

К.А. Суминов, Н.А. Бочаров, М.А. Кирилук

**ОЦЕНКА АППАРАТНОГО СОСТАВА БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ
РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ**

При создании современных робототехнических комплексов (РТК) наблюдается значительное разнообразие как аппаратных, так и программных решений, что создаёт дополнительные сложности при подборе рационального аппаратного и программного состава для обеспечения требуемой вычислительной мощности и эффективного решения поставленных задач. С одной стороны, зачастую приходится работать с уже установленным набором вычислительных комплексов (ВК), составляющих бортовую вычислительную систему (БВС) РТК, что существенно ограничивает возможности изменения программного состава и вынуждает адаптировать алгоритмы под фиксированные аппаратные ресурсы. С другой стороны, при наличии возможности изменения или создания нового аппаратного состава возникает задача выбора такой аппаратной компоновки, которая сможет удовлетворить вычислительным потребностям решаемых задач. В данной статье предлагается методика оценки аппаратного состава БВС РТК на основе решаемых задач, опирающаяся на использование многоверсионного программирования и построение паспортов решений. Каждый из вариантов программных решений для конкретной задачи дополняется в виде структурированного паспорта, содержащего как количественные, так и качественные характеристики, что позволяет проводить их детальный сравнительный анализ. На основе этих паспортов решений разрабатывается математическая модель, позволяющая подобрать набор вычислителей, способных обеспечить выполнение всех поставленных задач при одновременной минимизации суммарной стоимости, энергопотребления или других эксплуатационных характеристик БВС. Математически рассматриваемая задача сводится к обобщённой задаче о мультипликативном многомерном рюкзаке с мультивыбором и дополнительными ограничениями, что позволяет учитывать как ресурсные, так и топологические зависимости между решаемыми задачами. Приведены результаты экспериментов, выполненных с использованием разработанного экспериментального стенда, которые демонстрируют практическую применимость методики и подтверждают возможность её использования для получения количественных оценок вариантов аппаратного состава БВС РТК. Данный подход может быть адаптирован для различных типов РТК, что позволяет использовать его в смежных исследованиях в области оптимизации вычислительных систем для робототехнических комплексов.

Многоверсионное программирование; паспорта решений; бортовые вычислительные системы; робототехнические комплексы; мультипликативный многомерный рюкзак; аппаратный состав БВС РТК.

K.A. Suminov, N.A. Bocharov, M.A. Kirilyuk

**ASSESSMENT OF THE HARDWARE COMPOSITION OF ONBOARD COMPUTING
SYSTEMS OF ROBOTIC COMPLEXES BASED ON THE TASKS BEING SOLVED**

In the development of modern robotic complexes (RC), there is a significant diversity in both hardware and software solutions, which creates additional challenges in selecting a rational hardware and software composition to ensure the required computational power and to effectively address the assigned tasks. On one hand, it is often necessary to work with an already installed set of computing systems (CS) that form the onboard computing system (OCS) of the RC, which substantially limits the possibilities for modifying the software composition and necessitates the adaptation of algorithms to fixed hardware resources. On the other hand, when there is an opportunity to modify or create a new hardware composition, it becomes necessary to choose a hardware configuration that can meet the computational requirements of the tasks being solved. This article proposes a methodology for assessing the hardware composition of the OCS of RCs based on the tasks being solved, relying on the use of multiversion programming and the creation of solution passports. Each variant of the software solution for a specific task is supplemented by a structured passport that contains both quantitative and qualitative characteristics, allowing for a detailed comparative analysis. Based on these solution passports, a mathematical model is developed that enables the selection of a set of computing devices capable of executing all the assigned tasks while simultaneously minimizing the total cost, energy consumption, or other operational characteristics of the

OCS. Mathematically the problem under consideration is reduced to a generalized multiplicative multidimensional knapsack problem with multi-choice and additional constraints, which allows both resource and topological dependencies among the tasks being solved to be taken into account. Experimental results obtained using the developed simulation platform are presented, demonstrating the practical applicability of the methodology and confirming the possibility of using it to obtain quantitative estimates of the hardware composition variants of the OCS of RCs. This approach can be adapted for various types of RCs, which facilitates its use in related studies in the field of optimizing computing systems for robotic complexes.

Multiversion programming; solution passports; onboard computing systems; robotic complexes; multiplicative multidimensional knapsack; hardware composition of OCS.

Введение. В современных РТК наблюдается значительное разнообразие как аппаратных, так и программных решений. Такое разнообразие обусловлено стремительным развитием технологий, ростом требований к вычислительной мощности, энергоэффективности и интеллектуализации систем [1–4]. С одной стороны, зачастую в составе БВС используются уже установленные вычислительные комплексы, что ограничивает возможности изменения программного состава и вынуждает разработчиков адаптировать алгоритмы под фиксированные аппаратные ресурсы. С другой стороны, при наличии возможности изменения аппаратного состава и создания нового, возникает необходимость предварительной декомпозиции глобальной задачи РТК на более мелкие составляющие. Это позволяет подобрать аппаратную компоновку, которая способна удовлетворить вычислительным потребностям решаемых задач и обеспечить требуемую гибкость системы.

Разнообразие аппаратных решений проявляется в широком спектре устройств – от энергоэффективных, но менее производительных модулей до современных вычислителей с высоким уровнем обработки, большим количеством ядер и специализированными ускорителями [5–8]. Аналогичным образом, программное обеспечение для РТК представлено множеством альтернативных реализаций одного и того же функционала [9, 10]. Каждая из этих альтернатив характеризуется различными параметрами: затратами ресурсов, временем исполнения, точностью обработки и т.д.

Возникает потребность оценки аппаратного состава БВС, которая учитывает специфику как аппаратной части, так и программных решений. Т.е. возникает необходимость формирования рациональной аппаратной конфигурации БВС РТК, способной обеспечить выполнение всех необходимых вычислительных задач при ограниченных ресурсах.

Математически решение такой задачи может быть сведено к обобщенной задаче о многомерном мультипликативном рюкзаке с мультिवыбором [11] и дополнительными ограничениями в виде топологических зависимостей задач и т.д. Решение такой задачи может быть основано на создании многоверсионных библиотек с использованием паспортов решений [12]. Рассмотрим эти задачи более подробно.

Построение многоверсионных библиотек. Многоверсионные библиотеки представляют собой совокупности альтернативных программных решений для поставленных РТК задач. Для каждой задачи разрабатываются несколько вариантов реализации алгоритмов, которые могут отличаться по времени выполнения, потреблению ресурсов, качеству результатов и другим характеристикам. Каждое такое альтернативное решение дополняется паспортом в виде структурированного описания, содержащего как количественные, так и качественные показатели каждого решения.

По своей сути многоверсионные библиотеки используются для формирования некоторой базы данных программных решений, на основе которых становится возможной оценка аппаратного состава БВС. Исходя из паспортов решений, становится возможно проводить сравнительный анализ требований таких решений и, таким образом, подбирать набор вычислителей, способных обеспечить выполнение поставленных задач с минимальными затратами по стоимости, энергопотреблению или другим характеристикам. Общий вид таких паспортов для M задач, полученных в результате декомпозиции глобальной задачи РТК, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Общий вид паспортов для М задач

Номер параметра	Тип параметра	Задача 1			...	Задача М
		1	...	C_1		...
1	кат.	$f_{111}(\overline{x_{111}})$	...	$f_{1C_11}(\overline{x_{1C_11}})$	...	$f_{MC_{M1}}(\overline{x_{MC_{M1}}})$
...	...	...	...	...	...	...
z	кат.	$f_{11z}(\overline{x_{11z}})$	...	$f_{1C_1z}(\overline{x_{1C_1z}})$	...	$f_{MC_{Mz}}(\overline{x_{MC_{Mz}}})$
z + 1	функц.	x_{111}	...	x_{1C_11}	...	$x_{MC_{M1}}$
...	...	...	...	...	...	...
z + N	функц.	x_{11N-z}	...	x_{1C_1N-z}	...	$x_{MC_{MN-z}}$
...	...	...	...	...	...	...
N + E	кач	u_{11E}	...	u_{1C_1E}	...	$u_{MC_{ME}}$

Формально результат может быть описан следующим образом:

Дано М задач, которые необходимо решать. Для каждой i-ой задачи, где $i = \{1, 2, \dots, M\}$, построено C_i решений. В общем виде, каждое решение описывается вектором s_{ij} длиной N, где N – количество рассматриваемых в системе параметров, $j = \{1, 2, \dots, C_i\}$ – номер решения i-ой задачи. При этом каждое значение вектора может иметь либо категориальный тип, либо тип функциональной зависимости от набора собственных параметров, описывающей зависимость для текущего параметра. Категориальные признаки описываются как, x_{ijk} , функциональные признаки описываются как $f_{ijk}(\overline{x_{ijk}})$, где k – номер признака в текущем решении, $\overline{x_{ijk}}$ – вектор параметров функциональной зависимости k-го признака j-го решения i-й задачи. Каждое решение имеет z функциональных признаков и, соответственно, (N – z) категориальных признаков. Также вектор s_{ij} необходимо дополнить компонентами показателей качества. Пусть E – общее количество частных показателей качества, оцениваемых в частных решениях, тогда вектор s_{ij} примет следующий вид

$$s_{ij} = \begin{pmatrix} f_{ij1}(\overline{x_{ij1}}) \\ f_{ij2}(\overline{x_{ij2}}) \\ \vdots \\ f_{ijz}(\overline{x_{ijz}}) \\ x_{ij1} \\ x_{ij2} \\ \vdots \\ x_{ijN-z} \\ u_{ij1} \\ u_{ij2} \\ \vdots \\ u_{ijE} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Размерность этого вектора равна (N + E).

Тогда набор решений S_i для i-ой задачи может быть представлен матрицей размерностью N x C_i . Такая матрица имеет следующий вид:

$$S_i = \begin{pmatrix} f_{i11}(\overline{x_{i11}}) & f_{i21}(\overline{x_{i21}}) & \dots & f_{iC_i1}(\overline{x_{iC_i1}}) \\ f_{i12}(\overline{x_{i12}}) & f_{i22}(\overline{x_{i22}}) & \dots & f_{iC_i2}(\overline{x_{iC_i2}}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{i1z}(\overline{x_{i1z}}) & f_{i2z}(\overline{x_{i2z}}) & \dots & f_{iC_iz}(\overline{x_{iC_iz}}) \\ x_{i11} & x_{i21} & \dots & x_{iC_i1} \\ x_{i12} & x_{i22} & \dots & x_{iC_i2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1N-z} & x_{i2N-z} & \dots & x_{iC_iN-z} \\ u_{i11} & u_{i21} & \dots & u_{iC_i1} \\ u_{i12} & u_{i22} & \dots & u_{iC_i2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{i1E} & u_{i2E} & \dots & u_{iC_iE} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Матрица S_i может быть разделена на три матрицы Sx_i , Sf_i , Su_i , где Sx_i содержит только категориальные признаки и имеет размерность $z \times C_i$, Sf_i содержит только функциональные признаки решений i -й задачи и имеет размерность $(N - z) \times C_i$, а Su_i содержит только показатели качества решений i -й задачи и имеет размерность $E \times C_i$.

$$S_i = \begin{pmatrix} Sf_i \\ Sx_i \\ Su_i \end{pmatrix} \quad (3)$$

Для каждой i -ой из M задач решения описываются в виде матрицы S_i . Тогда все решения можно представить в виде блочной матрицы решений R :

$$R = (S_1 \ S_2 \ \dots \ S_M) = \begin{pmatrix} Sf_1 & Sf_2 & \dots & Sf_M \\ Sx_1 & Sx_2 & \dots & Sx_M \\ Su_1 & Su_2 & \dots & Su_M \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Размерность матрицы решений будет $(N + E) \times (\sum_{i=1}^M C_i)$.

Для каждой поставленной задачи выбирается конкретное частное решение из построенного множества возможных решений этой задачи. Тогда конфигурация программных решений в конкретный момент может быть описана как вектор:

$$W = (w_1 \ w_2 \ \dots \ w_M), \quad (5)$$

где w_M – индекс выбранного в текущей конфигурации решения для задачи M и $w_i = \{1, 2, \dots, C_i\}$.

Задача поиска аппаратного состава БВС РТК. Поставленную задачу поиска аппаратного состава БВС РТК на основе паспортов решений можно свести к обобщённой задаче о мультипликативном многомерном рюкзаке с дополнительными ограничениями, что каждый класс может быть представлен только в одном рюкзаке. Кроме того, следует учесть, что некоторые решения могут зависеть от решения задач других групп (например, распознавание может зависеть от обнаружения), а также требуют решения задач, являющихся для них вспомогательными, но не представляющими ценности в обособленном виде.

Рассмотрим формулировку задачи в контексте имеющейся задачи получения количественных оценок вариантов создания вычислительных комплексов:

Пусть имеется:

Множество задач $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, где n – количество задач, каждая задача r_i , $i = 1, 2, \dots, n$, имеет:

- ♦ описательные параметры – название задачи r_name_i , идентификатор задачи r_id_i , время исполнения задачи t_i , и показатель детализации d_i .

- ♦ потребляемые ресурсы – m различных типов, представленные вектором Wr_i , так, что $Wr_{ij} \geq 0$ – значение потребления ресурса j -го типа для решения i , $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$.

- ♦ вектор состояния зависимостей Sr_i содержащий сведения о зависимостях i -й задачи по версии необходимых библиотек, устройств, архитектуре исполняющего вычислителя и т.д. необходимых для данной задачи,

$Sr_i = \{Sr_{i1}, Sr_{i2}, \dots, Sr_{ip}\}$, где p – длина вектора, т.е. количество зависимостей. Таким образом, i -я задача описывается r_i , где $r_i = \{r_name_i, r_id_i, t_i, d_i, Wr_i, Sr_i\}$, и длина вектора $r_i = 4 + m + p$

Также имеется множество типов вычислителей $C = \{c_1, c_2, \dots, c_y\}$, где y – количество типов вычислителей, каждый тип вычислителя c_k , $k = 1, 2, \dots, y$ имеет:

- ♦ описательные параметры – название вычислителя c_name_i , стоимость одного вычислителя k -го типа c_cost_k , частота работы вычислителя c_freq_k , количество ядер k -го типа вычислителя c_cores_k , производительность k -го вычислителя c_GFlops_k , мощность k -го вычислителя c_TDP_k .

- ♦ объём имеющихся у него ресурсов m различных типов представленный вектором Wc_k , так, что $Wc_{kj} \geq 0$, – ограничение на ресурс j -го типа для вычислителя k -го типа, $j = 1, 2, \dots, m$, $k = 1, 2, \dots, y$.

♦ вектор состояния вычислителя Sc_k описывающий состояние k -го значения, соответствующее зависимостям задач Sr_i (версии программных библиотек на данном типе вычислителя, архитектуры вычислителя и др.).

$Sc_k = \{Sc_{k1}, Sc_{k2}, \dots, Sc_{kp}\}$, где p – длина вектора, т.е. количество зависимостей.

Таким образом, k -й вычислитель описывается вектором c_k , где

$c_k = \{c_name_k, c_cost_k, c_freq_k, c_cores_k, c_GFlops_k, c_TDP_k, Wc_k, Sc_k\}$ и длина вектора $c_k = 6 + m + p$.

Длины векторов Wr_i , и Wc_k равны между собой и составляют m ,

$i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, y$. Значения Wr_{ij} , и Wc_{kj} , $i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, y$,

$j = 1, 2, \dots, m$, одинаковую характеристику с точки зрения имеющегося и необходимого значения соответственно.

Длины векторов Sr_i , и Sc_k равны между собой и составляют p , $i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, y$. Значения Sr_{ij} , и Sc_{kj} , $i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, y, j = 1, 2, \dots, p$, одинаковую характеристику с точки зрения имеющегося и необходимого значения соответственно.

Требуется сформировать набор вычислителей из доступных типов, который будет обеспечивать решение всех поставленных задач. Т.е. такую, компоновку, при которой можно разметить все задачи для исполнения на вычислителях.

Каждая задача может быть размещена только на одном вычислителе и не может распределяться между несколькими вычислителями

Выбранный набор должен быть минимальным по сумме стоимостей вычислителей c_cost и по сумме выделяемой мощности c_TDP .

Для размещения задач можно использовать вычислители любых типов в любом не отрицательном количестве, в том числе 0. Обозначим количество используемых вычислителей типа k через $c_count_k \geq 0, k = 1, 2, \dots, y$.

Задача с номером a может быть размещена на вычислителе на конкретном z -м экземпляре вычислителя типа b , где $0 \leq z \leq c_count_b$, где $a \in \{1, 2, \dots, n\}, b \in \{1, 2, \dots, y\}$, при условиях когда:

♦ вектор состояния вычислителя Sc_b удовлетворяет вектору состояния зависимостей Sr_a . Т.е. тогда, когда значения Sc_{bj} удовлетворяет требованию Sr_{aj} , $j = 1, 2, \dots, p$.

♦ объём потребляемых ресурсов задачи a не превосходит объём соответствующих оставшихся ресурсов на конкретном z -м экземпляре вычислителя типа b . Т.е. $Wr_{aj} \leq Wc_{bj} - H_{bjz}$, где H_{bjz} – суммарное потребление j -го ресурса на z -м вычислителе типа b . $j = 1, 2, \dots, m$.

Напишем более формальную постановку задачи:

Введём бинарную переменную $x_{i,k,z}$, равную 1, если задача i размещена на z -м экземпляре вычислителя типа k , и 0 – в противном случае:

$$x_{i,k,z} \in \{0,1\},$$

где $i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, y, z$ – индекс экземпляра в пределах «максимально возможного» числа устройств данного типа.

Введём бинарную переменную $y_{k,z}$, равную 1, если z -й экземпляр вычислителя типа k выбран в итоговую конфигурацию и 0, если он не используется:

$$y_{k,z} \in \{0,1\}.$$

Тогда

$$c_count_k = \sum_{z=1}^n y_{k,z}. \quad (6)$$

Необходимо минимизировать две суммы:

Общая стоимость:

$$\sum_{k=1}^y (c_cost_k \cdot c_count_k). \quad (7)$$

Общий критерий TDP:

$$\sum_{k=1}^y (c_TDP_k \cdot c_count_k). \quad (8)$$

С учётом введённых переменных можно записать:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^y c_cost_k \cdot c_count_k &= \sum_{k=1}^y \sum_{z=1}^n c_cost_k y_{k,z} \\ \sum_{k=1}^y c_TDP_k \cdot c_count_k &= \sum_{k=1}^y \sum_{z=1}^n c_TDP_k y_{k,z} \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, в случае двухкритериальной оптимизации (двух целей) итоговая целевая функция может быть записана как:

$$\min \left(\sum_{k=1}^y \sum_{z=1}^n c_cost_k y_{k,z}, \sum_{k=1}^y \sum_{z=1}^n c_TDP_k y_{k,z} \right). \quad (10)$$

Или же, при различии приоритетов итоговая целевая функция может быть записана как:

$$\min \left(\alpha \left(\sum_{k,z} c_cost_k y_{k,z} \right) + \beta \left(\sum_{k,z} c_TDP_k y_{k,z} \right) \right). \quad (11)$$

При следующих ограничениях:

- ♦ каждая задача размещается ровно на одном экземпляре:

$$\sum_{k=1}^y \sum_{z=1}^n x_{i,k,z} = 1, \quad \forall i = 1, \dots, n. \quad (12)$$

- ♦ нельзя направить задачу на неиспользуемый вычислитель: если z -й экземпляр типа k не активирован ($y_{k,z} = 0$), то ни одна задача не может там находиться:

$$x_{i,k,z} \leq y_{k,z}, \quad \forall i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, y, z = 1, \dots, n. \quad (13)$$

- ♦ на каждом экземпляре вычислителя: сумма потребления ресурса j всеми задачами, размещёнными на данном экземпляре (k, z), не должна превышать ресурсную ёмкость $Wc_{k,j}$ типа k :

$$\sum_{i=1}^n W r_{i,j} x_{i,k,z} \leq W c_{k,j} y_{k,z}, \quad \forall k = 1, \dots, y, z = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m. \quad (14)$$

- ♦ задача i может быть размещена на вычислителе типа k , если вектор Sc_k был совместим с вектором Sr_i . Введём обозначение

$$D_{i,k} = \begin{cases} 1, & \text{если задача } i \text{ совместима с вычислителем } k \text{ по зависимостям} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases},$$

тогда:

$$x_{i,k,z} \leq D_{i,k}, \quad \forall i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, y, z = 1, \dots, n. \quad (15)$$

Оценка эффективности. В рамках работ, проводимых в ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука», был реализован описанный в работе подход для оценки аппаратного состава БВС РТК, исходя из стоящих задач, с использованием многоверсионного программирования. В качестве РТК рассматривались наземные РТК. Большинство РТК рассматриваемого типа оснащены системами технического зрения и планирования пути, [13–16] ввиду чего экспериментальные исследования проведены для задач этих классов. Были выбраны следующие частные задачи, стоящие перед БВС:

- ♦ задачи технического зрения: определение текстуры поверхности; обнаружение объектов интереса; классификация объектов интереса; сегментация областей движения; поиск геометрических примитивов 1-го и 2-го порядков; построение стереорекострукции сцены.
- ♦ задачи планирования пути: формирование графа проходимости; поиска пути на графе проходимости.

Для указанных задач были реализованы многоверсионные библиотеки. При построении паспортов, для получения характеристик альтернативных решений, был разработан комплексный экспериментальный стенд, структурная схема которого представлена на рис. 1. В качестве функциональных параметров решений рассматривались такие потребляемые ресурсы как: потребление памяти, потребление CPU, время исполнения, точность решений (детализация).

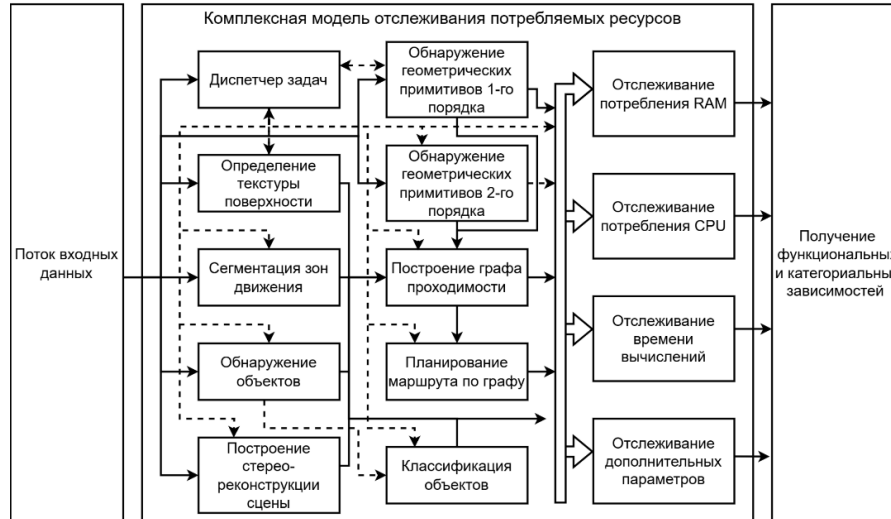


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда

На основе разработанных многоверсионных библиотек было проведено моделирование с целью получения оценок аппаратного состава БВС РТК.

На основе паспортов собраны конфигурационные файлы задач. Конфигурации сформированы для четырех вариантов исполнения, отличающихся количеством потребляемых ресурсов. Выбраны 4 конфигурации с различным потреблением ресурсов – от минимального, до максимального. В табл. 2 представлены выбранные конфигурации.

Таблица 2

Описание выбранных конфигураций

Конфигурация	1	2	3	4
Определение текстуры поверхности	200 x 200	400 x 400	600 x 600	800 x 800
Сегментация зон движения	640 x 360	800 x 450	1040 x 584	1200 x 674
Обнаружение объектов	224 x 224	350 x 350	546 x 546	682 x 682
Построение стереореконструкции сцены	1280 x 720 sbm	1280 x 720 sbm f	1280 x 720 sbgm	1280 x 720 sbgm f
Обнаружение геометрических примитивов 1-го порядка	491 x 307	654 x 409	817 x 511	1021 x 638
Обнаружение геометрических примитивов 2-го порядка	491 x 307	654 x 409	817 x 511	1021 x 638
Построение графа проходимости	3648	14592	32832	44688
Планирование маршрута по графу проходимости	bfs	Dijkstra	A *	D * lite
Классификация объектов	224 x 224	350 x 350	546 x 546	682 x 682

При проведении эксперимента в качестве возможных вычислительных комплексов, входящих в БВС РТК, рассматривались ВК на основе отечественных микропроцессоров серии «Эльбрус» [17–21]. В табл. 3 представлены рассматриваемые характеристики вычислителей. Значения указанных характеристик и потребляемых ресурсами являются относительными и рассчитаны относительно «Эльбрус – 8С».

Таблица 3

Характеристики рассматриваемых ВК

CPU_name	e4c	e1c+	e8c	e8c2	e16c	e2c3	r2000
CPU_frequency	800	1000	1300	1500	2000	2000	2000
Cores	4	1	8	8	16	2	8
GFlops	25	24	125	288	768	96	64
TDP	45	10	70	80	110	15	30
RAM	96000	32000	256000	256000	256000	128000	32000

Разработанная программная реализация описывает количество и типы необходимых вычислителей, распределение задач по вычислителям, распределение вычислителей по задачам, а также суммарные потребляемые ресурсы.

Полученные количественные оценки вариантов аппаратного состава БВС РТК на основе отечественных разнородных аппаратно-программных платформ: для сценария 1 – 2 МП «Эльбрус-2С3», для сценария 2 – 2 МП «Эльбрус-2С3», 1 МП «Эльбрус-1С+», для сценария 3 – МП «Эльбрус-2С3», МП «Эльбрус-8С2», для сценария 4 – 2 МП «Эльбрус-2С3», МП «Эльбрус-8С2».

Заключение. Предложен подход к решению задачи выбора аппаратного состава бортовых вычислительных систем робототехнических комплексов с учётом специфики решаемых задач и особенностей вычислительных комплексов. Предложенный подход сводится к решению обобщённой задачи о многомерном мультипликативном рюкзаке с мультивыбором и другими ограничениями. Основой для решения является построение многоверсионных библиотек альтернативных решений и составление их паспортов, в которых фиксируются количественные и качественные характеристики каждого варианта.

Для обеспечения возможности построения паспортов решений и проведения экспериментальных исследований разработан комплексный экспериментальный стенд, который позволяет измерять потребление ресурсов программных решений.

В ходе экспериментального исследования рассмотрены различные конфигурации наборов задач, отражающие различные эксплуатационные условия – от экономичного до высоконагруженного режима работы. Эти конфигурации отличаются по объёму потребляемых вычислительных ресурсов, времени исполнения и качественным показателям решений, что позволяет оценить эффективность различных вариантов аппаратного состава в условиях ограниченности ресурсов.

В результате проведённых исследований получены количественные оценки вариантов создания бортовых вычислительных систем на основе отечественных разнородных аппаратно-программных платформ. Полученные данные демонстрируют возможность выбора рациональных вариантов компоновки вычислительной системы, способных удовлетворить специфические требования по производительности, энергопотреблению и другим ключевым характеристикам.

Таким образом, показано, что предложенный подход к оценке аппаратного состава бортовых вычислительных систем РТК, основанный на использовании многоверсионных библиотек и паспортов решений, позволяет получать количественные оценки вариантов их конфигурации с учётом специфики решаемых задач и вычислительных комплексов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Valavanis K.P., Saridis G.N. Intelligent robotic systems: theory, design and applications // Springer Science & Business Media. – 2012. – Vol. 182.
2. Lai R., Lin W., Wu Y. Review of Research on the Key Technologies, Application Fields and Development Trends of Intelligent Robots // International Conference on Intelligent Robotics applications. – Springer, Cham, 2018. – P. 449-458.

3. Макаров И.М., Лохин В.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. – М.: Физматлит, 2001.
4. Rault R., Trentesaux D. Artificial intelligence, autonomous systems and robotics: legal innovations // Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing: Proceedings of SOHOMA 2017. – 2018. – P. 1-9.
5. Суминов К.А., Бочаров Н.А. Исследование ограничений применимости микропроцессоров ряда Эльбрус для решения задач технического зрения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1 (225). – С. 279-288. – DOI: 10.18522/2311-3103-2022-1-279-288. – EDN GABABO.
6. Rojas-Perez L.O., Martínez-Carranza J. On-board processing for autonomous drone racing: An overview // Integration. – 2021. – Vol. 80. – P. 46-59.
7. Gonzalez-Arjona D. et al. On-board implementation // Modern Spacecraft Guidance, Navigation, and Control. – Elsevier, 2023. – P. 685-712.
8. Кирилюк М.А., Бочаров Н.А., Парамонов Н.Б., Суминов К.А. Разработка и оценка эффективности метода организации вычислений на специализированных вычислительных системах с квантовым сопроцессором // Приборы. – 2024. – № 3 (285). – С. 12-20. – EDN TPQGGM.
9. Парамонов Н.Б., Минин И.В. Многоверсионное моделирование в ходе проектирования информационных систем // Межотраслевая информационная служба. – 2014. – № 1. – С. 40-44.
10. Chen Liming, Avizlenlsn Algirdas. Version Programming: A Fault-Tolerance Approach to Reliability of Software Operation // IEEE Transactions on Software Engineering. – 1985. – Vol. SE-11, No. 12.
11. Martello S. Knapsack problems: Algorithms and computer implementations. – John Wiley & Sons, New York, NY United States, 1990. – 296 p. – ISBN:978-0-471-92420-3.
12. Суминов К.А. Метод формирования многоверсионных библиотек функциональных программ бортовых вычислительных систем робототехнических комплексов // Приборы. – 2025. – № 1 (295). – С. 7-13.
13. Bocharov N., Slavin O., Suminov K., Paramonov N. Modeling of Technical Vision System of Robots Based on Elbrus Microprocessors // IEEE Proceedings of 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, 08–10 ноября 2023 года. Vol. 5. – Lipetsk: Lipetsk State Technical University, 2023. – P. 572-577. – DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9974116. – EDN FMKKQO.
14. Pérez L. et al. Robot guidance using machine vision techniques in industrial environments: A comparative review // Sensors. – 2016. – Vol. 16, No. 3. – P. 335.
15. Фельдман В.М., Волин В.С., Черепанов С.А. [и др.]. Решение задач робототехники на перспективных отечественных вычислителях // Приборы. – 2021. – № 5 (251). – С. 28-35. – EDN EKDPQG.
16. Gasparetto A. et al. Path planning and trajectory planning algorithms: A general overview // Motion and operation planning of robotic systems: Background and practical approaches. – 2015. – P. 3-27.
17. Бычков И.Н., Чучко П.А. Решения для средств вычислительной техники на основе процессора "Эльбрус-8СВ" // Наноиндустрия. – 2019. – № S(89). – С. 57-59. – DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.57.59. – EDN ELYLIT.
18. Бычков И.Н., Лобанов И.Н., Молчанов И.А. Вычислительная техника на основе аппаратно-программной платформы "Эльбрус" для перспективных информационных систем // Приборы. – 2018. – № 8 (218). – С. 14-20. – EDN YQWZGX.
19. Ким А.К., Перекатов В.И., Сахин Ю.Х. Развитие и реализация архитектуры вычислительных комплексов серии "Эльбрус" для решения задач ракетно-космической обороны // Вопросы радиоэлектроники. – 2010. – Т. 3, № 3. – С. 5-17. – EDN NZGZMX.
20. Ким А.К., Волконский В.Ю., Груздов Ф.А. [и др.]. Микропроцессорные вычислительные комплексы с архитектурой "Эльбрус" и их программное обеспечение // Вопросы радиоэлектроники. – 2009. – Т. 4, № 3. – С. 5-37.
21. Руководство по эффективному программированию на платформе «Эльбрус». – URL: http://www.mcst.ru/elbrus_prog электронный ресурс (дата обращения 12.12.2024).

REFERENCES

1. Valavanis K.P., Saridis G.N. Intelligent robotic systems: theory, design and applications, *Springer Science & Business Media*, 2012, Vol. 182.
2. Lai R., Lin W., Wu Y. Review of Research on the Key Technologies, Application Fields and Development Trends of Intelligent Robots, *International Conference on Intelligent Robotics applications*. Springer, Cham, 2018, pp. 449-458.
3. Makarov I.M., Lokhin V.M. *Intellektual'nye sistemy avtomaticheskogo upravleniya* [Intelligent automatic control systems]. Moscow: Fizmatlit, 2001.

4. Rault R., Trentesaux D. Artificial intelligence, autonomous systems and robotics: legal innovations, *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing: Proceedings of SOHOMA 2017*, 2018, pp. 1-9.
5. Suminov K.A., Bocharov N.A. Issledovanie ogranicheniy primenimosti mikroprotssessorov ryada El'brus dlya resheniya zadach tekhnicheskogo zreniya [Study of limitations of applicability of Elbrus series microprocessors for solving problems of machine vision], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 279-288. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-1-279-288. EDN GABABO.
6. Rojas-Perez L.O., Martínez-Carranza J. On-board processing for autonomous drone racing: An overview, *Integration*, 2021, Vol. 80, pp. 46-59.
7. Gonzalez-Arjona D. et al. On-board implementation, *Modern Spacecraft Guidance, Navigation, and Control*. Elsevier, 2023, pp. 685-712.
8. Kirilyuk M.A., Bocharov N.A., Paramonov N.B., Suminov K.A. Razrabotka i otsenka effektivnosti metoda organizatsii vychisleniy na spetsializirovannykh vychislitel'nykh sistemakh s kvantovym soprotssessorom [Development and efficiency assessment of the method for organizing computations on specialized computing systems with a quantum coprocessor], *Pribory* [Devices], 2024, No. 3 (285), pp. 12-20. EDN TPQGGM.
9. Paramonov N.B., Minin I.V. Mnogoversionnoe modelirovanie v khode proektirovaniya informatsionnykh sistem [Multi-version modeling during the design of information systems], *Mezhotraslevaya informatsionnaya sluzhba* [Interindustry Information Service], 2014, No. 1, pp. 40-44.
10. Chen Liming, Avizlenlsn Algirdas. Version Programming: A Fault-Tolerance Approach to Reliability of Software Operation, *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1985, Vol. SE-11, No. 12.
11. Martello S. Knapsack problems: Algorithms and computer implementations. John Wiley & Sons, New York, NY United States, 1990, 296 p. ISBN:978-0-471-92420-3.
12. Suminov K.A. Metod formirovaniya mnogoversionnykh bibliotek funktsional'nykh programm bortovykh vychislitel'nykh sistem robototekhnicheskikh kompleksov [Method for forming multi-version libraries of functional programs of on-board computing systems of robotic complexes], *Pribory* [Devices], 2025, No. 1 (295), pp. 7-13.
13. Bocharov N., Slavin O., Suminov K., Paramonov N. Modeling of Technical Vision System of Robots Based on Elbrus Microprocessors, *IEEE Proceedings of 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, Lipetsk, 08–10 November 2023. Vol. 5. Lipetsk: Lipetsk State Technical University, 2023, pp. 572-577. DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9974116. EDN FMKKQO.
14. Pérez L. et al. Robot guidance using machine vision techniques in industrial environments: A comparative review, *Sensors*, 2016, Vol. 16, No. 3, pp. 335.
15. Fel'dman V.M., Volin V.S., Cherepanov S.A. [i dr.]. Reshenie zadach robototekhniki na perspektivnykh otechestvennykh vychislitelyakh [Solving robotics problems on promising domestic computers], *Pribory* [Devices], 2021, No. 5 (251), pp. 28-35. EDN EKDPQG.
16. Gasparetto A. et al. Path planning and trajectory planning algorithms: A general overview, *Motion and operation planning of robotic systems: Background and practical approaches*, 2015, pp. 3-27.
17. Bychkov I.N., Chuchko P.A. Resheniya dlya sredstv vychislitel'noy tekhniki na osnove protssessora "El'brus-8SV" [Solutions for computing equipment based on the Elbrus-8SV processor], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2019, No. S(89), pp. 57-59. DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.57.59. – EDN EEYLIT.
18. Bychkov I.N., Lobanov I.N., Molchanov I.A. Vychislitel'naya tekhnika na osnove apparatno-programmnoy platformy "El'brus" dlya perspektivnykh informatsionnykh sistem [Computing equipment based on the Elbrus hardware and software platform for advanced information systems], *Pribory* [Devices], 2018, No. 8 (218), pp. 14-20. EDN YQWZGX.
19. Kim A.K., Perekatov V.I., Sakhin Yu.Kh. Razvitiye i realizatsiya arkhitektury vychislitel'nykh kompleksov serii "El'brus" dlya resheniya zadach raketno-kosmicheskoy oborony [Development and implementation of the architecture of computing complexes of the Elbrus series for solving problems of rocket and space defense], *Voprosy radioelektroniki* [Questions of Radio Electronics], 2010, Vol. 3, No. 3, pp. 5-17. EDN NZGZMX.
20. Kim A.K., Volkonskiy V.Yu., Gruzlov F.A. [i dr.]. Mikroprotsessornye vychislitel'nye komplekсы s arkhitekturoy "El'brus" i ikh programmnoe obespechenie [Microprocessor computing complexes with the Elbrus architecture and their software], *Voprosy radioelektroniki* [Questions of Radio Electronics], 2009, Vol. 4, No. 3, pp. 5-37.
21. Rukovodstvo po effektivnomu programmirovaniyu na platforme «El'brus». Available at: http://www.mcst.ru/elbrus_prog_elektronnyy_resurs (accessed 12 December 2024).

Суминов Константин Александрович – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: Konstantin.A.Suminov@mcst.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74991355336; начальник отдела.

Бочаров Никита Алексеевич – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; г. Москва, Россия; тел.: +79167346437; к.т.н.; зам. руководителя управления; г.н.с.

Кирилук Михаил Андреевич – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: kirilyuk_m@ineum.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79055273011; к.т.н.; начальник отдела; с.н.с.

Suminov Konstantin Alexandrovich – JSC «INEUM»; e-mail: Konstantin.A.Suminov@mcst.ru; Moscow, Russia; phone: +74991355336; head of department.

Bocharov Nikita Alexeevich – JSC «INEUM»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; Moscow, Russia; phone: +79167346437; cand. of eng. sc.; deputy head of division; chief researcher.

Kirilyuk Mikhail Andreevich – JSC «INEUM»; e-mail: Mikhail.A.Kirilyuk@mcst.ru; Moscow, Russia; phone: +79055273011; cand. of eng. sc.; head of department, senior researcher.

УДК 621.391:004.032.26

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-289-298

Д.В. Шумков, И.В. Титков, П.А. Гулевич

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В ИНТЕРЕСАХ РАДИОМОНИТОРИНГА

Рассматривается исследование возможности применения свёрточных нейронных сетей (СНС) для технического распознавания объектов (ТРО) в контексте радиомониторинга. Основное внимание уделяется разработке и оптимизации алгоритмов обработки радиолокационных сигналов с использованием глубоких нейронных сетей. Исследования показали, что применение СНС позволяет существенно повысить точность классификации радиосигналов по сравнению с традиционными методами обработки. Разработанный подход основан на извлечении иерархических признаков из спектральных изображений радиосигналов и их последующей классификации с помощью обученной нейронной сети. В работе представлены результаты экспериментальных исследований, проведённых на наборе данных, включающем более 10 000 образцов радиосигналов различных типов. Показано, что предложенная методика обеспечивает точность распознавания до 93% при работе с зашумлёнными сигналами и вероятность ложной тревоги не более 0,05. Особое внимание уделено вопросам выбора архитектуры нейронной сети под специфику задачи радиомониторинга. Также было детально рассмотрены варианты преобразования в спектральное изображение радиосигналов, для обработки в режиме реального времени. Разработаны методы предварительной обработки данных, включающие нормализацию амплитуды, частотную коррекцию и устранение помех. Результаты исследования могут найти применение в системах контроля радиоэфира и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования СНС в задачах технического распознавания объектов радиомониторинга и открывают новые возможности для развития методов интеллектуальной обработки радиолокационной информации. Перспективные направления дальнейших исследований включают разработку адаптивных методов обучения нейронных сетей в условиях изменяющейся радиообстановки и создание гибридных систем, сочетающих традиционные методы обработки сигналов с современными нейросетевыми алгоритмами.

Радиомониторинг; свёрточные нейронные сети; классификация объектов в радиоэфире; метод; алгоритм; эксперимент.

D.V. Shumkov, I.V. Titkov, P.A. Gulevich

APPLICATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR TECHNICAL OBJECT RECOGNITION IN THE INTERESTS OF RADIO MONITORING

The article examines the possibility of using convolutional neural networks for technical object recognition in the context of radio monitoring. The focus is on the development and optimization of algorithms for processing radar signals using deep neural networks. Studies have shown that the use of CNN can significantly improve the classification accuracy of radio signals compared to traditional processing