

УДК 004.94:004.7

Вікт.В. ГНАТУШЕНКО, І.С.ДМИТРИЄВА

Національна металургійна академія України

ІМОВІРНІСНИЙ АНАЛІЗ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ У БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

Проведено імовірнісний аналіз часу життя бездротової сенсорної мережі і її вузлів. В якості основного параметра тривалості життя використовується кількість спожитої енергії. Розроблено модель для аналізу розподілу споживання енергії в БСМ і отримані розподіли часу життя вузла і всієї мережі. Показано, що при достатньо великому періоді розгляду системи, споживання енергії сходиться до нормального розподілу, що значно спрощує обчислення при виконанні аналізу. Пропонується імовірнісний підхід споживання енергії та аналізу часу існування бездротової сенсорної мережі. Розроблена модель підтверджена стендовими експериментами і моделюванням. Результати показують, що розроблена модель точно відображає розподіл споживання енергії і фіксує випадковий характер бездротових сенсорних мереж. Скорочення робочого циклу знижує споживання енергії, збільшення або зменшення швидкості трафіку на 0.05 пакет/хв призводить до зменшення ймовірності досягнення поставленого терміну служби всієї мережі. Запропонована методика забезпечує результати для середнього споживання енергії з похибкою менш 3.5%.

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, ймовірність, аналіз, енергоспоживання.

Вікт.В. ГНАТУШЕНКО, И.С.ДМИТРИЕВА

Национальная металлургическая академия Украины

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Представлен вероятностный анализ времени жизни беспроводной сенсорной сети и ее узлов. В качестве основного параметра продолжительности жизни используется количество потребленной энергии. Разработана модель для анализа распределения потребления энергии в БСС и получены распределения времени жизни узла и всей сети. Показано, что при достаточно большом периоде рассмотрения системы, потребление энергии сходится к нормальному распределению, что значительно снижает стоимость вычислений при выполнении анализа. Предлагается вероятностный подход потребления энергии и анализа времени существования беспроводной сенсорной сети. Разработанная модель подтверждена стендовыми экспериментами и моделированием. Результаты показывают, что разработанная модель точно отображает распределение потребления энергии и фиксирует случайность беспроводных сенсорных сетей. Сокращение рабочего цикла снижает потребление энергии, увеличение или уменьшение скорости трафика на 0.05 пакет/мин, приводит к уменьшению вероятности достижения поставленного срока службы всей сети. Предложенная методика обеспечивает результаты для среднего потребления энергии с погрешностью менее 3.5%.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, вероятность, анализ, энергопотребление.

VIKT.V.HNATUSHENKO, I. DMYTRIEVA

National Metallurgical Academy of Ukraine

PROBABILISTIC ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

A probabilistic analysis of the lifetime of a wireless sensor network and its nodes is presented. As the main parameter of life expectancy, the amount of energy consumed is used. A model for analyzing the distribution of energy consumption in the WSN was developed and the distribution of the lifetime of the node and the network. It is shown that for a sufficiently long period of system consideration, the energy consumption converges to the normal distribution, which significantly reduces the cost of calculations in the analysis. A probabilistic approach of energy consumption and analysis of the lifetime of a wireless sensor network is proposed. The developed model is confirmed by bench experiments and simulations. The results show that the model developed accurately reflects the distribution of energy consumption and fixes the randomness of wireless sensor networks. Reducing the operating cycle reduces power consumption, increasing or decreasing the traffic speed by 0.05 package / min leads to a decrease in the probability of reaching the set lifetime of the entire network. The proposed methodology provides results for the average energy consumption with an error of less than 3.5%.

Keywords: wireless sensor network, probability, analysis, power

Постановка проблеми

У більшості додатків бездротових сенсорних мереж (БСМ) вузли розраховані на живлення від батареї, заміна якої, як правило, є незручною або недоцільною. Коли енергія виснажується, вузли стають неактивними, втрачають свої сенсорні, комунікаційні і функціональні можливості. Енергія - це самий дефіцитний ресурс, що визначає тривалість роботи мережі. Деякі сфери застосування БСМ (особливо оборона і безпека) вимагають повного покриття площі об'єкта зонами моніторингу датчиків. Іноді потрібно багаторазове перекриття площі об'єкта датчиками з забезпеченням заданого ступеня зв'язності вузлів та надійності збору даних моніторингу. Для цього перед розгортанням БСМ здійснюється планування місць

розташування вузлів. Але існують області застосування БСМ, в яких детерміноване розгортання вузлів недоцільно (або неможливо) через великі часові або економічні витрати на розміщення (в разі бойових дій, у важкодоступних районах і т.п.). У таких випадках для оперативного розгортання мережі може використовуватися розсіювання вузлів над районом моніторингу з використанням літальних апаратів. При цьому через випадкове розміщення вузлів максимально покрити сенсорами район моніторингу можливо тільки з використанням досить великого числа вузлів. Велика кількість вузлів дозволить забезпечити необхідне покриття, але призведе до зростання числа колізій при передачі через збільшення рівня взаємних перешкод, затримок передачі даних, дублювання інформації моніторингу та зайвих витрат ресурсів батарей на повторні передачі.

Існуючі дослідження аналізу часу життя розглядають споживання енергії як основний напрямок забезпечення максимального терміну функціонування мережі. Однак через випадкову природу бездротового середовища, в критично важливих додатках, де потрібна надійна мережа, недостатньо знання тільки середнього споживання енергії і середнього часу життя. Замість середнього споживання енергії і часу життя, необхідно досліджувати їх імовірнісні розподіли. При цьому розподіл споживання енергії і часу життя представляє ймовірність того, що енергія, яка споживається в будь-який даний період, нижче, ніж задане значення, і ймовірність того, що термін служби більше, ніж заданий період. Це дозволяє знайти компроміс між бажаним часом життям і ймовірністю досягнення цього часу.

Через те, що бездротові мережі можуть розгортатися у віддалених і важкодоступних середовищах, алгоритмічне забезпечення процесів передачі даних та використання енергії мають першорядне значення, вони повинні забезпечувати максимальний час функціонування вузлів, надійність і відмовостійкість, автоматичне конфігурування.

Аналіз останніх досліджень

Більшість існуючих робіт з дослідження споживання енергії в БСС та аналізу тривалості життя зосереджено на оцінці середніх мір: оцінюється середня ефективність використання енергії для конкретних протоколів [1, 2], запропоновані аналітичні моделі споживання енергії [3, 5]. Споживання енергії в мережі аналізується для операцій з низьким споживанням потужності, і втрати при колізіях не беруться до уваги. Представлена модель аналізу і знаходження кращого рішення обміну даними і енергією в мережі при однокрокових передачах і багатокрокових передачах на короткі відстані [4, 6]. Та ж сама проблема досліджена в [7], однак моделі енергії зосереджені на апаратному рівні. Ці моделі забезпечують високу оцінку середнього споживання енергії для певних протоколів, не пропонуючи статистики вищого порядку і не розглядаючи інші протоколи маршрутизації. В [8] представлена аналітична модель для оцінки споживання енергії і часу життя кластера БСС. Тривалість життя вимірюється з точки зору збору даних, в якому середня кількість енергії визначається для кожного вузла. В [9] час життя аналізується для всієї мережі одночасно, і проблема управління енергією є більш складною. В [10] запропоновано модель управління циклами додатків в БСС. Для заданої швидкості надходження подій, модель отримує середній термін служби вузла. На жаль, досліджені тільки статистика часу життя першого порядку. В [11] представлений імовірнісний аналіз часу життя мережі на основі керованих подій і використовуваних додатків для заданої топології мережі. Розподіл часу життя вузла моделюється для кластера на основі топології мережі, використовуючи протокол TDMA MAC (time division multiple access - TDMA, media access control - MAC). Однак даний метод не показаний для інших мережевих топологій, таких як сітчасті і однорангові мережі, інших протоколів.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою роботи є вибір ефективного режиму роботи елементів БСМ за допомогою імовірнісного підходу до оптимізації часу існування бездротової сенсорної мережі за розрахунку впливу енерговитрат при передачі, обробці та зчитуванні даних в вузлах при поширенні трафіку, а також проведення імітаційного моделювання, що забезпечує отримання оптимального рішення.

Основна частина

Надійність бездротових сенсорних мереж визначається багатьма факторами, найбільш суттєвими з яких є: надійність апаратного і програмного забезпечення вузлів, область розгортання мережі, взаємне розташування вузлів, період регламентного обслуговування мережі, інтенсивність збору і передачі інформації кінцевими вузлами, розмір переданих пакетів інформації.

Великий клас додатків бездротових сенсорних мереж (БСМ) покладається на детерміноване розгортання вузлів датчиків, наприклад, топологія «сітка». Це окремий випадок, де ефект випадковості через топологію не спостерігається, тому споживання енергії протягом даного періоду часу виражається

$$f_{E(x,T)}(e) = f_{Es(x,T)}(e) * f_{Ecp(x,T)}(e). \quad (1)$$

Розподіл споживання енергії для виявлення $f_{Es(x,T)}(e)$ сумується з розподілом споживання енергії для зв'язку і обробки $f_{Ecp(x,T)}(e)$.

Під час будь-якого інтервалу T , який починається в t_0 , тобто період $[t_0, t_0+T)$, для деякого датчика k з

періодичним інтервалом зчитування $T_{s,k}$ і споживанням енергії під час виявлення $e_{s,k}$, позначимо перше активне зчитування для датчика k після t_0 через t_{k1} . Кількість активних зчитувань під час T дорівнює $n_k(T) = \lfloor (t_0 + T - t_{k1}) / T_{s,k} \rfloor$. Так як t_0 не залежить від дій зчитування, то $(t_{k1} - t_0)$ рівномірно розподілено в діапазоні $[0, T_{s,k})$. Тому, функція розподілу ймовірностей (ФРЙ) $n_k(T)$ визначається наступним чином:

$$f_{n_k(T)}(n) = \begin{cases} N_{s,k} - n + 1, & n = \lfloor N_{s,k} \rfloor + 1, \\ n + 1 - N_{s,k}, & n = \lfloor N_{s,k} \rfloor, \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{де } N_{s,k} = \frac{T}{T_{s,k}}.$$

Функція розподілу ймовірностей споживання енергії для всіх K датчиків під час T визначається як

$$\begin{aligned} f_{E_s(T)}(e) &= \sum_{k=1}^K \sum_n n \cdot \delta(e - f_{n_k(T)}(n)) = \\ &= \sum_{k=1}^K \left[\left(N_{s,k} - \lfloor N_{s,k} \rfloor \right) \cdot \delta(e - (\lfloor N_{s,k} \rfloor + 1) e_{s,k}) + \right. \\ &\quad \left. + (\lfloor N_{s,k} \rfloor + 1 - N_{s,k}) \cdot \delta(e - \lfloor N_{s,k} \rfloor e_{s,k}) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Розроблено модель для аналізу споживання енергії при комунікації і обробці $E_{cp}(T)$. Енергія, що витрачається при комунікації і обробці даних в кожному вузлі мережі, моделюється в дискретному часі системи масового обслуговування в одиницю часу T_u , яка характеризує його розподіл між надходженнями трафіку і процесом обслуговування.

Споживання енергії представлено дискретно-часовим ланцюгом Маркова (ДЧЛМ) $\{X_n\}$, якій розділено на рівні зв'язку, де M – довжина черги. Кожен із станів являє собою подію, яка відбувається у вузлі в плінні часу T_u , такі як очікування (сон), передача або прослуховування. Наприклад, операції робочого циклу, як правило, представлені у вигляді ланцюжків сну і активних станів $\{I_n\}$ і кількість станів кожного типу залежить від робочого циклу ξ .

Кожне стан v також пов'язан з кількістю енергії e_v , яке споживається при відповідних події під час T_u . Поведінка при комунікації і обробки даних кожного вузла представлені переходами між станами в $\{X_n\}$. Грунтуючись на ДЧЛМ, ФРЙ споживання енергії одиничного вузла при комунікації і обробки даних $E_{cp}(T)$ знаходиться для будь-якої даної тривалості T .

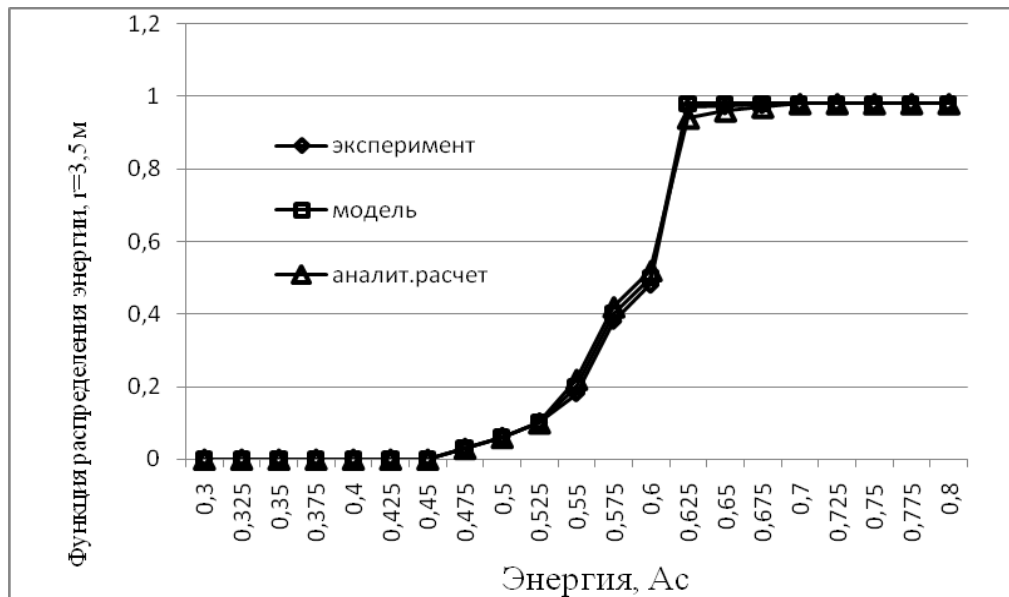
Проведені перевірка адекватності моделі розподілу енергії одиничного вузла та аналіз розподілу споживання енергії при детермінованому розгортанні з відстанями до стоку 2,6 м і 3,5 м протягом $T = 60$ с для двох вузлів. Результати розподілу споживання енергії для кожного з двох вузлів показані на рисунку 1. Похибка аналітичного розрахунку становить менше 5% в порівнянні з вимірами для кожного вузла. Це спостерігається при різкому збільшенні енергії до рівня 0,6 А·с при $r=3,5$ м. Існує висока ймовірність того, що вузол споживає саме 0,6 В, що відповідає випадку, коли вузли виконують свої звичайні операції робочого циклу. Моделювання проведено для 100 різних топологій. Модель каналу така, що передача пакетів завжди успішна, якщо відстань відправник-одержувач знаходиться в межах певного діапазону, незалежно від помилок в каналі або колізій. Діапазон обрано таким чином, щоб на цій відстані середнє відношення сигнал/шум не перевищувало порогове, яке використовується в протоколі.

Отримані результати свідчать про те, що результати моделювання в порівнянні з проведеними експериментами по частоті появи помилок не перевищують 5%. Таким чином, в подальших дослідженнях використовується імітаційне моделювання для перевірки адекватності запропонованих моделей оцінки продуктивності бездротових сенсорних мереж випадкового розгортання великих масштабів, на основі часу життя одиничного вузла і всієї мережі.

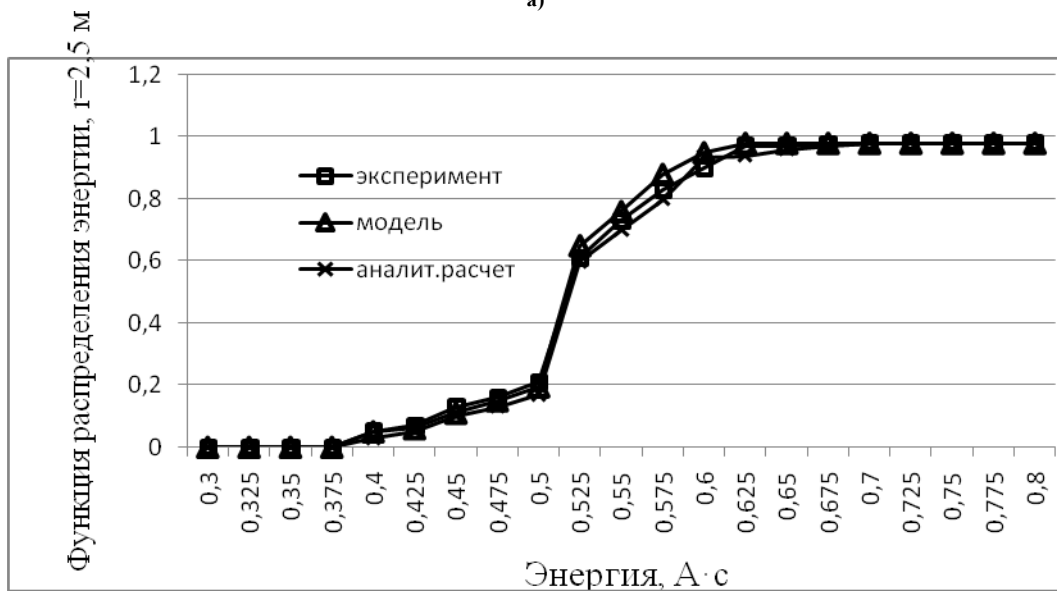
Застосування моделей при проектуванні БСМ

Досліджено взаємозв'язок між часом існування вузла і всієї мережі із заданою вірогідністю і різними мережевими параметрами, використовуючи розподіл часу життя, для підтвердження ефективності запропонованих моделей і методів при проектуванні мережі. В експериментах розглядається наступна архітектура мережі: щільність мережі ρ , робочий цикл ξ і швидкість трафіку λ_{lc} для всіх вузлів різні. Значення цих параметрів 0,05, 0,2 і 0,1 пакет/хв, радіус передачі 20 м, потужності батареї $C = 2000$ мА·год, інші параметри залишаються незмінними.

Ймовірність того, що термін служби вузла на відстані $r=12$ м більше, ніж 500 годин показано на рисунках 2а-2в. Для максимальної ймовірності досягнення цього часу життя щільність повинна бути не менше 0,053. Можна помітити, що ймовірність різко зростає від 0 до 1 при зміні щільності вузлів від 0,002 вузла/м² до 0,097 вузлів/м². Ця крута зміна пов'язана з тим, що зміна часу життя мережі невелика при детермінованій топології.



а)



б)

Рис. 1. Функція розподілу споживання енергії протягом 1 хвилини під час проведення експерименту, моделювання та аналітичному розрахунку

Крім того, скорочення робочого циклу безпосередньо знижує споживання енергії (рисунок 2б). Збільшення або зменшення швидкості трафіку на 0,05 пакет/хв призводить до зменшення ймовірності досягнення поставленого терміну служби.

Ймовірність досягнення часу життя мережі в 500 годин показана на рисунку 2г для різної щільності вузлів. Для досягнення цього часу життя, оптимальна щільність більше ніж 0,097, оскільки робота мережі розглядається тільки, коли всі вузли є функціональними.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Запропоновано ймовірнісний підхід оптимізації часу існування бездротової сенсорної мережі, який містить метод розрахунку енерговитрат БСМ при передачі, обробці та зчитуванні даних в вузлах при поширенні трафіку на основі ймовірнісного аналізу розподілу часу життя, який дозволяє здійснювати вибір ефективного режиму роботи елементів БСМ. Споживання енергії сходиться до нормального розподілу при тривалих періодах спостереження. Розроблена модель підтверджена стендовими експериментами і моделювання. Результати показують, що розроблена модель точно відображає розподіл споживання енергії і фіксує випадковість бездротових сенсорних мереж. Скорочення робочого циклу знижує споживання енергії, збільшення або зменшення швидкості трафіку на 0,05 пакет/хв призводить до зменшення ймовірності досягнення поставленого терміну служби всієї мережі. Запропонована методика забезпечує результати для середнього споживання енергії з похибкою менш 3,5%.

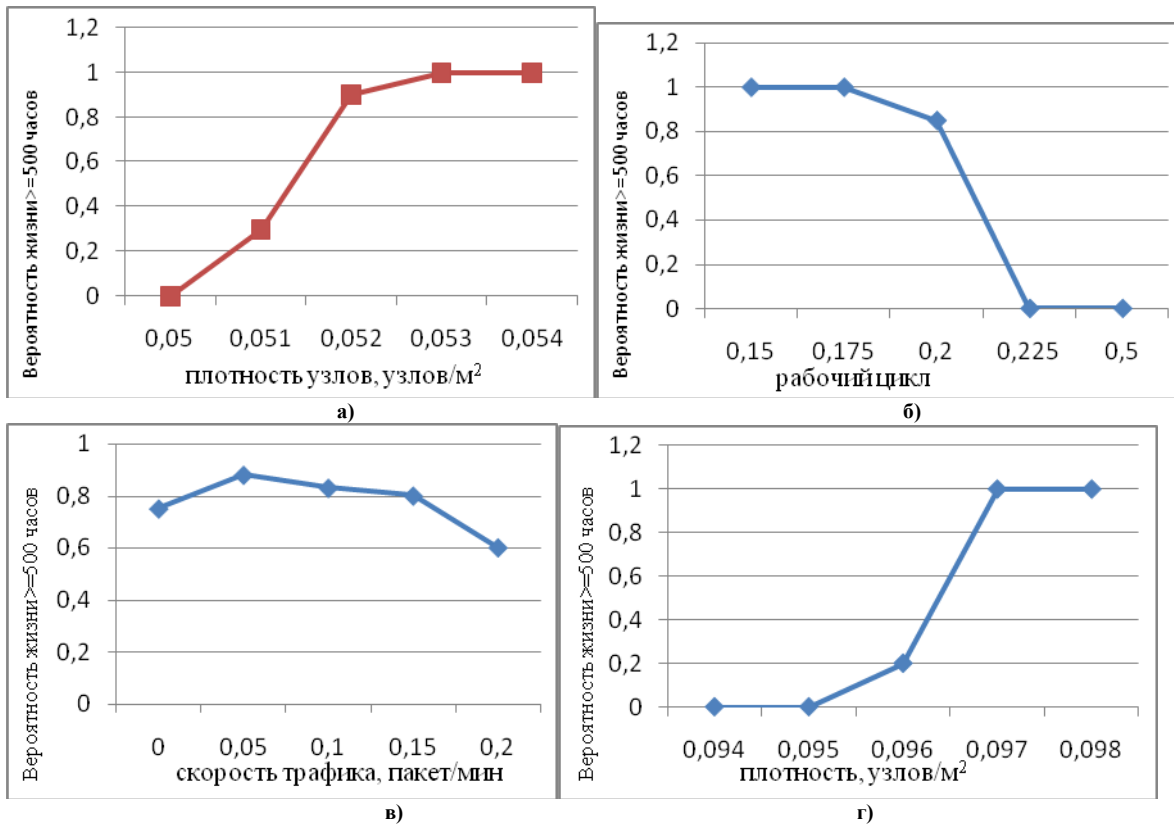


Рис. 2. Імовірність заданого часу життя вузла і мережі протягом 500 годин з різною щільністю вузлів, швидкістю трафіку і робочим циклом

Список використаної літератури

1. MICA2 sensor node. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xbow.com>.
2. NI USB-6210 multifunction DAQ. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ni.com>.
3. TinyOS. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://webs.cs.berkeley.edu/tos/>.
4. Hnatushenko, Vikt. The distribution of energy consumption in wireless networks to anycast protocol . Power Engineering and Information Technologies in Technical Objects Control – 2016 – p. 195-201
5. Van Hoesel, L. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks by cross-layer interaction/ L. Van Hoesel, T. Nieberg, J. Wu, and P.J.M. Havinga // IEEE Wireless Communications. – 2014.– p. 79
6. Vural, S. Probability distribution of multi-hop-distance in onedimensional sensor networks / S. Vural, E. Ekici// Computer Networks. – 2007.– vol.51(13).– p.3727–3749
7. Vuran, M. C. XLP: A cross layer protocol for efficient communication in wireless sensor networks/ M. C. Vuran, I. F. Akyildiz. // IEEE Trans. on Mobile Computing, Nov 2010.– vol.9(11).– p.1578–1591
8. Wang, D. Coverage and lifetime optimization of wireless sensor networks with gaussian distribution / D. Wang, B. Xie, D.P. Agrawal // IEEE Trans. on Mobile Computing, Dec 2008.– vol.7(12).– p.1444–1458
9. Wang, Q. A realistic power consumption model for wireless sensor network devices / Q. Wang, M. Hempstead, W. Yang // In Proc. of IEEE SECON 2006. – p. 286–295
10. Xie, M. Towards an end-to-end delay analysis of wireless multihop networks / M. Xie, M. Haenggi. // Ad Hoc Networks, July 2009.– vol.7(5).–p.849 – 861
11. Xue, Y. Cost-efficiency of anycast-based forwarding in duty-cycled WSNs with lossy channel / Y. Xue, M. C. Vuran, B. Ramamurthy. // In Proc. of IEEE SECON 2010.– p. 657-684