mid j = 1 \dots N \rangle$ и связей между ними

в виде матрицы смежности $\|s_{ij}\|_{N \times N}, s_{ij} = \begin{cases} 0, & \zeta_i \text{ не связан с } \zeta_j, \\ 1, & \zeta_i \text{ связан с } \zeta_j. \end{cases}$

6. Ресурс элементов БВС [5]: законы распределения $\|F_j^{(k)}\|$ случайного запаса ресурса элементов

$$U = \{\hat{u}_j \mid j = 1, \dots, N\},$$

где $\hat{u}_j = \langle \hat{u}_j^{(1)}, \dots, \hat{u}_j^{(r)} \rangle$ – запас ресурсов j -го элемента; функции расхода ресурса $\frac{d\bar{r}_i}{dt} = \bar{\delta}_i[\bar{r}_i(t), g_j(t), H]$, где \bar{r}_i – выработанный ресурс; $G = \langle g_j \mid j = 0, \dots, N \rangle$ – аппаратная конфигурация; g_j – режим работы элемента ζ_j .

7. Параметры функционирования элементов БВС на интервале времени $t \in [0; t_0]$: $\bar{h}(t), G(t)$ и текущее состояние $\Theta(t_0) = \langle \theta_i \mid i = 1, \dots, N \rangle, \theta_i = \begin{cases} 0, & \zeta_i \text{ неработоспособен;} \\ 1, & \zeta_i \text{ исправен.} \end{cases}$

8. Параметры функциональных режимов $\xi \in \Xi: C_\xi$ – показатель целевого эффекта [3], производимого БВС в режиме ξ ; $P(\xi, G)$ – вероятность решения задач режима ξ в конфигурации G ; $\nu(G)$ – показатель производительности БВС в конфигурации G .

Требуется найти конфигурацию, обеспечивающую максимальное значение ожидаемого эффективного объема вычислений J на заданном интервале времени $(t_0; t_s)$:

$$G^* = \arg \max_{G_i \in \mathbb{G}} J(R, D, G_i),$$

где $J(R, D, G_i) = \int_{t_0}^{t_s} \Delta J(\tau \mid R, D, G_i) d\tau$;

$\Delta J(\tau \mid R, D, G_i) = \max_{\xi} \{C_\xi P(\xi, \tau \mid R, D, G_i)\}$; \mathbb{G} – множество возможных конфигураций.

Таким образом, в общем виде задача сводится к отысканию оптимальной в некотором смысле конфигурации исходя из состояния БВС, ресурса элементов, параметров воздей-

Захаров И.В., Корчагин П.В. Функционально-параметрическое конфигурирование...

ствующих факторов и значимости решаемых задач. Поэтому задача рационального выбора режима функционирования БВС на некотором интервале заключается в поиске решения с учетом того, что качество функционирования системы на последующих интервалах времени зависит от того, как изменилось состояние системы и какой ресурс выработан на данном интервале. В свою очередь, использованный в модели [5] ресурсный подход опирается на положение, что выработанный ресурс как характеристика состояния системы не зависит от траектории его выработки. С этой точки зрения рассматриваемая задача близка к задачам динамического программирования. Однако необходимо учитывать ограниченные возможности бортовых вычислительных средств и существенное ограничение времени решения задачи на борту КА (время планирования должно быть сравнимо со временем перехода на холодный резерв), а также мощность множества возможных конфигураций, обусловленную множеством функциональных режимов БВС и множеством режимов работы ее элементов. Так, если k – число конфигураций, M – число интервалов планирования, где l – количество режимов работы элемента, N – число элементов, m – число функциональных режимов, то при решении задачи методом динамического программирования число итераций может достигать $k!/(k-M+1)!$, $k = ml^N$. Поэтому вычислительная трудоемкость динамического программирования ограничивает его возможности применительно к поставленной задаче.

Идея предлагаемого подхода состоит в следующем. Оперативная информация с датчиков позволяет на основе заданной (построенной на Земле) решающей функции определить класс события с КА (к примеру, одиночный отказ, сбой, неблагоприятное воздействие некоторого типа и т.п.). Классы событий определяют базовые модели воздействия факторов космического пространства, условия, влияющие на надежность элементов БВС и устойчивость функционирования, а также ожидаемые сценарии возможных воздействий и отказов. Далее на основе коррекции базовой модели ожидаемых (расчетных) сценариев, учета выработанного элементами ресурса и реальных условий функционирования осуществляется прогноз деградации БВС на основе заданных моделей физических процессов, производительности и целевого эффекта, например, [3; 5; 8]. Прогнозирование ожидаемой траектории ввиду сложности расчетов для систем «с памятью» производится с опорой на методы «динамики средних» [2]. В силу неопределенности внешних воздействий принимается идея сценарного подхода, при котором рассматривается несколько сформированных, например, экспертными методами, наборов параметров условий функционирования, имеющих определенный вес, и охватывающих широкий спектр возможных ситуаций на борту КА. В результате выбирается конфигурация исходя из «терминального принципа» максимизации полезного эффекта (эффективного объема вычислений БВС) [3] за срок существования. Схема алгоритмизации предложенного способа выбора конфигураций БВС представлена на рисунке 2.

Выбор конфигураций бортовой вычислительной системы

Шаг 1. Формируется вектор параметров состояния КА $\vec{\mathfrak{Q}}(t_0)$.

Шаг 2. Принимается решение о классе события, определяющем набор сценариев D :

$$\vec{\mathfrak{Q}} \xrightarrow{\mathcal{F}} D = \langle V_j | j=1 \dots \text{card } D \rangle, V_j \in \mathbb{V}.$$

Шаг 3. Задача учета выработанного ресурса $R(t_0)$ решается следующим образом. Исходными данными являются информация датчиков внешних воздействий $\vec{h}(0; t_0)$ и исто-

рия конфигураций $G(0; t_0)$ на интервале $[0; t_0]$, а также текущее состояние БВС по результатам контроля и диагностирования $\Theta(t_0)$. Поскольку $\frac{d\bar{r}_i}{dt} = \bar{\delta}_i[\bar{r}_i(\tau), g_i(\tau), H]$, то $\bar{r}_i(t_0) = \int_0^{t_0} \bar{\delta}_{ij}[\bar{r}_i(\tau), g_i(\tau), H] d\tau$. Если история уровней воздействий и конфигурирования хранится с момента t_p предыдущей оценки ресурса, то

$$\bar{r}_i(t_0) = \bar{r}_i(t_p) + \int_{t_p}^{t_0} \bar{\delta}_{ij}[\bar{r}_i(\tau), g_i(\tau), H] d\tau.$$

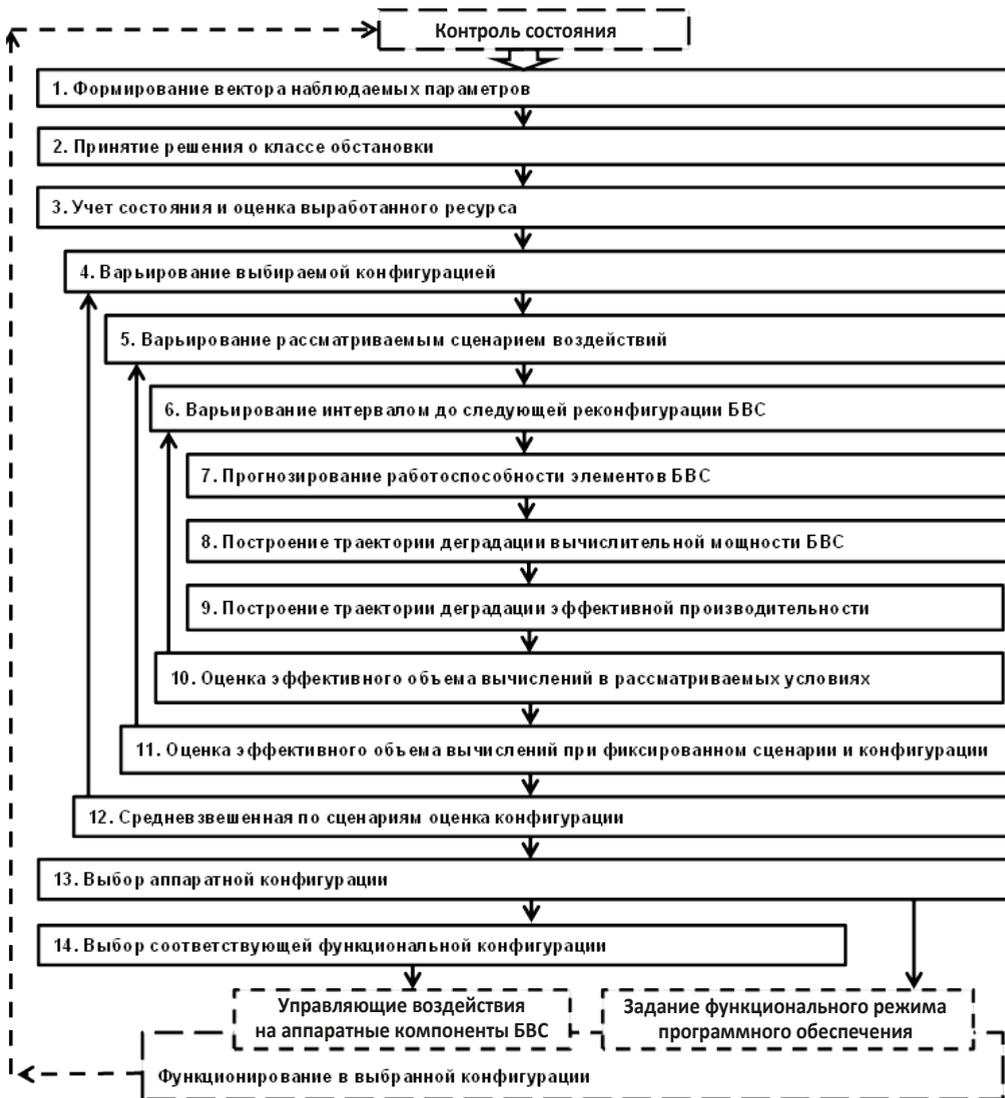


Рис. 2. Схема метода функционально-параметрического конфигурирования БВС КА

Захаров И.В., Корчагин П.В. Функционально-параметрическое конфигурирование...

При этом следует получить апостериорные оценки запаса ресурса с учетом того факта, что элемент к моменту t_0 не вышел из строя (его ресурсы не выработаны) исходя из того, что условный запас ресурса $\hat{u}_j^{(i)*} : t > 0, \hat{\sigma}_i(t) = 1$ имеет плотность распределения

$$f_j^{(i)*}(r) = \frac{f_j^{(i)}(r)}{1 - \int_0^{r_0} f_j^{(i)}(x) dx}, \quad i = 1, \dots, r.$$

Шаг 4. Выбирается некоторая конфигурация $G_i \in \mathbb{G}$.

Шаг 5. Выбирается набор параметров условий функционирования $H_j = \langle \bar{h}, V_j \rangle$, соответствующий реализации некоторого сценария $V_j \in D$.

Шаг 6. Задается $\Delta t_k = k \frac{t_s - t_0}{K}, k = 0, \dots, M$. Будем полагать, что на интервале $(t_0; t_0 + \Delta t_k)$ БВС находится в конфигурации $G_i(t)$, а на $(t_0 + \Delta t_k; t_s)$ – в конфигурации $\tilde{G}(t)$.

Шаг 7. Прогнозирование с учетом ресурса строится следующим образом. Требуется получить зависимости вероятностей пребывания элементов в работоспособном состоянии $\bar{p}(t | G_i, R_0, H_j, \Delta t_k)$ от времени t («траектории»). Для i -го элемента, полагая заданными $\bar{\delta}_i, H$ при начальных условиях $t_0; R(t_0)$ можно интегрировать дифференциальную форму определения ресурса, получив \bar{r}_i на интервале $(t_0 + \Delta t_k; t_s)$. Отсюда получим априорную вероятность работоспособного состояния элемента:

$$p_i^{apr}(\tau) = \prod_{i=1}^r P\{\bar{r}_i(\tau) < \hat{u}_i\}, \text{ где } \bar{r}_i(\tau) = \int_0^{\tau} \bar{\delta}_i(\bar{r}_i(x), H(x)) dx.$$

Условная вероятность работоспособности элемента, учитывающая тот факт, что элемент к моменту t_0 не вышел из строя (его ресурсы не выработаны):

$$p_i(\tau) = \prod_{i=1}^r P\{\bar{r}_i(\tau) \langle \hat{u}_i | \hat{u}_i > \bar{r}_i(t_0)\} = \frac{p_i^{apr}(\tau)}{p_i^{apr}(t_0)},$$

где $\bar{r}_i(\tau) = \bar{r}_i(t_0) + \int_{t_0}^{\tau} \bar{\delta}_i(\bar{r}_i(x), H(x)) dx.$

Шаг 8. В рамках поставленной задачи исчерпывающей оценкой деградации системы следует считать законы распределения вероятностей для всех ее возможных состояний в любой момент времени $t > t_0$. Из полученного на шаге 7 для данных условий $\bar{p}(t)$ и исходя из заданной структуры БВС рассчитывается «траектория деградации» математического ожидания производительности $\bar{v}(t)$ БВС.

Шаг 9. На данном шаге получим вероятность решения вычислительных задач с учетом реализуемости режимов

$$P(\xi, t) = P[\bar{v}(t), \xi] \cdot P_{\xi}(t; H_j),$$

где $P_{\xi} = P\{\xi \in \Xi\}$ – вероятность того, что режим ξ в текущем состоянии КА реализуем.

Шаг 10. Оценивается эффективный объем вычислений

$$\bar{J}(G_i, H_j, \Delta t_k) = \int_{t_0}^{t_s} \Delta J(\tau) d\tau, \quad \Delta J(t) = \max_{\xi} \{P(\xi, t) \cdot C_{\xi}\}.$$

Шаг 11. Итерационное повторение шагов 6–10 и оценивание эффективного объема вычислений для конфигурации G_i и сценария

$$V_j : J^*(G_i, V_j) = \arg \max_{0 \leq \Delta t_k \leq t_s - t_0} \tilde{J}(G_i, H_j, \Delta t_k).$$

Шаг 12. Итерационное повторение шагов 5–11 и определение средневзвешенной по сценариям оценки эффективного объема вычислений для конфигурации

$$G_i : J^{**}(G_i) = \sum_{j=1}^{cardV} \gamma_j J^*(G_i, V_j).$$

Шаг 13. Итерационное повторение шагов 4–12 и выбор конфигурации

$$G^* = \arg \max_i J^{**}(G_i).$$

Шаг 14. Выбирается соответствующий функциональный режим

$$\xi^* = \arg \max_{\xi \in \xi(t_0)} P(\xi, G^*, t_0) C_\xi.$$

Выводы

Анализ разработанного метода показал целесообразность его использования при разработке алгоритмов оперативной автономной реконфигурации БВС перспективных специализированных КА, функционирующих в условиях деструктивного влияния неблагоприятных факторов различного происхождения [1; 6]. Результаты моделирования функционирования вариантов БВС на основе архитектуры, подобной управляющим вычислительным системам ряда современных и перспективных КА дистанционного зондирования Земли, показали возможность обеспечить снижение потерь от срыва целевых задач при отказах в БВС на величину до 70% и повышение производительности БВС на 13–18%. Примерная оценка вклада данного метода в эффект, получаемый при реализации комплексного подхода к совершенствованию структуры и алгоритмов управления БВС КА, кратко представлена на рисунке 3.



Рис. 3. Оценка роли метода функционально-параметрического конфигурирования в комплексном подходе к совершенствованию структуры и алгоритмов управления БВС КА

Захаров И.В., Корчагин П.В. Функционально-параметрическое конфигурирование...

Проведенные исследования позволили разработать предложения для этапа разработки технического облика и алгоритмического обеспечения БВС КА, заключающиеся, в основном в следующем:

- обеспечить внедрение средств реконфигурации в архитектуру БВС и включение в состав бортового программного обеспечения специальных программ, реализующих алгоритм реконфигурации на основе предлагаемого метода [11];
- провести разработку алгоритмического обеспечения идентификации состояния КА, а также моделей прогноза сценариев воздействий различного характера [12];
- расширить состав средств мониторинга условий функционирования и ресурса элементов бортовой аппаратуры [14];
- в качестве простейшего алгоритма реконфигурации БВС рассматривать расчет и лимитирование энергопотребления в частично работоспособных состояниях КА [10].

Таким образом, внедрение разработанного метода позволит подготовить предложения по совершенствованию алгоритмов оперативного управления конфигурациями БВС, обеспечить требуемые уровни оперативной готовности информационно-вычислительных ресурсов КА и требуемые показатели устойчивости вычислительных процессов на борту КА.

Литература

1. Басыров А.Г., Забузов В.С., Захаров И.В. Метод превентивного функционально-параметрического конфигурирования бортовой вычислительной системы космического аппарата на основе прогнозирования ее деградации // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Вып. 665. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. С. 183–193.
2. Басыров А.Г., Захаров И.В. Оценивание живучести бортовых вычислительных систем космических аппаратов // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. Вып. 651. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. С. 139–148.
3. Басыров А.Г., Захаров И.В., Шушаков А.О. Подход к синтезу структуры бортовых вычислительных систем космических аппаратов на основе эволюционного поиска // Известия Тульского государственного университета. Серия: Технические науки. 2017. Вып. 12, ч. 2. С. 369–380.
4. Захаров И.В. Вопросы рационального управления функционированием бортовых вычислительных систем // Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли: тезисы докладов Пятой Международной научно-технической конференции. М.: ВНИИЭМ, 2017. С. 50–52.
5. Захаров И.В. Модель перестраиваемой бортовой вычислительной системы в условиях возможной деградации // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. Вып. 658. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. С. 144–152.
6. Захаров И.В., Корчагин П.В. Обоснование выбора структур неоднородных иерархических систем с помощью аппарата генетических алгоритмов // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ, управление». 2019. Вып. 2. С. 104–109.
7. Захаров И.В., Терехов В.Г. Автономное управление функционированием бортовых вычислительных систем на основе ресурсного подхода // Естественные и технические науки. 2017. № 1 (103). С. 113–115.
8. Иевлев В.И., Филиппов Г.А. Качество и надежность электронной компонентной базы ЭВМ специального назначения. Екатеринбург: УрФУ, 2013. 102 с.

9. Кирилин А.Н. и др. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии. М.: Машиностроение, 2010. 384 с.
10. Нечай А.А. Моделирование системы управления робототехническим комплексом ликвидации чрезвычайных ситуаций на основе многомерных копула-функций // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники: сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции. СПб., 2016. С. 287–292.
11. Нечай А.А. Формирование безопасной информационной среды // Актуальные проблемы современности: наука и общество. 2019. № 4 (25). С. 43–44.
12. Нечай А.А., Борисов А.А., Борисова Ю.И. Точечный анализ данных дистанционного зондирования Земли средствами языка программирования Python // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2019. Вып. 1. С. 49–55.
13. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Известия ЮФУ. Серия: Технические науки. 2015. Вып. 1. С. 162–174.
14. Шаймарданов А.М., Нечай А.А., Лепехин С.В. Математические модели систем автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2019. Вып. 2. С. 27–39.
15. Эйххофф Й. Бортовые компьютеры, программное обеспечение и полетные операции. М.: Техносфера, 2014. 336 с.

Literatura

1. Basyrov A.G., Zabuzov V.S., Zakharov I.V. Metod preventivnogo funktsional'no-parametricheskogo konfigurirovaniya bortovoj vychislitel'noj sistemy kosmicheskogo apparata na osnove prognozirovaniya ee degradatsii // Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskogo. Vyp. 665. SPb.: VKA im. A.F. Mozhajskogo, 2018. S. 183–193.
2. Basyrov A.G., Zakharov I.V. Otsenivanie zhivuchesti bortovykh vychislitel'nykh sistem kosmicheskikh apparatov // Trudy VKA imeni A.F. Mozhajskogo. Vyp. 651. SPb.: VKA im. A.F. Mozhajskogo, 2016. S. 139–148.
3. Basyrov A.G., Zakharov I.V., Shushakov A.O. Podkhod k sintezu struktury bortovykh vychislitel'nykh sistem kosmicheskikh apparatov na osnove evolyutsionnogo poiska // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2017. Vyp. 12, ch. 2. S. 369–380.
4. Zakharov I.V. Voprosy ratsional'nogo upravleniya funktsionirovaniem bortovykh vychislitel'nykh sistem // Aktual'nye problemy sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli: tezisy dokladov Pyatoy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. M.: VNIIEМ, 2017. S. 50–52.
5. Zakharov I.V. Model' perestraivajemoj bortovoj vychislitel'noj sistemy v usloviyakh vozmozhnoj degradatsii // Trudy VKA imeni A.F. Mozhajskogo. Vyp. 658. SPb.: VKA im. A.F. Mozhajskogo, 2017. S. 144–152.
6. Zakharov I.V., Korchagin P.V. Obosnovanie vybora struktur neodnorodnykh ierarkhicheskikh sistem s pomoshch'yu apparata geneticheskikh algoritmov // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz, upravlenie". 2019. Vyp. 2. S. 104–109.

7. *Zakharov I.V., Terekhov V.G.* Avtonomnoe upravlenie funktsionirovaniem bortovykh vychislitel'nykh sistem na osnove resursnogo podkhoda // *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2017. № 1 (103). S. 113–115.
8. *Ievlev V.I., Filippov G.A.* Kachestvo i nadezhnost' elektronnoj komponentnoj bazy EVM spetsial'nogo naznacheniya. Ekaterinburg: UrFU, 2013. 102 s.
9. *Kirilin A.N. i dr.* Metody obespecheniya zhivuchesti nizkoorbital'nykh avtomaticheskikh KA zondirovaniya Zemli: matematicheskie modeli, komp'yuternye tekhnologii. M.: Mashinostroenie, 2010. 384 s.
10. *Nechaj A.A.* Modelirovanie sistemy upravleniya robototekhnicheskim kompleksom likvidatsii chrezvychajnykh situatsij na osnove mnogomernykh kopula-funksij // *Sovremennye problemy sozdaniya i ekspluatatsii vooruzheniya, voennoj i spetsial'noj tekhniki: sbornik statej III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii*. SPb., 2016. S. 287–292.
11. *Nechaj A.A.* Formirovanie bezopasnoj informatsionnoj sredy // *Aktual'nye problemy sovremennosti: nauka i obshchestvo*. 2019. № 4 (25). S. 43–44.
12. *Nechaj A.A., Borisov A.A., Borisova Yu.I.* Tochechnyj analiz dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli sredstvami yazyka programmirovaniya Python // *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie"*. 2019. Vyp. 1. S. 49–55.
13. *Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M.* Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy konceptsii proaktivnogo monitoringa i upravleniya slozhnymi ob'ektami // *Izvestiya YuFU. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2015. Vyp. 1. S. 162–174.
14. *Shajmardanov A.M., Nechaj A.A., Lepekhin S.V.* Matematicheskie modeli sistem avtomaticheskogo upravleniya s shirotno-impul'snoj modulyatsiej // *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie"*. 2019. Vyp. 2. S. 27–39.
15. *Ejkkhoff J.* Bortovye komp'yutery, programmnoe obespechenie i poletnye operatsii. M.: Tekhnosfera, 2014. 336 s.

DOI: 10.25586/RNUV9187.20.02.P.037

УДК 004.925

М.С. Никитенко, Д.А. Ершов, М.В. Раскатова

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ОТСЕЧЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТРЕХМЕРНЫХ СЦЕН
В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Рассматриваются особенности организации процесса визуализации трехмерных сцен в реальном времени. Особое внимание уделяется проблеме определения видимости обрабатываемой системой визуализации геометрии. Дается характеристика стандартным методам отсека и определения видимости, выделяются их недостатки. Описывается современный подход к отсеку невидимых поверхностей и определяются способы его усовершенствования. Рассматриваются различные способы повышения эффективности процесса вычислений при осуществлении отсека и визуализации за счет иной организации в системах, содержащих несколько гетерогенных графических процессоров. Предлагается использование направленного ациклического графа в качестве высокоуровневого знания о зависимостях между этапами визуализации для эффективного планирования.

Ключевые слова: визуализация в реальном времени, оптимизация вычислений на графических процессорах, множественные графические процессоры.