Вишневський Дмитро Сергійович, Магістр спеціальності 122 “Комп’ютерні науки” Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль

Науковий керівник: Осолінський Олександр Романович, доцент кафедри інформаційно-обчислювальних систем і управління, Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ПЛАНУВАННЯ ДЛЯ ПРИСТРОЇВ IOT В УМОВАХ ТЕПЛОВИХ ОБМЕЖЕНЬ

Оскільки щільність потужності мікросхем інтегральних схем продовжує зростати, мінімізація енергії та зниження температури є двома найбільш важливими питаннями при проектуванні модулів ІоТ. Хоча мінімізація енергії тісно пов'язана зі зниженням температури, найбільш енергоефективний метод може бути не найефективнішим для виконання температурних обмежень і навпаки. У даній роботі представлено вирішення проблеми розподілу періодичних важких задач реального часу для потужних ІоТ пристроїв, щоб максимізувати загальну енергоефективність в умовах пікових температурних обмежень. На відміну від традиційного підходу балансування навантаження, тобто рівномірного розподілу робочого навантаження на мікросхему, пропонується стратегія термобалансування, тобто мінімізації теплового градієнту між активними ядрами, щоб підвищити загальну енергоефективність системи, особливо при жорстких температурних обмеженнях.

Для вирішення даного завдання спочатку потрібно визначити нижню межу енергоспоживання за, а потім перетворити задачу розбиття на задачу пакування контейнерів змінного розміру. Пропонована модель або підхід теплового балансування може значно покращити енергоефективність для ІоТ модулів які працюють на максимальній межі продуктивності.

ВСТУП

Стрімке зростання обчислювальних потреб та експоненціальне зростання енергоспоживання мікросхем ставить перед розробниками обчислювальних систем завдання мінімізації енергоспоживання та тепловідведення в екстремальних умовах роботи. Оптимізація енергоспоживання є однією з першочергових цілей через економічний і екологічний тиски. З іншого боку, задля збільшення циклів місій з обмеженим терміном служби/розміром батареї, мінімізація енергії відіграє важливу роль у розробці мобільних систем, таких як мобільні телефони або пристроїв, ІоТ.

На температуру матриці сучасного багатоядерного процесора який входить в склад, наприклад, мікрокомп’ютерів для кінцевих модулів ІоТ сильно впливають технологічні вузли, які швидко масштабуються, що призводить до потенційної високої щільності живлення та виникнення гарячих точок. Високі температури негативно впливають на надійність системи, збільшуючи споживання енергії витоку, і навіть можуть безповоротно вивести з ладу апаратне забезпечення.

Сучасні процесори які випускаються для різних потреб, оснащені датчиками температури під час роботи, щоб запобігти перегріванню обладнання. Якщо температура чіпа перевищує попередньо визначені температурні пороги, то спрацьовує схема автоматичного вимкнення, що негативно впливає на продуктивність системи та спричиняє порушення роботи. Тому планування з урахуванням теплових обмежень стає критично важливою технікою для згладжування теплового градієнта і контролю пікової температури процесора при проектуванні.

У цій статті пропонується підвищення енергоефективності при плануванні набору важких періодичних задач реального часу на багатоядерній платформі при заданих обмеженнях на пікову температуру. Мінімізація енергоспоживання вже давно є проблемою яка інтенсивно вивчається та потребує різноманітних та новаторських рішень,. Через квадратичну залежність між динамічною потужністю та швидкістю процесора добре відомий принцип використання постійної швидкості процесора та максимального зниження швидкості процесора для зменшення енергоспоживання [1,2]. Це робить балансування робочого навантаження хорошим евристичним підходом для мінімізації енергоспоживання

Хоча споживання енергії та температура тісно пов'язані між собою, як показано в [3], мінімізація споживання енергії та зниження температури не обов'язково завжди синхронізовані між собою. Існуючі методи енергозбереження, наприклад, [4, 5, 6], незважаючи на їх широке застосування, можуть бути не найефективнішими для досягнення найвищої енергоефективності в умовах теплових обмежень. Тому є проблема вибору найбільш енергоефективного режиму при заданих температурних обмеженнях для ІоТ модулів.

Таким чином, для максимізації енергоефективності при температурних обмеженнях потрібно вирішити наступні завдання:

1. Потрібно визначити та встановити теоретичну верхню межу енергоефективності,

2. Перетворити задачу розбиття багатоядерної задачі на задачу пакування контейнерів.

ОГЛЯД ВІДОМИХ РІШЕНЬ

Попередні проаналізовані роботи були зосереджені на динамічному енергозбереженні, яке можна мінімізувати, використовуючи найнижчу постійну швидкість виконання як на одноядерних [7], так і на багатоядерних архітектурах [8].

Тому була розроблена ідея «критичної швидкості» [9, 10], щоб збалансувати динамічне зменшення потужності та приріст енергії витоку для мінімізації загального споживання енергії.

Більшість розробників і дослідників не дотримуються однакових принципів оптимізації енергоспоживання. Наприклад, такі моменти спостерігаються в роботі [11] запропоновано стратегію відображення завдань для періодичних наборів і доведено, що в найгіршому випадку за допомогою пошуку розподілу завдань кожній обчислювальній одиниці можна доручити більше завдань з меншими витратами енергії. Пагані та ін. [12] запропонували мінімізацію енергії для набору періодичних завдань, використовуючи найнижчу напругу/частоту.

Автори в роботі [13] оптимізували пропускну здатність системи та енергоефективність, враховуючи варіації технологічного процесу та характеристики потужності/продуктивності додатків при максимально допустимих обмеженнях на потужність. Однак мало з підходів враховують температурні обмеження.

Існує декілька підходів до енергетичної оптимізації з температурними обмеженнями. Наприклад, беручи до уваги обмеження на пікову температуру, У роботі [14] запропоновано підхід, який по суті є метаевристичним алгоритмом пошуку, для мінімізації споживання енергії.

Авторами в роботі [15] запропонували розбиття задач як задачу про ранець для мінімізації енергії в умовах теплових обмежень. Їхній алгоритм складався з двох етапів: перший етап – мінімізація динамічного енергоспоживання між ядрами шляхом розподілу завдань між ядрами таким чином, щоб загальне динамічне енергоспоживання було мінімальним, а другий етап розподіляв можливе просідання між завданнями на кожному ядрі таким чином, щоб мінімізувати пікову температуру.

Автори роботи [16] оптимізували енергоефективність з урахуванням пам’яті в умовах енергетичних і теплових обмежень, що дозволяє краще вирішувати «пам’яттєвомісткі» завдання

МОДЕЛЬ СИСТЕМИ/ЗАДАЧІ

Якщо розглядати багатоядерну платформу *Npl* з *N* ядрами, то

*Npl* = {corei : *i* = 1, --- , N}, (1)

Кожне ядро може незалежно встановлювати різні швидкості або режими роботи, які характеризуються відповідною напругою живлення v та робочою частотою *f*. Оскільки *v ∝ f*. Для зручності викладу використовується нормалізоване *v* для позначення швидкості обробки *vmin ≤ v ≤ vmax*.

Застосовуючи методи динамічного керування живленням (DPM), ядра, що простоюють (позначені через *Ndark*) і не мають завдань, можуть бути вимкнені, щоб уникнути витоків енергії [2,13]. Інші активні ядра з завданнями належать до *Nactive*,

*Nactive = N\ Ndark,* (2)

Тоді можна вважати, що періодичне завдання складається з M завдань,

*Tsk= {τk : k = 1, --- , M},* (3)

Кожна задача є однопоточною і визначається параметром інтервалу між надходженнями (періоду) та найгіршим часом виконання (WCET) при максимальній швидкості, тобто

*τk = {Періодk,WCETk},* (4)

Можна припустити, що всі завдання надходять на початку періоду, а дедлайн кожного завдання дорівнює його періоду, тобто можна припустити, що обчислювальні ядра здатні забезпечити достатню кількість ресурсів, включаючи необхідну швидкість, пам'ять, кеш і пропускну здатність для виконання завдань. Для декількох завдань, які виконуються на одному ядрі, можна застосувати політику витіснення Earliest Deadline First (EDF) [17], яка завжди призначає найвищий пріоритет завданням з найближчим поточним дедлайном, а витіснення EDF може досягти 100-відсоткового використання кожного активного ядра.

ВИСНОВКИ

Оскільки індустрія 4.0 вступила в еру багатоядерних і багатопроцесорних систем, енергоефективність стає більш важливим критерієм при розробці кінцевих пристроїв ІоТ та систем реального часу. У даній статті представлено нову техніку для планування розкладу задач реального часу з максимальною енергоефективністю при заданих обмеженнях на пікову температуру. Результати показують, що підхід теплового балансування призводить до значного покращення енергоефективності та доцільності розбиття задач, особливо коли задане температурне обмеження є жорстким або використання системи є високим.

Література

1. F. Yao, A. Demers, S. Shenkerю A scheduling model for reduced CPU energy. *in: Proceedings of IEEE 36th Annual Foundations of Computer Science*, 1995, pp. 374–382, doi:10.1109/SFCS.1995.492493.
2. D. Li, J. Wu. Minimizing energy consumption for frame-based tasks on heterogeneous multiprocessor platforms. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 26 (3) (2015) 810–823, doi:10.1109/TPDS.2014.2313338.
3. Fan, M., Rong, R., Liu, S. et al. Energy calculation for periodic multi-core scheduling in system thermal steady state with consideration of leakage and temperature dependency. *J Supercomput* 71, 2565–2584 (2015). URL: https://doi.org/10.1007/s11227-015-1405-0
4. Benedikt, Ondřej, et al. Thermal-aware scheduling for MPSOC in the avionics domain: Tooling and initial results. *2021 IEEE 27th International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications* (RTCSA). IEEE, 2021
5. Nath, Shubha Brata, et al. A survey of fog computing and communication: current researches and future directions. URL: arXiv preprint arXiv:1804.04365 (2018)
6. Li C. et al. Edge-oriented computing paradigms: A survey on architecture design and system management. *ACM Computing Surveys* (CSUR). – 2018. – Т. 51. – №. 2. – С. 1-34.
7. Chen, Yen-Kuang, and Ishmael F. Santos. Apparatus and method for reducing power consumption on simultaneous multi-threading systems. U.S. Patent No. 7,653,906. 26 Jan. 2010.
8. Deng, Zexi, et al. Energy-aware task scheduling on heterogeneous computing systems with time constraint*. IEEE Access*, 2020, 8: 23936-23950.
9. Almalki F. A. et al. Green IoT for eco-friendly and sustainable smart cities: future directions and opportunities. *Mobile Networks and Applications*. – 2021. – P. 1-25.
10. Zahaf H. E. et al. Energy-efficient scheduling for moldable real-time tasks on heterogeneous computing platforms. *Journal of Systems Architecture*. – 2017. – 74. – P. 46-60.
11. Hassan H. A., Salem S. A., Saad E. M. Energy aware scheduling for real-time multi-core systems. *International Journal of Computer Science Engineering* IJCSE. – 2018. – 7. – №. 4. – P. 167-175.
12. Saifullah A. et al. CPU energy-aware parallel real-time scheduling. *Leibniz international proceedings in informatics*. – 2020.
13. Zhang, Huazhe, and Henry Hoffmann. PoDD: Power-capping dependent distributed applications. *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*. 2019.
14. Liu, Haoran, Jiaqi Yu, and Ruzhu Wang. Model predictive control of portable electronic devices under skin temperature constraints. *Energy* 260 (2022): 125185.
15. Rupanetti D., Salamy H. Thermal and energy-aware utilisation management on MPSoC architectures. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*. – 2021. – 36. – №. 5. – P. 449-469.
16. Hajkazemi, Mohammad Hossein, Mohammad Khavari Tavana, and Houman Homayoun. Wide I/O or LPDDR? Exploration and analysis of performance, power and temperature trade-offs of emerging DRAM technologies in embedded MPSoCs. *2015 33rd IEEE International Conference on Computer Design* (ICCD). IEEE, 2015.
17. Javed, Farhana, et al. Internet of Things (IoT) operating systems support, networking technologies, applications, and challenges: A comparative review. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 20.3 (2018): P.2062-2100.