

УДК 621.391

Дорош А.С.¹, Грушко С.С.²

¹ асп. кафедри КСМ, НУ «Запорізька політехніка»

² доц. НУ «Запорізька політехніка»

КОДУВАННЯ ДАНИХ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ З ПІДВИЩЕНОЮ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ

Сучасний етап розвитку телекомунікаційних систем характеризується стрімким зростанням обсягів даних, що передаються, та кількості підключених пристроїв. В умовах обмежених енергетичних ресурсів особливої актуальності набуває розробка енергоефективних методів кодування інформації. Ця проблема є особливо критичною для бездротових сенсорних мереж (WSN) та пристроїв Інтернету речей (IoT), де тривалість автономної роботи пристроїв безпосередньо залежить від ефективності використання енергії при передачі даних.

Аналіз останніх досліджень у галузі енергоефективного кодування демонструє значний прогрес у розробці нових методів та підходів. Особливої уваги заслуговує метод Sparse Transition Encoding, який забезпечує зниження енергоспоживання на 30% за рахунок мінімізації кількості переходів у блоці даних. Принцип роботи цього методу полягає у використанні спеціальних кодових послідовностей, що дозволяють зменшити кількість змін стану в лініях передачі даних. Практичні дослідження підтвердили особливу ефективність цього підходу в системах з високою частотою передачі даних, де зниження динамічного енергоспоживання відіграє ключову роль.

Значним кроком уперед у розвитку енергоефективних технологій стала розробка системи EEDDS для радіочастотних бездротових сенсорних мереж. Ця технологія використовує спеціалізовані кодові таблиці для оптимізації енергії, що витрачається на передачу кожного біта інформації. Унікальність EEDDS полягає в її здатності адаптивно налаштовувати параметри передачі залежно від умов функціонування мережі. Система враховує такі фактори як

відстань між вузлами, рівень завад у каналі зв'язку, поточний заряд батареї пристрою та пріоритетність даних, що передаються.

Особливої уваги заслуговує система RBNSiZeComm, яка реалізує інноваційний принцип "мовчазних символів". Ця технологія забезпечує вражаючу економію енергії – до 62.5% під час передачі даних. В основі роботи системи лежить комплексний підхід до аналізу статистичних характеристик потоку даних та формування оптимальних кодових послідовностей. Система постійно адаптується до змін у характері трафіку, що дозволяє підтримувати максимальну енергоефективність у різних умовах роботи.

Значний прорив у підвищенні енергоефективності систем кодування пов'язаний з використанням FPGA-платформ. Практичні дослідження показали, що реалізація методів кодування на FPGA забезпечує зниження енергоспоживання до 48% порівняно з традиційними процесорними архітектурами. При цьому досягається суттєве підвищення продуктивності обробки даних – у 15-21 раз залежно від специфіки застосування.

Ключовою перевагою FPGA є можливість глибокої оптимізації алгоритмів для енергоефективного обчислення. Архітектура FPGA дозволяє створювати спеціалізовані обчислювальні блоки, оптимізовані під конкретні алгоритми кодування. Важливим аспектом є також ефективне використання вбудованих блоків пам'яті, що дозволяє мінімізувати затримки доступу до даних та знизити енергоспоживання при передачі інформації між функціональними блоками.

Експериментальні дослідження продемонстрували, що впровадження адаптивного тимчасового кодування на FPGA забезпечує підвищення енергоефективності системи на 7-15% залежно від характеристик трафіку. Особливо вражаючі результати отримано при використанні методів компресійного кодування для IoT-пристроїв, де досягнуто економії до 85% енергії при обробці тимчасово корельованих даних.

Для оцінки ефективності розроблених методів кодування запропоновано математичну модель, яка враховує основні параметри системи:

$$E = \eta(P) \times C(D) \times F(f,v), \quad (1)$$

де E – загальна енергоефективність системи; $\eta(P)$ – коефіцієнт корисної дії передавача; $C(D)$ – коефіцієнт стиснення даних; $F(f,v)$ – функція оптимізації частоти та напруги FPGA.

При цьому функціонування системи має відповідати умовам забезпечення якості передачі даних:

$$BER \leq BER_{max}, \quad (2)$$

$$T_{\text{пер}} \leq T_{\text{доп}}, \quad (3)$$

де BER – коефіцієнт бітових помилок; BER_{max} – максимально допустимий коефіцієнт помилок; $T_{\text{пер}}$ – затримка передачі; $T_{\text{доп}}$ – допустима затримка.

Проведені дослідження переконливо демонструють, що використання сучасних методів енергоефективного кодування даних дозволяє досягти значного зниження енергоспоживання телекомунікаційних систем при збереженні високої якості передачі інформації. Особливо перспективним є напрямок реалізації методів кодування на FPGA-платформах, що забезпечує додаткову оптимізацію енергоспоживання за рахунок апаратного прискорення алгоритмів обробки даних та гнучкого налаштування параметрів системи.

Подальші дослідження доцільно зосередити на розробці адаптивних алгоритмів, які дозволять оптимізувати параметри системи в реальному часі залежно від умов роботи та вимог до якості передачі даних. Важливим напрямком є також дослідження можливостей комбінування різних методів кодування та оптимізації на FPGA для досягнення максимальної енергоефективності при збереженні необхідних показників якості передачі даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Song M., Wang Y., Li X., et al. Energy-efficient data transmission using sparse transition encoding in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Communications*. 2015. Vol. 63, № 8. С. 2671-2683.
2. Zhu Y., Wang J., Chen H., et al. EEDDS: An energy-efficient data transmission system for wireless sensor networks. *Wireless Networks*. 2018. Vol. 24, № 2. С. 451-464.
3. Nikolov M., Haas Z. J. Energy-efficient encoding for sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2018. Vol. 26, № 2. С. 756-769.
4. Behnam A., Stothard P., Baker C., et al. Adaptive temporal encoding for low-power cache designs. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems*. 2017. Vol. 25, № 9. С. 2593-2606.
5. Sinha R., Kumar A., Patil V., et al. RBNSiZeComm: A novel encoding scheme for low-power WSN applications. *IEEE Sensors Journal*. 2018. Vol. 18, № 12. С. 5087-5095.
6. Stojkoska B., Nikolovski K. Data compression for energy efficient IoT solutions. *IEEE Internet of Things Journal*. 2017. Vol. 4, № 2. С. 447-464. Zhang C., Li P., Sun G., et al. Energy-efficient CNN implementation on a deeply pipelined FPGA cluster. *Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED '16)*. New York : ACM, 2016. С. 326-331.
7. Hosseinabady M., Nunez-Yanez J. L. Dynamic energy management of FPGA accelerators in embedded systems. *IEEE Transactions on Very Large Scale*

Integration Systems. 2018. Vol. 26, № 8. C. 1625-1638. Matai J., Kim D., Prasanna V. K. Energy-efficient canonical Huffman encoding. Proceedings of the IEEE International Conference on Application-specific Systems, Architectures and Processors. Zurich, Switzerland, 2014. C. 202-209.

8. Ghosh S., Prakash A., Das S., et al. Energy-efficient pipeline architectures using embedded memory blocks in FPGAs. Proceedings of the International Conference on Field-Programmable Technology. Shanghai, China, 2014. C. 204-211.