УДК 004.75

В.В. Яцків
Тернопільський національний економічний університет,
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

МЕТОД МЕРЕЖЕВОГО КОДУВАННЯ ДАНИХ У СИСТЕМІ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ

© Яцків В.В., 2013

Запропоновано та досліджено метод мережевого кодування у системі залишкових класів для використання у безпровідних сенсорних мережах. Розроблений метод кодування забезпечує підвищення загальної пропускної здатності мережі за рахунок вибору взаємно простих модулів різної розрядності та передавання залишків різними маршрутами.

Ключові слова: мережеве кодування, система залишкових класів.

The article presents and investigates the method of network encoding in the residue number system for usage in wireless sensor networks. The method of encoding provides increase of total network bandwidth by choosing coprime digit capacity different modules and different routes of transmission residues.

Key words: network encoding, residue number system.

Вступ

Останні досягнення в області вбудованих та безпровідних комунікаційних систем є основою для створення безпровідних сенсорних мереж (БСМ), що складаються з недорогих, малопотужних та багатофункціональних сенсорних вузлів, невеликих за розміром і здатних передавати повідомлення на відстань 30–100 м [1]. Основним завданням БСМ є збір даних з розподілених на значній території сенсорів фізичних параметрів. БСМ ефективно використовують у системах екологічного, технічного та медичного моніторингу. Однак останнім часом все частіше як джерела інформації в БСМ виступають аудіо- та відеосенсори, що ставить підвищені вимоги до характеристик цих мереж.

Отже, серед невирішених сьогодні проблем БСМ є збільшення тривалості роботи мережі від автономного джерела живлення, підвищення загальної пропускної здатності каналів зв'язку та надійності передавання даних.

1. Аналіз останніх публікацій

Найенергозатратнішою операцією в БСМ є передача даних, яка становить більше 70 % [1]. Зменшення енергозатрат на передачу даних можна досягти за рахунок оброблення даних у безпровідному вузлі (агрегування даних, стиснення даних). Використання методів стиснення даних у вузлах БСМ дає змогу значно скоротити обсяги даних, які необхідно передавати, і тим самим підвищити тривалість роботи мережі.

У [2] показано, що використання пакетів з полем даних максимальної довжини приводить до значного зменшення кількості службових даних і відповідно до підвищення загальної пропускної здатності каналів зв'язку БСМ.

Для підвищення загальної пропускної спроможності каналів зв'язку БСМ використовують методи багатошляхової маршрутизації та мережевого кодування.

Методи мережевого кодування почали активно розвиватися з робіт Ahlswede R. та Fragouli C. [3, 4]. Основною проблемою мережевого кодування є вибір методу комбінування пакетів. Сьогодні мережеве кодування розвивається у двох теоретичних напрямках: лінійного кодування та на основі китайської теореми про залишки [5–7].

Розроблені методи лінійного мережевого кодування призводять до значного збільшення службових даних у пакеті протоколу і відповідно не можуть бути використані в БСМ, які характеризуються малими розмірами пакетів і мають обмежену пропускну спроможність каналів зв'язку [5].

На відміну від методів лінійного мережевого кодування, мережеве кодування на основі китайської теореми про залишки дає змогу зменшити обчислювальні витрати на кодування даних та обсяги службових даних в протоколах передавання даних [5–7].

У [7] показано переваги мережевого кодування в системі залишкових класів під час передачі даних «один до багатьох». У [5] запропоновано використовувати множину взаємно простих модулів для кодування та передавання повідомлень на основі китайської теореми про залишки на прикладі багатоадресної передачі для топології мережі «метелик». Однак ця схема є надлишковою для БСМ, оскільки відбувається дублювання залишків по різних маршрутах, що призводить до зменшення корисної пропускної здатності мережі та збільшення енергозатрат. В БСМ безпровідні вузли переважно передають виміряні дані на базову станцію, тобто використовується принцип передавання «багато до одного».

Мета роботи – розробити метод мережевого кодування даних на основі системи залишкових класів для підвищення загальної пропускної зданості каналів зв'язку безпровідних сенсорних мереж.

2. Мережеве кодування на основі системи залишкових класів

Розглянемо приклад мережевого кодування на основі топології мережі показаної на рис. 1. Нехай потрібно передати повідомлення X1 і X2 вузлу S.

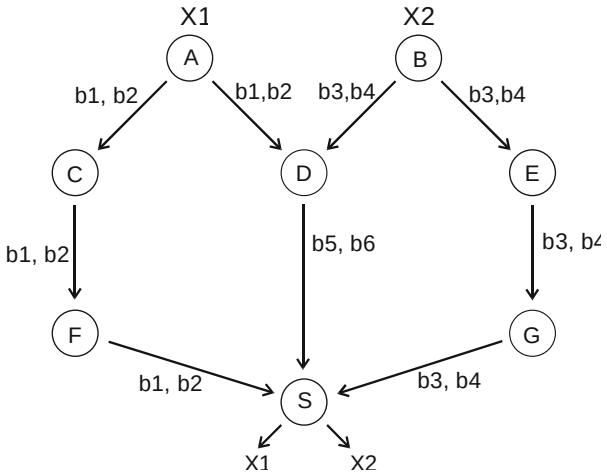

Рис. 1. Передавання залишків за мережевого кодування: схема 1

Вибираємо взаємопрості модулі $p1$, $p2$, $p3$, $p4$. У вузлі A розділяємо повідомлення $X1$ на модулі $p1$, $p2$: отримаємо $b1 = X1 (\mathrm{mod}\, p1)$, $b2 = X1 (\mathrm{mod}\, p2)$. У вузлі B розділяємо повідомлення $X2$ на модулі $p3$, $p4$: $b3 = X2 (\mathrm{mod}\, p3)$, $b4 = X2 (\mathrm{mod}\, p4)$. Отримані залишки передаємо відповідними маршрутами (рис. 1).

У проміжному вузлі D відбувається об'єднання залишків $b1, b2, b3, b4$ за формулою:

$$X = \sum_{i}^{n} B_i \cdot b_i (\mathrm{mod}\, R), \qquad (1)$$

де $R = \prod_{i=1}^{n} p_i$, n – кількість модулів; B_i – базисні числа; $B_i = \delta_i \cdot m_i$, $\delta_i = \frac{R}{p_i}$, $\delta_i \cdot m_i \equiv 1 (\mathrm{mod}\, p_i)$; m_i – коефіцієнт, який знаходиться у межах $0 < m_i < p_i$, і формування нових залишків по модулях $p2$, $p3$:

$$b5 = X (\mathrm{mod}\, p2);$$
$$b6 = X (\mathrm{mod}\, p3)$$

або

$$b5 = X (\mathrm{mod}\, p5),$$

де $p5 = p2 \cdot p3$.

Для передачі повідомлень $X1$, $X2$ у мережі (рис. 1) необхідно передати сім пакетів даних (рис. 2).

Пакет даних складається із залишків та значень взаємопростих модулів і має такий вигляд:

$$\{b_1, b_2, \ldots b_i \ldots b_n \mid p_i, p_{i+1}\}.$$

У вузлі S відбувається об'єднання залишків за формулою (1) та обчислення значень $X1 = X (\mathrm{mod}\, p1 \cdot p2)$ і $X2 = X (\mathrm{mod}\, p3 \cdot p4)$.

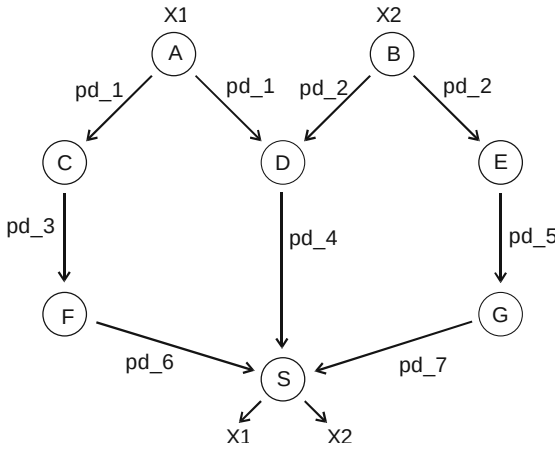

Рис. 2. Розподіл пакетів за мережевого кодування для схеми 1

Ця схема кодування має переваги за багатоадресної передачі, однак є надлишковою для наведеної топології, тобто за передачі «багато до одного».

Автор запропонував новий метод мережевого кодування, за якого отримані залишки $b1$, $b2$ у вузлі A передаються різними маршрутами. Наприклад, залишок $b1$ передається маршрутом $A \to C$, а $b2$ – маршрутом $A \to D$. Аналогічно розподіл залишків відбувається у вузлі B (рис. 3).

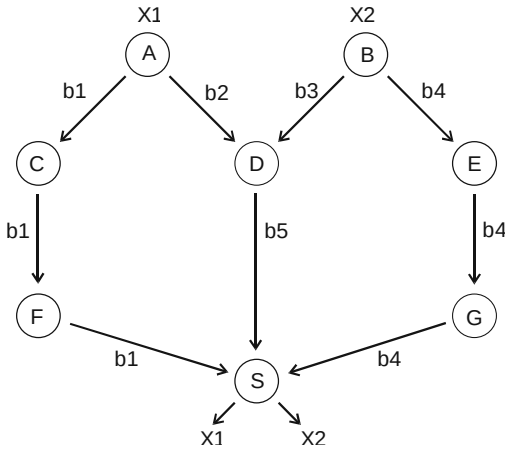

Рис. 3. Передавання залишків за мережевого кодування: схема 2

За запропонованого розподілу залишків для передачі повідомлень $X1$, $X2$ у вузол S необхідно передати дев'ять пакетів (рис. 4).

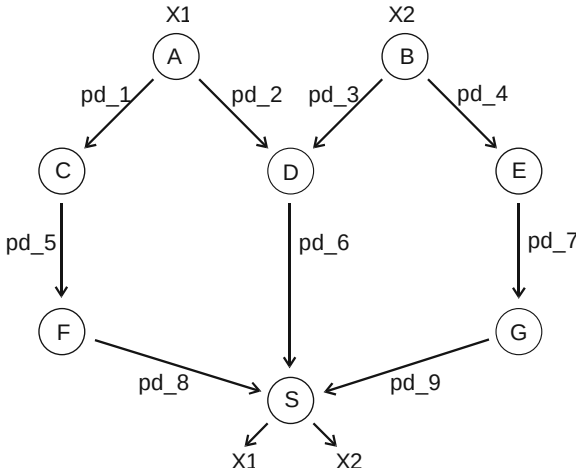

Рис. 4. Розподіл пакетів за мережевого кодування для схеми 2: pd_i – номер пакета даних

Незважаючи на те, що запропонований метод потребує передачі більшої кількості пакетів, загальний обсяг даних, які необхідно передати, є меншим через передавання залишків різними маршрутами. Ще однією перевагою запропонованого методу є можливість рівномірного розподілу навантаження у мережі. Для цього взаємно прості модулі вибираємо так, щоб по незалежному (окремому) маршруту (A-C-F-S) та (B-E-G-S) (рис. 3) передавались залишки більшого обсягу, а по спільному маршруту (D-S) – залишки меншого обсягу.

Зменшити кількість пакетів, аналогічно до схеми на рис. 2, можна за рахунок передавання першим вузлом одночасно залишків по двох модулях (рис. 5), а на проміжних вузлах ретранслювати тільки оригінальні залишки (які не передавались по інших маршрутах).

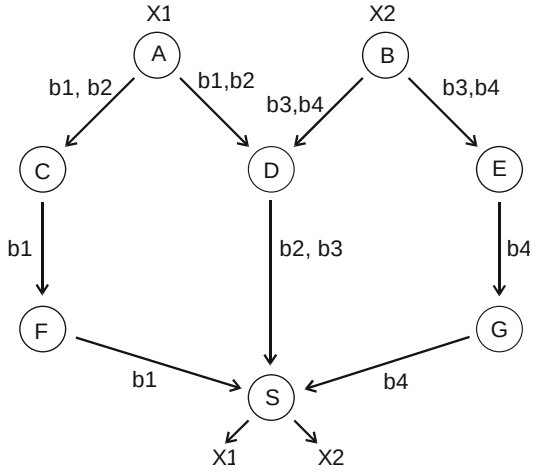

Рис. 5. Передавання залишків за мережевого кодування: схема 3

Приклад. Розглянемо приклад кодування повідомлень завдовжки 8 біт, тобто $X \in [0\ldots255]$. Для передачі залишків виберемо схему, показану на рис. 5. Вибираємо взаємно прості модулі: $\mathrm{p1}=27$, $\mathrm{p2}=11$, $\mathrm{p3}=13$, $\mathrm{p4}=23$. Обчислюємо діапазон представлення $\mathrm{R}=27\cdot11\cdot13\cdot23=88803$. Нехай $X1=225$, $X1=125$ відповідно залишки по вибраних модулях рівні: $\mathrm{b1}=225(\mathrm{mod}\,27)=9$, $\mathrm{b2}=225(\mathrm{mod}11)=5$, $\mathrm{b3}=125(\mathrm{mod}13)=8$, $\mathrm{b4}=125(\mathrm{mod}\,23)=10$.

У вузлі S відбувається об'єднання залишків за формулою (1) (рис. 6). Для цього знаходимо базисні числа: $\mathrm{B1}=52624$, $\mathrm{B2}=80730$, $\mathrm{B3}=75141$, $\mathrm{B4}=57915$ а $\mathrm{X}_S=15075$.

Відповідно: $X1 = 15075 (\mathrm{mod}\ 23 \cdot 13) = 225$,

$X2 = 15075 (\mathrm{mod} 11 \cdot 27) = 125$.

3. Розрахунок обсягу даних

Враховуючи значні затрати енергії на передачу даних в БСМ, важливою є оцінка обсягу даних, які необхідно передавати під час використання різних схем мережевого кодування та ретрансляції пакетів. Оцінку обсягу даних, які необхідно передавати за фіксованої розрядності повідомлення, проведемо для вищерозглянутих схем мережевого кодування. Нехай джерело інформації генерує повідомлення розрядністю 32 біт.

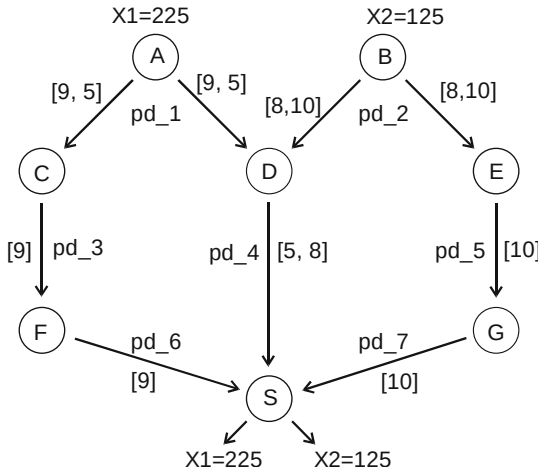

Рис. 6. Приклад мережевого кодування з розподілом залишків для схеми 3

Отже, обсяг даних, які необхідно передати з урахуванням ретрансляції пакетів, дорівнює:

– для схеми 1 (рис. 2):

$$V1 = k \cdot h \cdot \lceil \log_2 p_i \cdot p_{i+1} \rceil,$$

де k – кількість повідомлень; h – кількість пакетів, необхідних для передачі повідомлень з вузлів A, B до вузла S;

– для схеми 2 (рис. 4):

$$V2 = k \cdot h \cdot \lceil \log_2 p_i \rceil;$$

– для схеми 3 (рис. 6):

$$V3 = k \cdot \left((h-3) \cdot \lceil \log_2 p_i \rceil + (h-4) \cdot \lceil \log_2 p_i \cdot p_{i+1} \rceil \right).$$

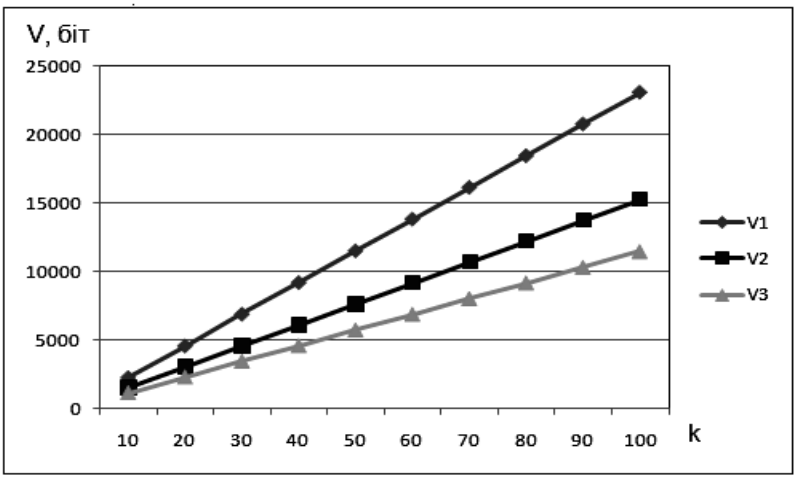

Рис. 7. Залежність обсягу даних від кількості повідомлень за різних схем кодування:
V1 – схема рис. 2; V2 – схема рис. 4; V3 – схема рис. 5

Як бачимо з рис. 7, запропонована схема мережевого кодування (рис. 6) для передачі повідомлень вузлами A, B на станцію S потребує передавання, з врахуванням ретрансляції пакетів на 50 % меншого обсягу даних порівняно зі схемою на рис. 2, і на 25 % меншого обсягу даних порівняно зі схемою на рис. 4.

4. Оцінка загальної пропускної спроможності мережі

Розглянемо безпровідну сенсорну мережу із $t = 50$ вузлів. Швидкість передавання даних за стандартом IEEE 802.15.4 дорівнює 250 кбіт/с. Нехай джерело інформації формує цілі числа X, де $\lceil \log_2 X_{\max} \rceil = 32$ біт, $\lceil \bullet \rceil$ – заокруглення до більшого цілого. Для кожного вузла мережі виберемо два взаємно прості модулі з умови $X_{\max} < p_i \cdot p_j$. Модулі для одного вузла мережі виберемо різної розрядності: $\lceil \log_2 p_i \rceil = 22$ біт і $\lceil \log_2 p_{i+1} \rceil = 11$ біт. Необхідна кількість модулів становить $n = 2 \cdot t$. Наприклад, набір взаємно простих модулів для двох вузлів мережі має вигляд [2106421, 2039], [2029, 2116799], для перших 10 вузлів мережі (таблиця).

Набір взаємно простих модулів для 10 вузлів мережі

№ вузла	$p1$	$p2$	$\log_2 p1 * p2$
1	2106421	2039	32,000008
2	2116799	2029	32,000006
3	2118889	2027	32,000010
4	2129389	2017	32,000003
5	2135743	2011	32,000004
6	2144269	2003	32,000001
7	2148583	1999	32,000020
8	2150713	1997	32,000002
9	2155057	1993	32,000021
10	2161553	1987	32,000013

Загальну пропускну спроможність мережі розрахуємо для схем мережевого кодування (1)–(3), показаних на рис. 1, 3 і 5.

Час передавання повідомлень для схеми кодування 1 (рис. 1) дорівнює

$$T_1 = t_{11} + t_{12} + t_{13} + t_{14} + t_{15}, \quad (2)$$

де $t_{11} = \dfrac{\lceil \log_2 b1 \rceil + \lceil \log_2 b2 \rceil}{C}$ – час передавання повідомлень вузлом A: (A → C, A → D); t_{12} – час передавання повідомлень вузлом B: (B → D, B → E), $t_{12} = t_{11}$; t_{13} – час передавання повідомлень вузлом C: (C → F), вузлом D: (D→S), вузлом E: (E→G); t_{14} – час передавання повідомлень вузлом F: (F → S); t_{15} – час передавання повідомлень вузлом G: (G → S).

Враховуючи, що довжина повідомлень однакова, час передавання повідомлень дорівнюватиме

$$T_1 = 5 \cdot t_{11}.$$

Час розраховано з врахуванням паралельної передачі пакетів між вузлами C → F, D → S, E → G.

Час передавання повідомлень для схеми кодування на рис. 3 дорівнює

$$T_2 = t_{21} + t_{22} + t_{23} + t_{24} + t_{25}, \quad (3)$$

де $t_{21} = \dfrac{\lceil \log_2 b1 \rceil}{C}$ – час передавання повідомлень вузлом A: (A → C) і вузлом B (B →D); $t_{22} = \dfrac{\lceil \log_2 b2 \rceil}{C}$ – час передавання повідомлень вузлом A: (A → D) і вузлом B (B → E);

$t_{23} = \dfrac{\lceil \log_2 b2 \rceil + \lceil \log_2 b3 \rceil}{C}$ – час передавання повідомлень вузлом C: (C → F), D(D→S), E(E→G); t_{24} – час передавання повідомлень вузлом F: (F → S), $t_{24} = t_{21}$; t_{25} – час передавання повідомлень вузлом G: (G → S), $t_{24} = t_{22}$.

Враховуючи, що пакети між вузлами C → F, D → S, E → G передаються паралельно, приймаємо за t_{23} час передавання пакетів (C → F, D→S, E → G). Для цієї схеми кодування вибираємо час передавання більшого за розмірами пакета по маршруту (D → S).

Час передавання повідомлень для схеми на рис. 5 дорівнює

$$T_3 = t_{31} + t_{32} + t_{33} + t_{34} + t_{35}, \tag{4}$$

де $t_{31} = \dfrac{\lceil \log_2 b1 \rceil + \lceil \log_2 b2 \rceil}{C}$ – час передавання повідомлень вузлом A: (A → C, A → D); t_{32} – час передавання повідомлень вузлом B: (B → D, B → E); $t_{33} = \dfrac{\lceil \log_2 b2 \rceil + \lceil \log_2 b3 \rceil}{C}$ – час передавання повідомлень вузлом C: (C → F), вузлом D: (D→S), вузлом E: (E → G); $t_{34} = \dfrac{\lceil \log_2 b1 \rceil}{C}$ – час передавання повідомлень вузлом F: (F → S); $t_{35} = \dfrac{\lceil \log_2 b4 \rceil}{C}$ – час передавання повідомлень вузлом G: (G → S).

Оскільки пакети між вузлами C → F, D → S, E → G передаються паралельно, приймаємо за t_{33} час передавання пакетів по маршруту (D→S).

Загальна пропускна спроможність мережі з урахуванням тільки часу передачі повідомлень між вузлами для розглянутих схем кодування дорівнює

$$C = \frac{V}{T} \text{ (біт/с)},$$

де V – обсяг повідомлення; T – загальний час передавання повідомлень за мережевого кодування і паралельної передачі повідомлень між вузлами.

На основі проведеного розрахунку часу передавання повідомлень формули (2)–(4) побудовано залежності загальної пропускної здатності мережі від розміру повідомлення 8 – 64 біт (рис. 8).

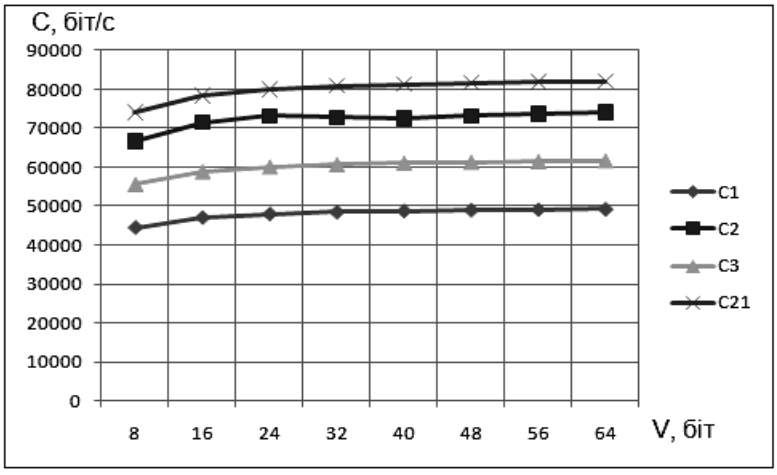

Рис. 8. Залежність загальної пропускної спроможності мережі від розміру повідомлень для різних схем мережевого кодування:
C1 – для схеми кодування, показаної на рис. 1;
C2 – для схеми кодування, показаної на рис. 3;
C3 – для схеми кодування, показаної на рис. 5;
C21 – для схеми кодування, показаної на рис. 3 за вибору модулів різної розрядності

Як бачимо з рис. 8, найвищу пропускну спроможність мережі (С21) забезпечує схема, в якій залишки передаються по окремих маршрутах, при цьому взаємно прості модулі вибрані різної розрядності, тому розрядність залишків, які передаються спільним маршрутом, приблизно дорівнює розрядності залишків по окремих маршрутах.

Висновок

Розроблений метод мережевого кодування на основі системи залишкових класів забезпечує зменшення обсягу даних на 50 %, з урахуванням ретрансляції пакетів, які необхідні для відновлення повідомлень. Запропонований спосіб вибору взаємно простих модулів, за якого модулі вибираються різної розрядності, тому розрядність залишків, які передаються спільним маршрутом приблизно дорівнює розрядності залишків на окремих маршрутах. Цей метод мережевого кодування підвищує загальну пропускну спроможність мережі приблизно на 60 %.

1. Perrig A. et al. SPINS: Security protocols for sensor networks // Wireless networks. – 2002. – T. 8, №. 5. – P. 521–534. 2. Yatskiv V. Nonlinear data coding in wireless sensor networks / Vasyl Yatskiv, Su Jun, Nataliya Yatskiv, Anatoly Sachenko // International Journal of Computing. – 2011. – Vol. 10, Issue 4. – P. 383–390. 3. Ahlswede R., Cai N., Li S.-Y.R., and Yeung R.W. Network information flow, IEEE Transactions on Information Theory. – Vol. 46, № 4. – P. 1204–1216, July 2000. 4. Fragouli C., Le Boudec J. Y., Widmer J. Network coding: an instant primer //ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 2006. – T. 36, №. 1. – C. 63–68. 5. Zhang Zhifang. Network Coding Based on Chinese Remainder Theorem. arXiv preprint arXiv:1208.3966, 2012. 6. Campobello G., Leonardi A., Palazzo S. Energy Saving and Reliability in Wireless Sensor Networks Using a CRT-based Packet Splitting Algorithm // University of Messina, Italy. – 2010. 7. Yatskiv V. The network coding based on residue number system in wireless sensor networks /Vasyl Yatskiv, Su Jun // Proceedings of International Conference on Information Technology and Management Engineering ITME2011, September 23–25, 2011. – Wuhan, China. – P.27–30.