

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПРИМЕНЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.Б. Клименко

*Институт информационных наук и технологий безопасности Российского государственного
гуманитарного университета*
Россия, 117534, Москва, Кировоградская ул., 25, корпус 2,
E-mail: anna_klimenko@mail.ru

Ключевые слова: киберфизические системы, распределенные системы, распределение нагрузки, планирование вычислений.

Аннотация: Концепции туманных и краевых вычислений в настоящее время применяются при построении распределенных киберфизических систем с целью уменьшения нагрузки на сетевую инфраструктуру, а также с целью уменьшения времени обработки данных. При этом, как правило, исследуется процесс распределения нагрузки на узлы туманного слоя при фиксированной трудоемкости вычислительных задач. В данном исследовании рассмотрен вопрос влияния объема предварительной обработки данных на краевых устройствах с отправкой результатов в узел-сборщик данных, что формализовано в виде дополнительного параметра – типа задачи, который определяет зависимость объемов пересылаемых данных от трудоемкости. В качестве примера для формирования дискретных типов задач использованы данные о скорости компрессии данных и эффективности для архиватора gzip. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о влиянии выбора типа алгоритма обработки данных на критерии энергоэффективности распределенной системы.

1. Введение

В настоящее время распределенные киберфизические системы стали интенсивно развивающейся областью науки и техники («умные» объекты, такие как город, дом), системы дистанционного медицинского мониторинга, системы контроля географически распределенных технических объектов в газовой и нефтяной промышленности и т.д. [1-3].

При этом существует тенденция использования в рамках реализации киберфизических систем концепций Интернета Вещей, краевых и туманных вычислений, что предполагает предварительную обработку данных в пределах краевых устройств (использование «умных» датчиков) либо на устройствах туманного слоя [4, 5].

При этом актуальны вопросы энергопотребления, оптимизации использования коммуникационной среды, продления сроков использования устройств (в том случае, если предполагается длительное их использование), снижения времени обработки получаемых данных или снижения запаздывания при решении комплексов вычислительных задач, включая вопросы группового управления сетями, включающего централизованное – или наоборот, полностью децентрализованное управление.

В рамках данного исследования рассматривается вопрос влияния использования алгоритмов компрессии данных на энергопотребление и объемы передаваемых по сети данных, с учетом того, что последнее также оказывает влияние на энергопотребление и генерирует накладные расходы при передаче данных по транзитным участкам сети в виде дополнительной нагрузки. Такая постановка задачи близка к задаче разбиения программ на фрагменты с целью их оптимального распределения по имеющимся ресурсам, однако в данной работе мы исходим из предположения, что имеется возможность достижения цели вычислительной задачи путем применения различных алгоритмов, программные реализации которых и возможность их распределения по узлам уже определены.

Целью данного исследования является формализация задачи распределения вычислительной нагрузки в условиях вариативности реализаций предварительной обработки данных и экспериментальное исследование эффекта обработки данных на краевых устройствах с точки зрения расхода ресурсов сети.

2. Общая постановка задачи

Формализуем задачу следующим образом. Имеются следующие исходные данные и ограничения:

- Множество графов задач, реализующих одну пользовательскую задачу с возможностью выбора для решения: $G = \{G_s\}$, где $G_s = \{<g_i, r_i>, R\}$, где g_i – вычислительная сложность задачи, r_i – требования к ресурсам устройства, на котором будет происходить размещение, включая: требования к объему памяти, требования к пропускной способности канала, к производительности и т.д. G_s – ациклический и направленный, где ребра R взвешены объемом передаваемых данных между задачами.
- Граф узлов, за которыми необходимо закрепить задачи, представляется произвольным направленным графом, где вершины взвешены характеристиками узлов сети (производительность, объем памяти, энергопотребление и т.д. в зависимости от необходимой детализации), ребра взвешены скоростями передачи данных по каналам связи: $G_2 = \{M, C\}$, $M = \{m_{ij}\}$ – ресурсы, которыми располагает узел, $C = \{c_{ij}\}$ – каналы связи.
- Имеются общие критерии оценивания качества распределения задач $S_0 = \{s_k\}$.
- Гетерогенность сети и специфика используемых устройств продуцирует индивидуальные критерии качества распределения, специфичные отдельным узлам, и составляет множество: $P_0 = \{p_{ij}\}$.
- Имеется множество ограничений на распределение нагрузки $constr = \{constr_k\}$.
- Имеется закрепление ряда задач за узлами, в виде матрицы A .
- Остатки ресурсов транзитных узлов определяется как: $\forall i, k, L m_{i_ост} = m_i - \sum_{k=1}^L r_k$, где L – количество задач, для которых узел i включен в маршрут передачи данных, r_k – ресурс, потребляемый передачей данных k -й задачей.

Необходимо: для G и G_2 найти такие варианты G_k , учитывая частичное закрепление A , чтобы при имеющихся ограничениях: $r_i \leq m_j$, $constr$, $r_i \leq m_j$ обеспечить $S_0 \rightarrow \max, P_0 \rightarrow \max, m_{i_ост} \rightarrow \max, \forall i \in \{Ro_\alpha\}$, где $\{Ro_\alpha\}$ – множество маршрутов.

3. Результаты моделирования

Для оценивания эффекта, который вычисления на краю сети оказывают на критерии, использовались данные о степени сжатия данных и скорости работы

архиватора gzip. На основании анализа соотношения скорости/степени компрессии (см. рис.1,2) были сформированы типы задач, соответствующие различным степеням предобработки данных. Примерный объем передаваемых данных для экспериментальных расчетов равен 4 Гб.



Рис. 1. Соотношение скорости компрессии и объема данных для передачи.

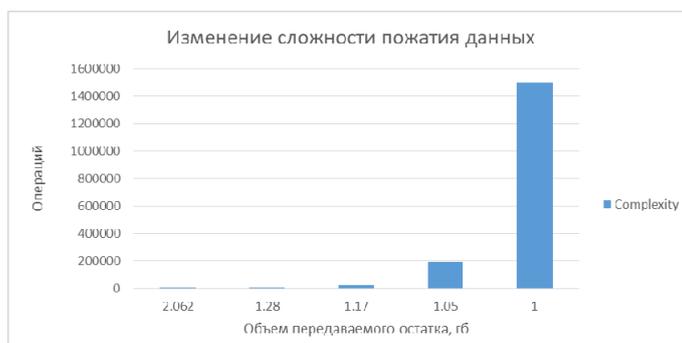


Рис. 2. Соотношение трудоемкости компрессии и объемов данных для передачи.

Также определена топология сети и структура задачи. Предполагая, что имеется устройство, собирающее данные, предварительно обработанные, структура задачи имеет вид «звезда». Также для моделирования были сформированы следующие типы задач:

- 1) Трудоемкость $4 \cdot 10^9$, объем передачи – 4 Гб;
- 2) $7,67 \cdot 10^{12}$ трудоемкость, передача – 2,062 Гб;
- 3) $42 \cdot 10^{12}$ трудоемкость, передача – 1,28 Гб;
- 4) $94 \cdot 10^{12}$ трудоемкость, передача – 1,17 Гбайт;
- 5) $750 \cdot 10^{12}$ трудоемкость, передача – 1,05 Гб.

Таблица 1 – Результаты моделирования.

Тип задачи	Время, с	Энергопотребление-1, МВт	Энергопотребление-2, МВт	Использование сетевой инфраструктуры (объем данных), Гб
0	$15 \cdot 10^3$	$8,9 \cdot 10^3$	$341 \cdot 10^3$	94208
1	$233 \cdot 10^4$	$1,28 \cdot 10^6$	$58 \cdot 10^6$	48564

2	$12 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^6$	$318 \cdot 10^3$	30146
3	$28 \cdot 10^6$	$15,6 \cdot 10^6$	$712 \cdot 10^6$	27555
4	$227 \cdot 10^6$	$125 \cdot 10^6$	$5681 \cdot 10^6$	24729

Топология сети представлена на рис. 3.

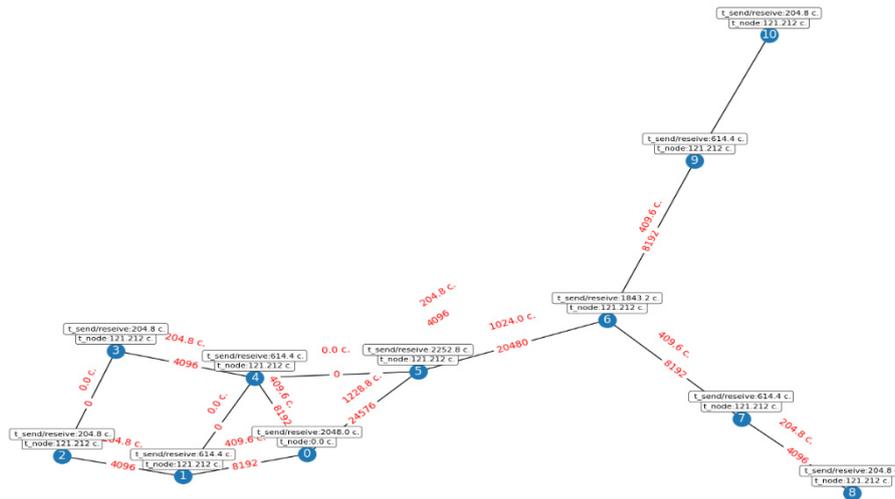


Рис. 3. Топология сети.

В условиях существенного роста нагрузки на вычислительные узлы и в условиях снижения нагрузки на сеть, получены следующие результаты (рис. 4).

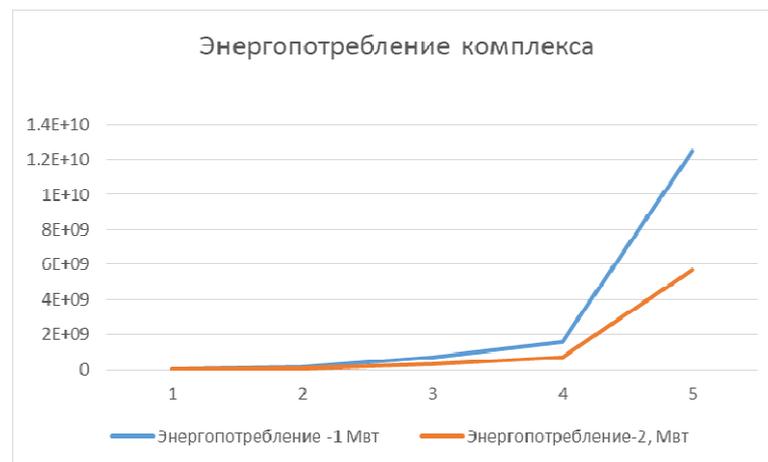


Рис. 4. Изменение энергопотребления системы.

По результатам моделирования видно, что при включении предварительной обработки данных энергопотребление системы возрастает, равно как растет время за счет увеличения количества операций, необходимых для обработки данных, и сокращение объемов передаваемых данных не оказывает существенного влияния в смысле уменьшения энергопотребления за счет возрастания загруженности вычислителей. При этом при максимальной степени обработки (компрессии) данных

наблюдается сокращение объемов данных передаваемых по сети (до 73%), а процентный прирост суммарного энергопотребления в случае, когда энергопотребление датчиков выше энергопотребления вычислителей, меньше на 16% для заданных условий моделирования.

По результатам можно сделать вывод о том, что применение предварительной обработки данных согласно концепции туманных вычислений имеет позитивный эффект на объемы циркулирующих по сети данных, при этом, однако, возрастает энергопотребление системы за счет увеличения сложности обработки данных, а также время такой обработки.

Следует отметить, что здесь рассмотрен частный случай реализации концепции туманных вычислений.

4. Заключение

По итогам проведенного исследования можно сделать выводы о том, что:

- выбор алгоритма обработки данных играет значительную роль в эффективности распределенных киберфизических систем;
- для наихудших вариантов увеличения трудоемкости задач при обработке данных имеется возможность нивелировать ухудшение по критерию энергоотребления за счет выбора вычислительных устройств и сетевых с заявленным энергопотреблением одного порядка (по результатам моделирования);
- достигается значительное сокращение использования сетевых ресурсов, однако при этом не происходит уменьшения времени передачи данных (при выбранных характеристиках модели) за счет экспоненциального роста сложности обработки данных на устройствах.

Список литературы

1. Jelinek T., et al. International Collaboration: Mainstreaming Artificial Intelligence and Cyberphysical Systems for Carbon Neutrality // *IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems*. doi: 10.1109/TICPS.2024.3351624.
2. Sirjani M., Lee E.A., Khamespanah E. Verification of Cyberphysical Systems // *Mathematics*. 2020. Vol. 8, No. 7. P. 1068. <https://doi.org/10.3390/math8071068>.
3. Pappagallo A, Massini A, Tronci E. Monte Carlo Based Statistical Model Checking of Cyber-Physical Systems: A Review // *Information*. 2020. Vol. 11, No. 12. P. 588. <https://doi.org/10.3390/info11120588>.
4. Tian Liang, Zhong, Xiaorou. A Case Study of Edge Computing Implementations: Multi-access Edge Computing, Fog Computing and Cloudlet // *Journal of Computing and Information Technology*. 2023. Vol. 30. P. 139-159. 10.20532/cit.2022.1005646.
5. Rodríguez-Azar P.I., Mejía-Muñoz J.M., Cruz-Mejía O., Torres-Escobar R., López L.V.R. Fog Computing for Control of Cyber-Physical Systems in Industry Using BCI // *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 1. P. 149. <https://doi.org/10.3390/s24010149>.