

<sup>1</sup>Жуков И.А., д.т.н. проф.,  
<sup>1</sup>Печурин Н.К., д.т.н. проф.,  
<sup>2</sup>Кондратова Л.П., к.т.н.,  
<sup>2</sup>Печурин С.Н., к.т.н.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КЛАСТЕРЕ ДЛЯ БПЛА

<sup>1</sup>Национальный авиационный университет

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины «КПИ»

[zhuia@ukr.net](mailto:zhuia@ukr.net)

[pechnk@mail.ru](mailto:pechnk@mail.ru)

[ljupav@yandex.ua](mailto:ljupav@yandex.ua)

[pechsn@mail.ru](mailto:pechsn@mail.ru)

*Вычислительный кластер БПЛА характеризуется быстрой изменяемостью, даже в процессе решения отдельной функциональной задачи, топологии полевой системы связи. При выполнении некоторых общих задач БПЛА, например, задач параллельной обработки потоков фото- и видеокадров, это приводит к необходимости оперативного перерасчёта плана организации процесса вычислений. В статье рассматривается адекватный, с точки зрения трудоёмкости расчётов, способ распределения вычислительных ресурсов кластера с изменяемой топологией на основе модели В.В.Леонтьева*

**Ключевые слова:** кластер, БПЛА, распределение ресурсов, параллельные вычисления, модель Леонтьева

### **Введение**

Вычислительные кластеры, как системы с массовым параллелизмом, предоставляют недорогое решение проблемы интеграции и распределения вычислительных ресурсов для решения прикладных задач в разнообразных сферах, в том числе - авиационной, в частности – для организации вычислений в системах управления БПЛА, когда интеграция ресурсов путем традиционных суперкомпьютерных систем является недопустимо дорогой и уязвимой. Кластер - это совокупность компьютеров, объединенных в рамках некоторой сети для решения одной задачи, что для пользователя представляется как единый ресурс, носителем которого является связанный набор полных компьютеров, то есть компьютерных систем, которые владеют всеми ресурсами, необходимыми для их полноценного функционирования, включая процессоры, память, подсистему ввода/вывода, а также операционные системы, приложения и т.п.

Полные компьютеры кластера относительно независимы, что допускает ос-

тановку или выключение любого из них для проведения профилактических работ или установки дополнительного оборудования без нарушения работоспособности всего кластера. Состав и мощность полных компьютеров может меняться, что дает возможность создавать гетерогенные кластерные системы.

Вычислительные кластеры для БПЛА являются слабосвязанными системами, основываются на использовании широкораспространённых и относительно дешёвых информационных и телекоммуникационных технологий, соответствующих программно-аппаратных средств.

Функциональная задача БПЛА считает вычислительный ресурс, который предоставляет кластер, прозрачным, а его распределение есть функция системы планирования (управления) вычислительного кластера.

Особенностью вычислительного кластера для решения функциональных задач БПЛА является быстрые изменения, иногда даже в процессе решения отдельной общей задачи, топологии телекомму-

никационной системы, что влечёт соответствующие вариации параметров, используемых для планирования (парал-

лельного) вычислительного процесса (рис. 1).

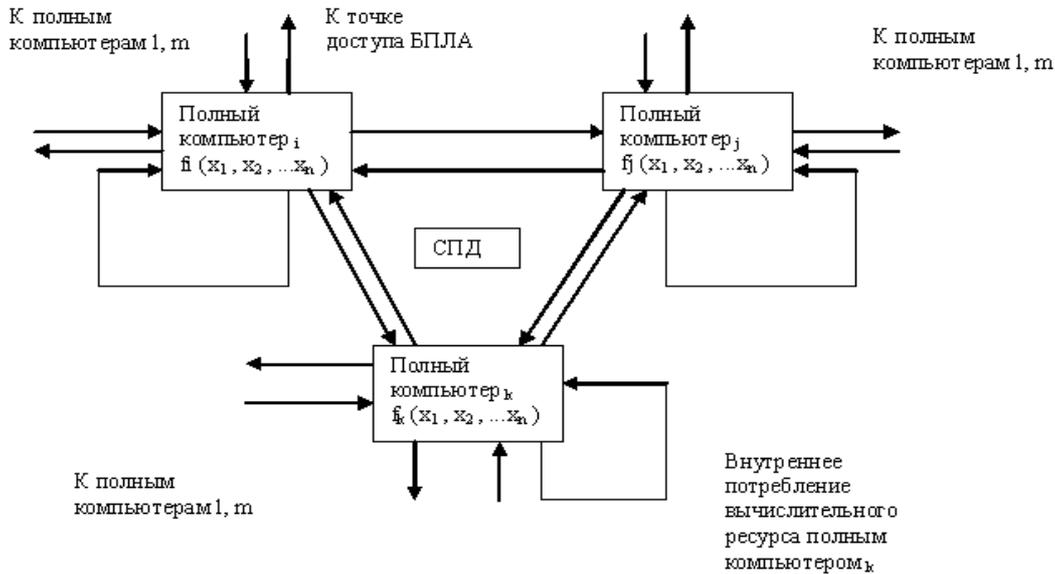


Рис. 1. Полносвязный кластер с пятью полными компьютерами

Вычислительный ресурс кластера для БПЛА определяется коммуникационной составляющей и производительностью самих полных компьютеров, которые, в свою очередь, характеризуются несколькими числовыми характеристиками.

Основными числовыми характеристиками коммуникационной составляющей кластера являются: время задержки сообщений (кадров), пропускная способность каналов, скорость передачи данных по каналам связи.

Основной числовой характеристикой производительности полного компьютера является интенсивность (технологического) процесса продуцирования вычислительного ресурса.

Главной проблемой, которая возникает при планировании (параллельного) решения прикладной задачи с использованием имеющегося единого вычислительного ресурса кластера, является распределение, с использованием телекоммуникационной системы, вычислительных ресурсов по полным компьютерам

кластера для обеспечения решения общей задачи.

Понятно, что вероятным результатом планирования будет и выявление невозможности решения прикладной задачи при существующих вычислительных мощностях.

При этом быстрая изменчивость, даже в процессе решения отдельной общей задачи, топологии полевой системы связи приводит к необходимости оперативного перенастраивания параметров моделей планирования процесса выполнения функциональных задач БПЛА, к которым относится и задача обработки потоков фото- видеокладов. Применение для этой цели трудоёмкого инструментария теории расписаний или моделей сетей Петри может уменьшить или даже свести на нет эффект от параллельной обработки данных от БПЛА[1,2].

Предложено рассмотреть адекватный, с точки зрения трудоёмкости расчётов, способ распределения вычислительных ресурсов кластера, основанный на классической модели В. Леонтьева [3].

### **Постановка задачи статического распределения вычислительного ресурса в кластерных системах**

Прикладная задача требует для своего решения  $n$  видов вычислительного ресурса, продуцируемого в  $n$  узлах кластера; при этом максимальный объем ресурса, который продуцируется в  $i$ -м узле (полном компьютере) для нужд решения произвольной прикладной задачи, известен и представлен матрицей  $V_{1..n}$ . Объем требуемого для решения текущей задачи ресурса представлен матрицей  $R_{1..n}$ . Каждый  $i | i = \overline{1, n}$  полный компьютер (ПК) порождает функцию  $f_i(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n)$ , которая связывает интенсивности продуцирования ресурсов в  $i \hat{E}_j | j = \overline{1, n}$  с объемом генерированного вычислительного ресурса в ПК; для всего кластера имеем  $F_{1..n}$ . Требуемую интенсивность (технологического) процесса продуцирования вычислительного ресурса обозначим через  $X = [x_i]_{1..n}$ , где  $x_i | i = \overline{1, n}$  - интенсивность (технологического) процесса продуцирования вычислительного ресурса в ПК (общий объем требуемого вычислительного ресурса  $i$ -го вида, продуцируемого за период решения задачи, равен  $E \cdot X^T$ . Здесь  $E$  - вспомогательная единичная матрица, введение которой также обусловлено необходимостью согласования размерностей величин вычислительного ресурса).

Необходимо определить план (или убедиться в отсутствии оно) распределения производительности (интенсивности технологического процесса продуцирования вычислительного ресурса)

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n) = f_{i1}(x_1) + f_{i2}(x_2) + \dots + f_{ij}(x_j) + \dots + f_{in}(x_n), i = \overline{1, n}$$

Здесь функция  $f_{ij}(x_j)$  представляет связь между узлами кластера по продуцированию вычислительного ресурса, который отображает интенсивность  $x_j$  на

ПК кластера для решения прикладной задачи. Для расчета такого плана (-ов) предлагаются следующие модели.

### **Модель А задачи статического распределения вычислительного ресурса в кластерных системах для БПЛА**

Допущения.

1) Каждый  $i \hat{E}_i | i = \overline{1, n}$  продуцирует только один, свойственный этому ПК, вычислительный ресурс.

2) Каждый тип вычислительного ресурса продуцируется только одним  $i \hat{E}_i | i = \overline{1, n}$  из ПК кластера.

3) Каждый  $i \hat{E}_i | i = \overline{1, n}$  имеет единую для кластера технологию преобразования вычислительного ресурса.

Модель распределения вычислительных ресурсов принимает вид:

$$E \cdot X^T - F^T - R^T = 0, \quad (1)$$

$$X \geq 0. \quad (2)$$

Имеем систему нелинейных уравнений, для решения которой при произвольных функциях  $f_i(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n)$  произвольного типа можно воспользоваться широким набором методов, в частности, - методами нелинейного программирования.

### **Модель Б задачи статического распределения вычислительного ресурса в кластерных системах для БПЛА**

Допущения:

(1-3) из модели А, а также

4) Функции  $f_i(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n)$  являются аддитивными относительно  $x_j | j = \overline{1, n}$ , то есть имеют вид

часть затрат вычислительного ресурса ПК, учитывая при этом затраты ресурса на передачу данных по каналу  $i - j$ .

Для всего кластера имеем  
 $B_{n \times n} = [f_{ij}(x_j)]_{n \times n}$ . Пусть  
 $L_{n \times 1} = (1, 1, \dots, 1)^T$ .

Модель распределения вычислительных ресурсов принимает вид:

$$E \cdot X^T - B \cdot L - R^T = 0, \quad (3)$$

$$X \geq 0. \quad (4)$$

Имеем систему нелинейных уравнений с аддитивными функциями; для анализа модели можно воспользоваться также численными методами или свести к задаче поиска потоков во взвешенных графах [4].

### **Модель В задачи статического распределения вычислительного ресурса в кластерных системах**

Допущения:

(1-4) из модели Б, а также

5)  $f_{ij}(x_j)$  является линейной по  $x_j$ :

$f_{ij}(x_j) = a_{ij} \cdot x_j$ , то есть  $f_{ij}(x_j)$  можно представить, используя матрицу (технологических) коэффициентов

$A_{n \times n} = [a_{ij}]$ , где  $a_{ij}$  – коэффициент затрат ресурса  $ПК_i$  при продуцировании ресурса в  $ПК_j$ . Линейная зависимость  $a_{ij} \cdot x_j$  между интенсивностью генерирования ресурсов  $\hat{I}E_j | j = \overline{1, n}$  кластера и объемом затрат вычислительных ресурсов  $\hat{I}E_i | i = \overline{1, n}$  кластера порождает соответствующую линейную модель. Коэффициент  $a_{ij}$  учитывает затраты  $i$ -го ресурса непосредственно на продуцирование единицы ресурса  $j$ , а также затраты, связанные с (теле)коммуникациями.

В матричном виде модель распределения принимает вид:

$$E \cdot X^T - A \cdot X^T - R^T = 0, \quad (5)$$

$$X \geq 0. \quad (6)$$

Модель (5-6) по своей структуре является классической моделью межотраслевого баланса В.В.Леонтьева, для исследования которой имеется широкий спектр

методов, алгоритмов и программных средств.

В случае блочного характера технологической матрицы  $A$ , что может быть, например, при распараллеливании выполнения процедуры масштабирования фотографий в *JPEG*, полученных от БПЛА, можно, для сокращения времени расчетов, свести задачу к задаче блочного программирования с использованием методов типа Данцига-Вулфа или Корнаи – Липтака.

### **Модель Г задачи статического распределения вычислительного ресурса в кластерных системах.**

Обозначим через  $X_E = [x^i]_{1 \times n}$  матрицу объемов вычислительных ресурсов, которым располагают полные компьютеры кластера ( $x^i$  – объем вычислительного ресурса, которым располагает  $\hat{I}E_i$ ;

$\sum x_i$  – суммарный вычислительный ресурс кластера);  $X_{rel} = [x^{ij}]_{n \times n}$  – матрицу объемов вычислительных ресурсов, которыми обмениваются полные компьютеры кластера ( $x^{ij}$  – объем вычислительного ресурса  $\hat{I}E_i$ , который потребляет  $\hat{I}E_j$  в рассматриваемом периоде планирования (такте));  $C_{cost} = [c^i]_{1 \times n}$  матрица ценностей единицы ресурса полного компьютера, определяемая взвешенной сверткой (метрикой) показателей, характеризующих  $ПК$  как производителя вычислительного ресурса, среди которых может быть величина жизненного цикла, интенсивность потока отказов, наработка на отказ, средние задержки в системе (теле)коммуникаций, надежность и живучесть каналов и пр.

Естественно, что в общем случае перечисленные показатели должны быть приведены к такту планирования.

Допущениями модели Г являются:

(1-3) из модели А, а также

4) объем вычислительного ресурса, предоставляемого  $\hat{I}E_i$  в  $\hat{I}E_j$  в ценностном измерении есть линейная по  $x^{ij}$  функция

вида:  $f^{ij}(x^{ij}, c^i) = c^i \cdot x^{ij}$ , то есть в рассмотрение вводится матрица  $X_{t \text{ cost}} = [c^i \cdot x^{ij}]_{n \times m}$ .

Для фиксированного  $i$  имеем уравнение баланса  $\sum_j x^{ij} \cdot c^i = \sum_j x^{ji} \cdot c^j$ , или в матричном виде  $X_{t \text{ cost}} \cdot J_V = X_{tel}^T \cdot C_{cost}^T$ , где  $J_V = [1]_{n \times 1}$ .

Заменой переменных можно перейти к потоковым алгоритмам [4].

Проведенные тестовые расчёты планов распределения вычислительных ресурсов кластера по моделям А-Г подтверждают низкие затраты времени на

$$A_{5 \times 5} = \begin{vmatrix} 0,1086 & 0,0076 & 0,0085 & 0,0017 & 0,0228 \\ 0,0131 & 0,1121 & 0,0130 & 0,0023 & 0,0362 \\ 0,0111 & 0,0103 & 0,1109 & 0,0019 & 0,0303 \\ 0,0028 & 0,0028 & 0,0029 & 0,1005 & 0,0078 \\ 0,0048 & 0,0046 & 0,0048 & 0,0012 & 0,1124 \end{vmatrix}$$

### Выводы

Быстрая изменяемость топологии исполнительной и телекоммуникационной системы кластера, предназначенного для решения распараллеливаемых задач БПЛА, вызывает необходимость синтеза «быстрых» моделей планирования, то есть моделей, допускающих оперативный расчёт эффективного плана распределения вычислительных ресурсов.

Для этих условий адекватным способом распределения ресурсов вычислительного

кластера оказывается применение стандартных алгоритмов математического программирования с использованием моделей планирования, синтезированных на основе модели В.Леонтьева.

### Список литературы

1. Аничкин А.С., Семенов В.А. Современные модели и методы теории расписаний // Труды Института системного программирования РАН. – 2014. – Том 26, вып.3. – С.5-40.
2. Мараховский В.Б., Розенблюм Л.Я., Яковлев А.В. Моделирование параллельных процессов. Сети Петри. Курс для системных архи-

планирование относительно задач планирования на основе моделей теории расписаний [1].

Исследование модели В численными средствами [5] для вычислительного кластера на рисунке (см. выше) с матрицей технологических коэффициентов и необходимым для решения общей задачи, сгенерированной в БПЛА, суммарным вычислительным ресурсом  $113,615 \cdot 10^9$  оп/с, потребовал 36 итераций (точность  $1,0 \cdot 10^{-5}$ ) для получения плана  $X_1 = 23,890 \cdot 10^9$ ,  $X_2 = 23,399 \cdot 10^9$ ,  $X_3 = 24,240 \cdot 10^9$ ,  $X_4 = 4,727 \cdot 10^9$ ,  $X_5 = 60,504 \cdot 10^9$ .

текторов, программистов, системных аналитиков, проектировщиков сложных систем управления. – СПб: Профессиональная литература, АйТи-Подготовка, 2014. – 400 с.

3. Леонтьев В.В. Межотраслевая экономика. — М., 1997. — 315 с.

4. Zhukov I.A., Pechurin N.K., Kondratova L.P., Pechurin S.N. The algorithms

coordinating traffic in computer network // Проблеми інформатизації та управління: зб. наук. праць. – 2015. – Вип.4 (52). — С.31—36.

5. Дьяконов В. П. MATLAB R2006/2007/ 2008 + Simulink 5/6/7. Основы применения. — Изд-е 2-е, перераб. и доп. Библиотека профессионала. — М.: «СОЛОН-Пресс», 2008. — 800 с.

Статью представлено в редакцию 25.09.2016