
УДК 621.396.4

Семенченко А. І. , д-р держ. упр, проф.
Національна академія державного управління
при президентіві України;
Алексєєва І.В. , к.ф.-мат.н.;
Ковшик А.Г. , магістр
НТУУ «КПІ»

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ СТРУКТУРНО-ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЗВ'ЯЗНОСТІ МОБІЛЬНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Розроблено метод підвищення структурно-інформаційної зв'язності мобільних безпроводових сенсорних мереж, що дозволяє не тільки збільшити дальність передачі інформації, а й може бути використан для підвищення зони покриття і вирішення проблеми низької зв'язності мережі у випадку неоднорідного розміщення безпроводових вузлів.

Разработан метод повышения структурно-информационной связности мобильных беспроводных сенсорных сетей, который позволяет не только увеличить дальность передачи информации, но и может быть использован для повышения зоны покрытия и решения проблемы низкой связности сети в случае неоднородного размещения беспроводных узлов.

A method for improving structural-information connectivity of mobile wireless sensor networks was developed, which can not only increase the range of transmission, but also can be used to enhance the coverage and solve the problem of low network connectivity in case heterogeneous placement of wireless nodes.

Вступ. У сенсорних мережах виникає цілий ряд нових проблем, вивченню яких приділяється велика увага [1-4]. Однією з таких проблем є проблема низької структурно-інформаційної зв'язності. Структурна надійність сучасних мереж визначається наявністю або відсутністю справного шляху в заданому напрямку [12, 13]. Однак, наявність справного

шляху ще не гарантує негайного встановлення з'єднання, оскільки елементи шляху можуть бути зайняті іншими абонентами для передачі або приймання інформації. Отже актуальною задачею у руслі створення ефективних телекомунікаційних технологій є оцінка надійності безпроводових сенсорних мереж із урахуванням їх структурних і інформаційних характеристик.

Одним із шляхів підвищення структурної надійності (зв'язності) мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ) є застосування безпілотних літальних апаратів (БЛА) у якості додаткових вузлів [14]. Архітектура мобільної сенсорної мережі з використанням безпілотних літальних апаратів схематично зображена на рис. 1.

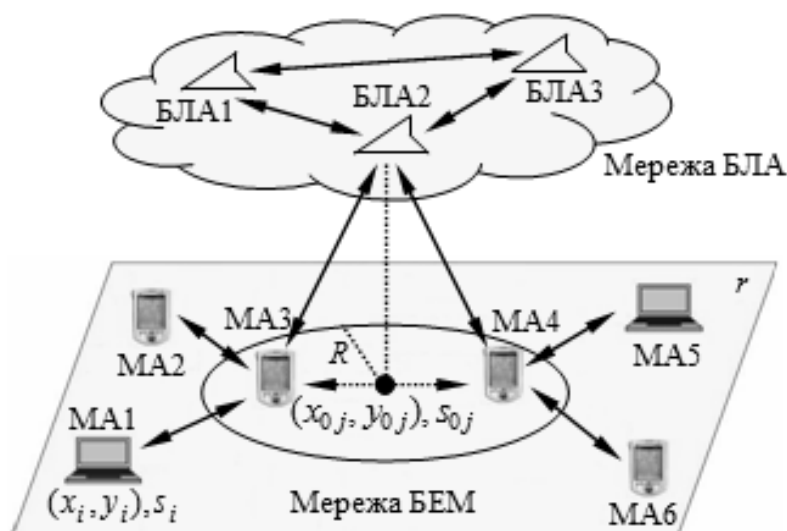


Рис.1. Приклад архітектури МБСМ із використанням БЛА

Перший (наземний) рівень складають віддалені райони наземних вузлів, роль яких можуть грати мобільні абоненти (МА), що переміщуються у деякому районі розміром r . Другий (повітряний) рівень складає мережа БЛА, що баражують на деякій висоті h над землею та утворюють зону покриття МА радіусу R , поєднуючи таким чином нез'єднанні між собою вузли (наприклад, БЛА2 з'єднує між собою МА3 та

МА4, як показано на рис. 1). Кожен МА оснащений двома радіо інтерфейсами – для зв'язку з іншими МА та для зв'язку з БЛА. Оснащені більш потужним радіоінтерфейсом БЛА мають змогу з'єднуватися з більшою кількістю вузлів, ніж наземні телекомунікаційні мережі. Це дозволяє значно підвищити структурну надійність мережі, приклад якої показано на рис.1. Близько розташовані один до одного вузли об'єднуються для синхронної передачі даних на інший вузол або точку збору інформації. Передбачається, що в приймальному пристрої сигнали від передавальних вузлів когерентно складаються, таким чином, виникає можливість значного збільшення дальності передачі інформації всередині мережі, що може бути використано для встановлення або відновлення зв'язку з ізольованими групами вузлів і має сприяти підвищенню зв'язності і збільшенню зони покриття мережі в цілому. Отже, виникає необхідність розробки методу підвищення структурно-інформаційної зв'язності МБСМ.

Аналіз досліджень і публікацій. В існуючих публікаціях висвітлюються лише деякі відокремлені питання оцінки зв'язності вузлів МБСМ. В роботах [14, 18, 20] здійснюється оцінка зв'язності БСМ на основі структурних і функціональних характеристик мережі без урахування когерентного складання полів. Отже існуючі моделі оцінки зв'язності БСМ потребують додаткового дослідження, удосконалення та систематизації в єдину методичку.

Постановка завдання. Таким чином метою даної роботи є розробка методу підвищення структурно-інформаційної зв'язності МБСМ в умовах постійної зміни структури та з урахуванням інформаційних характеристик

мережі. Для досягнення поставленої мети передбачається вирішення наступних задач:

1. Обґрунтування показників для оцінки структурно-інформаційної надійності МБСМ із урахуванням інформаційних характеристик мережі.
2. Систематизація існуючих методів та поєднання їх в єдиний оптимізований метод.
3. Програмна реалізація запропонованого алгоритму, обчислювальний експеримент та аналіз отриманих результатів.

Обґрунтування показників для оцінки структурно-інформаційної надійності. Структурно-інформаційну надійність будемо визначати як об'єктивну властивість мережі забезпечувати зв'язність абонентів із якістю надання послуг (QoS) не гірше заданої [5]. При цьому наявність зв'язку (зв'язності) означає існування принаймні одного справного шляху між відповідними вузлами мережі. Ймовірність такої події позначимо $P_{kl}, k, l = \overline{1, N}$, де N – кількість вузлів у мережі. Справність являє собою категорію, яка є протилежною такому поняттю, як відмова. Відмова каналу зв'язку означає такий його стан, при якому обладнання каналу повністю вийшло з ладу, або ж його параметри настільки погіршились, що подальше використання каналу неможливе. Оскільки обладнання кожного мобільного абонента БЕМ поєднує у собі функції терміналу і вузла комутації, то вихід з ладу цього вузла призведе до одночасної відмови усіх ліній зв'язку, які до нього приєднуються. Відмова вузла призводить до порушення більшого числа шляхів, ніж відмова лінії зв'язку. Однак ймовірність відмови вузла значно менше ймовірності відмови лінії зв'язку. Тому при визначенні структурної надійності телекомунікаційної мережі будемо розглядати тільки вплив ліній зв'язку, вважаючи, що надійність

вузлів дорівнює одиниці. Під надійністю лінії зв'язку між i -им і j -им вузлами p_{ij} будемо вважати ймовірність знаходження її у справному стані, яка чисельно дорівнює одиниці мінус ймовірність відмови даної лінії. Справний стан лінії зв'язку може визначатися одним або декількома показниками якості надання послуг QoS. В залежності від типу трафіку пріоритетним показником QoS можуть бути різні параметри: гарантована достовірність (точність) передачі інформації, необхідна пропускна спроможність (потоківі мультимедіа), час затримки передачі інформації та джиттер (VoIP, відеоконференції). Найважливішим із цих параметрів для більшості типів трафіку є необхідна гарантована достовірність передачі інформації. Тому в якості пріоритетного параметру для оцінки структурної надійності лінії зв'язку будемо використовувати ймовірність помилкового прийому пакету даних P_{er} . Оскільки цей параметр має статистичну природу, потрібен деякий час спостереження за лінією зв'язку, перш ніж визнати її несправною. Тому будемо вважати лінію зв'язку несправною, якщо протягом деякого часу t буде зберігатися нерівність $P_{er} > P_{er0}$. Тоді надійність лінії зв'язку телекомунікаційної мережі можна визначити як ймовірність безпомилкового прийому пакету даних протягом часу t

$$p_{ij} = 1 - P_{erij} . \quad (1)$$

Зазвичай структуру мережі можна представити у вигляді графу, що представляє собою сукупність послідовно або паралельно з'єднаних ребер (в даному випадку ненадійних ліній зв'язку). Тоді надійність таких структур в деякому напрямку (між вузлами k і l) визначаються наступними формулами:

$$P_{kl} = \prod_{i=1}^m p_i, k \neq l \quad (2)$$

$$P_{kl} = 1 - \prod_{i=1}^n q_i, k \neq l \quad (3)$$

де m, n – кількість ребер, що з'єднані послідовно та паралельно, відповідно; p_i – надійність i -го ребра; q_i – ймовірність відмови i -го ребра.

Практично будь-який граф двополюсної мережі можна перетворити на просте послідовне або паралельне з'єднання його елементів, наприклад, шляхом використання методу розкладання Шеннона — Мура [2, 3]. Якщо надійність структури мережі P_{kl} у будь-якому напрямку kl більше заданої P_{kl0} , то мережу можна вважати структурно зв'язаною.

Однак критерій структурної зв'язності не може повністю характеризувати надійність зв'язку, оскільки він не враховує алгоритми функціонування мережі, зокрема, протокол множинного доступу, алгоритм обробки заявок на вузлах мережі, протокол маршрутизації, пропускні спроможності каналів та ін. Тому розглянемо можливість використання для оцінки надійності мережі критеріїв структурно-інформаційної та інформаційної зв'язностей, що характеризують якість обслуговування запитів в умовах ненадійності елементів.

При наявності потоку інформації між двома фіксованими вузлами мережі ймовірність структурно-інформаційної зв'язності (СІЗ) між ними є ймовірність того, що в заданому інтервалі часу при надходженні чергового запиту на передачу інформації в процесі пошуку встановлення з'єднання знайдено принаймні один справний шлях між даними вузлами [5].

У якості критерію структурно-інформаційної зв'язності від вузла k до вузла l використовуємо показник:

$$H_{kl} = \frac{Z_{kl} - R_{kl}}{Z_{kl}} = \frac{C_{\text{надх}} t_c + C_{\text{втр}} t_c}{C_{\text{надх}} t_c} = 1 - \frac{C_{\text{втр}}}{C_{\text{надх}}} = 1 - p_c, \quad (4)$$

де Z_{kl} — навантаження, що надходить на обслуговування від вузла k до вузла l ; R_{kl} — втрачене навантаження при організації зв'язку від вузла k до вузла l ; $C_{\text{надх}}$ — інтенсивність потоку заявок, що знаходяться на обслуговування; $C_{\text{втр}}$ — інтенсивність потоку заявок, що отримали відмову в обслуговуванні; t_c — середній час обслуговування однієї заявки; p_c — відповідна йому ймовірність втрати заявок.

Для мереж з комутацією пакетів показник (4) матиме наступний вигляд:

$$H_{kl} = 1 - P_{erkl}, \quad (5)$$

де P_{erkl} — ймовірність помилкового прийому пакету даних протягом часу t , що на відміну від критерію структурної зв'язності визначається не тільки втратами на лінії зв'язку, а й інтенсивністю надходження заявок (пакетів) у даному напрямку, а також способом обслуговування заявок в вузлах мережі.

Це обслуговування залежить в першу чергу від обраного способу множинного доступу, що визначається технологією побудови мережі. В умовах високої мобільності вузлів, характерної для більшості БЕМ, передбачається переважно використання протоколу множинного доступу з контролем несучої (МДКН), наприклад, CSMA/CA [6]. Відповідно до даного протоколу вузли мережі здійснюють передачу сигналу на одній

частоті. Для уникнення колізій при доступі у разі надходження заявки кожен вузол перед початком передачі перевіряє канал зв'язку на наявність несучої. У випадку зайнятості каналу зв'язку, вузол зберігає пакет у буфері та через певний проміжок час знову перевіряє наявність несучої. У випадку зайнятості каналу зв'язку вузол чекає випадковий проміжок часу, що визначається розміром “вікна змагань”. Потім знову перевіряє канал зв'язку і якщо він вільний, розпочинає передачу. Колізія може виникнути лише у випадку збігу випадкових інтервалів часу, протягом яких вузли чекають доступ на передачу. Ймовірність цієї події тим менша, чим більший розмір “вікна змагань”. Виходячи з цього аналізу можна визначити, що на величину P_{er} при даному протоколі множинного доступу впливають: інтенсивність надходження пакетів заявок на вузли мережі; кількість вузлів у мережі; розмір буферу вузлів мережі; розмір “вікна змагань”.

Якщо припустити, що при заданій інтенсивності надходження пакетів заявок від заданої кількості вузлів мережі обрано достатньо великий розмір “вікна змагань” та вузли мають достатньо великий розмір буферу, то ймовірність втрати пакету через протокол множинного доступу прямує до нуля. У цьому випадку обслуговування заявок в вузлах мережі проводиться відповідно до моделі з очікуванням без обмеження довжини черги [7]. Тоді параметр структурно-інформаційної зв'язності зводиться до параметру структурної зв'язності:

$$H_{kl} = \frac{Z_{kl} - Z_{kl}(1 - P_{kl})}{Z_{kl}} = P_{kl}. \quad (6)$$

Оцінка структурно-інформаційної зв'язності мережі в цілому проводиться по матриці $[H]$, елементами якої є значення H_{kl} , якщо $Z_{kl} > 0$.

У випадку, коли $Z_{kl} = 0$, величина елемента H_{kl} невизначена. Будемо вважати, що мережа знаходиться в працездатному стані, якщо $H_{kl} > H_{\min}$, де H_{\min} – деяке мінімальне задане значення структурно-інформаційної зв'язності.

Таким чином, критерій структурно-інформаційної зв'язності визначає потенційну надійність мережі та є верхньою межею ймовірності зв'язності між вузлами мережі. Однак, зв'язок між вузлами може бути нестворений не тільки із-за порушення працездатності каналів, а також з причини відсутності вільних каналних ресурсів в даний момент часу. Для визначення ймовірності зв'язку між вузлами мережі в умовах обмеженої пропускної спроможності каналів будемо використовувати поняття інформаційної зв'язності (ІЗ) Q_{kl} від вузла k до вузла l у відповідності з формулою:

$$Q_{kl} = \frac{Z_{kl} - R_{kl}}{Z_{kl}} = 1 - p_c = 1 - P_{erkl}, \quad (7)$$

де P_{erkl} – ймовірність помилкового прийому пакету даних протягом часу t , що на відміну від критерію структурно-інформаційної зв'язності визначається не тільки втратами на лінії зв'язку та через організацію множинного доступу, а й через зайнятість усіх каналних ресурсів. З ростом пропускної спроможності каналів H_{kl} прямує до Q_{kl} .

Вихідні дані та обмеження. Подальший математичний аналіз проводимо у наближенні плоскої земної поверхні, розташованої на деякій відстані над рівнем моря. Нехай задано множину наземних вузлів V_i , $i=1,2,\dots,N$, де N – кількість наземних вузлів, зосереджених в деякому

районі радіусом r ; множину БЛА $B_j, j=1,2,\dots,K$, де K – кількість БЛА; $R = \text{const}$ – радіус зони покриття кожного БЛА, коли вони знаходяться на однаковій висоті h відносно земної поверхні; $x_i, y_i (i=1,2,\dots,N)$ – координати наземних вузлів на земній поверхні (отримані, наприклад, через супутникову систему глобального позиціонування GPS). Будемо вважати, що всі наземні вузли знаходяться на однаковій висоті відносно земної поверхні.

Метод колективної передачі інформації. У даній роботі пропонується метод колективної передачі інформації, спрямований на вирішення проблеми низької зв'язності в сенсорних мережах. Ідея даного методу полягає в тому, що близько розташовані один до одного вузли об'єднуються для синхронної передачі даних на інший вузол або точку збору інформації. Передбачається, що в приймальному пристрої сигнали від передавальних вузлів когерентно складаються, таким чином, виникає можливість значного збільшення дальності передачі інформації всередині мережі, що може бути використано для встановлення або відновлення зв'язку з ізольованими групами вузлів і має сприяти підвищенню зв'язності і збільшенню зони покриття мережі в цілому. Для здійснення когерентного складання потужностей насамперед необхідно забезпечити синхронізацію випромінювання безпроводових вузлів. Рішення завдання синхронізації генераторів в безпроводових вузлах може бути досягнуто на основі стандартного підходу, який передбачає використання систем фазового автопідстроювання [5]. Однак реалізація подібних схем синхронізації значно ускладнює пристрій безпроводових вузлів і істотно підвищує їх вартість. Можливо інше рішення - це використання в радіопередавальних пристроях вузлів пасивних розсіювачів, які перевипромінюють загальне для всіх електромагнітне поле (поле підсвічування), створюване деяким

стороннім джерелом. Таким чином, забезпечується когерентність полів випромінювання бездротових вузлів, при цьому внутрішній устрій самих вузлів може бути вкрай простим.

Розглянемо модель МБСМ, представлену на рис. 1. Нехай всі вузли мережі однакові і випадково розподілені по деякій плоскій території, тобто лежать в одній площині. Припустимо, що системи зв'язку вузлів влаштовані таким чином, що кожен вузол має один і той же фіксований радіус дії R , тобто будемо вважати, що будь-які два вузли, що знаходяться на відстані менше R , можуть організувати канал зв'язку між собою, в іншому випадку зв'язок. Для реалізації ідеї когерентного складання потужностей мережа розбивається на кластери - групи вузлів, випромінювання передавачів яких може бути синхронізоване за частотою і стабілізовано по фазі. Фактично, подібні кластери являють собою віртуальні антенні ґрати, що формують загальне поле випромінювання. Для утворення кластерів використовується енергетично ефективний алгоритм самоорганізації вузлів, заснований на ідентифікаційному номері, який спочатку присвоєно кожному вузлу [7, 8]. Даний алгоритм пред'являє такі вимоги, які забезпечуються в більшості протоколів каналного рівня в бездротових мережах [8]:

1. Кожен вузол має унікальний ідентифікаційний номер і знає ідентифікаційні номери найближчих сусідів, тобто вузлів, що знаходяться всередині радіусу дії даного вузла.

2. Повідомлення, передане вузлом, приймається коректно усіма найближчими сусідами даного вузла за кінцевий час.

Детальний опис даного алгоритму можна знайти в роботах [7, 8]. У результаті дії алгоритму кожен кластер має топологію «зірка», тобто зв'язок між вузлами кластера відбувається через центральний вузол. Прямий зв'язок між центральними вузлами відсутній. Даний алгоритм

дозволяє отримувати кластери компактної форми, що важливо для організації на їх основі віртуальних антенних решіток. Вузол, що належить кластеру, для передачі інформації попередньо розподіляє свої дані між вузлами кластера через центральний вузол, а потім ця інформація по команді центрального вузла синхронно передається всім кластером на будь-який з вузлів іншого кластера.

При розрахунку сумарного поля від системи випромінювальних вузлів мережі комплексна амплітуда поля на відстані r від кожного вузла обчислюється за емпіричною формулою, отриманої для приземних каналів зв'язку [9]:

$$E(r) = E_s \left(\frac{r}{R}\right)^{-d} \exp(-ikr), \quad (8)$$

де E_s - фіксований поріг чутливості по полю для приймальних пристроїв, k - хвильове число у вільному просторі, d - ступінь загасання поля, яка варіюється від $d = 1$ (для моделі вільного простору) до $d = 2$ (для моделі розповсюдження радіохвиль над проводить поверхнею). Радіус дії R є фіксованим і не залежить від обраної ступеня загасання d (передбачається, що для різних ступенів загасання потужність випромінювачів різна, що забезпечує сталість параметра R). Така вимога є природним для мережі, призначеної для моніторингу параметрів середовища із заданим просторовим дозволом.

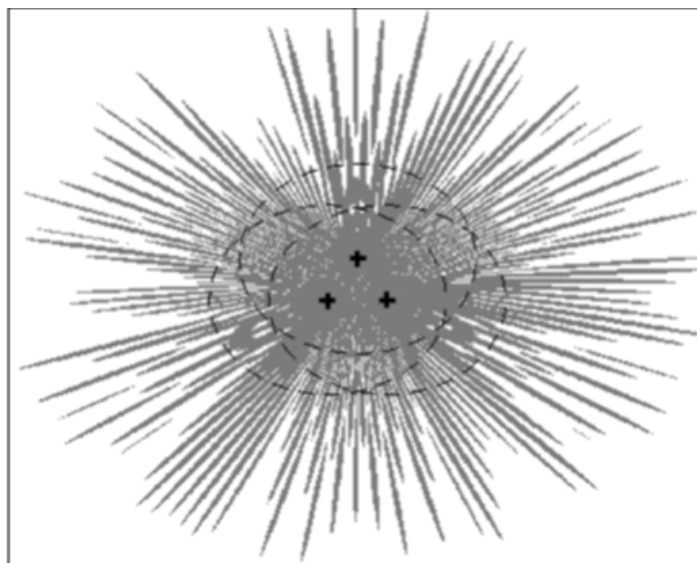


Рис. 2. Зона покриття віртуальної антенною решітки, що складається з трьох всеспрямованих антен. Пунктиром відзначені кордону зони покриття для кожного вузла окремо

На рис. 2 представлена зона покриття кластера - віртуальної антенної решітки (параметр $d = 1$), знайдена шляхом підсумовування полів трьох синхронно випромінювальних вузлів. Зафарбована область, усередині якої величина поля перевищує поріг чутливості E_s . Як видно, площа покриття збільшується в порівнянні з загальною площею покриття поодиноких вузлів (на рис. 2 площа зафарбованої території більш ніж у два рази перевищує загальну площу покриття поодиноких вузлів), проте межа цієї зони сильно порізана. Підкреслимо, що відстань між вузлами(рис.2) становить 30λ , а радіус дії кожного вузла - 50λ , де λ - довжина хвилі електромагнітного випромінювання. Характерним діапазоном частот для сенсорних мереж є діапазон близько 2.4 ГГц. Наприклад, стандарт безпроводового зв'язку 802.15.4 (ZigBee), який крім інших областей застосування також націлений на використання в сенсорних мережах, має специфікацію для даного частотного діапазону. Якщо частота випромінювання безпроводових вузлів становить 2.4 ГГц ($\lambda = 12.5$ см), то

на представленому рисунку радіус дії вузлів - 6.25 м, відстань між вузлами - 3.75 м. Важливо відзначити, що порізаність зони покриття призводить до того, що зв'язок між двома кластерами, що використовують метод колективної передачі інформації, може бути як двобічним, так і односпрямованим.

Висновки. В роботі був запропонований новий спосіб підвищення структурно-інформаційної зв'язності мобільних безпроводових сенсорних мереж, заснований на когерентному складанні полів, випромінюваних близько розташованими безпроводовими вузлами.

Також було продемонстровано, що застосування методу колективної передачі інформації дозволяє значно продовжити час життя сенсорної мережі, а також збільшити дальність передачі інформації.

Даний метод може бути використаний для підвищення зони покриття і вирішення проблеми низької зв'язності мережі у випадку неоднорідного розміщення безпроводових вузлів.

Використані джерела інформації:

1. Callaway E.H. *Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols*. CRC Press, 2004.
2. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., and Cayirci E. // *IEEE Comm. Magazine*. 2002. V. 40. № 8. P. 102.
3. Kawadia V., Kumar P.R. // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2005. V. 1. № 23. P. 76.
4. Laneman J.N., Tse D.N.C., and Wornell G.W. // *IEEE Trans. Inform. Theory*. 2004. V. 50. № 12. P. 3062.
5. Tu Y.S., Pottie G.J. // *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference*. 2002. V.1. P. 130.
6. Умнов А.Л., Головачев Д.А., Филимонов В.А., Шишалов И.С. // *Нелинейный мир*. 2004. Т. 2. № 5–6. С. 327.
7. Gerla M., Tsai T.C. // *ACM Baltzer Journal of Wireless Networks*. 1995. V. 1(3). P. 255.
8. Lin C.R., Gerla M. // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 1997. V. 15. № 7. P. 1265.
9. Sohrabi K., Manriquez B., and Pottie G.J. // *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference, Houston, TX, May 16–20, 1999*. P. 571.
10. Умнов А.Л., Филимонов В.А., Шишалов И.С. // *Труды 8-й научн. конф. по радиофизике. 7 мая 2004 г./ Ред. А.В. Якимов. Н. Новгород: ННГУ. С. 29.*
11. Романюк В. А. *Мобильные радиосети – перспективы беспроводных технологий // Сети и телекоммуникации. – 2003. – № 12. – С. 62–68.*

12. Мизин И. А., Богатырев В. А., Кулешов А. П. Сети коммутации пакетов / Под ред. В. С. Семенихина. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.
13. Дудник Б. Я., Овчаренко В. Ф., Орлов В. К. Надежность и живучесть систем связи / Под ред. Б. Я. Дудника. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.
14. Лисенко О. І., Валуйський С. В. Метод оптимального управління топологією мережі безпілотних літальних апаратів за критерієм підвищення зв'язності безпроводових ad-hoc мереж // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2010. – Вип. 2. – С. 218–224.
15. Калекіна Т. Г., Коваленко Т. Н. Обоснование критерия структурно-информационной связности при анализе надежности телекоммуникационных систем // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2010. – № 1. – С. 66–70.
16. Минович А. І., Романюк В. А. Методы множественного доступа в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2004. – № 2. – С. 46–50.
17. Романов А. И. Телекоммуникационные сети и управление: Учебное пособие. – К.: Изд-во Киевского университета, 2003. – 247 с.
18. Лысенко А. И., Валуйский С. В. Расчет времени связности узлов мобильных радиосетей // Матеріали 21-ї міжнародної Кримської конференції (КрыМиКо '2011) «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – 2011. – Т.1. – с.
19. Жиглявский А. А., Жилинкас А. Г. Методы поиска глобального экстремума. – М.: Наука, 1991. – 248 с.
20. Лисенко О.І., Валуйський С.В. Визначення показників векторного критерію для оцінки зв'язності безпроводових епізодичних мереж із використанням безпілотних літальних апаратів // Збірник наукових праць ППМЕ ім. Г.Є. Пухова НАНУ. – 2010. – Вип.57. – С. 134-141.
21. Попівський В. В., Сабурова С. О., Олійник В. Ф. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За загальною ред. В. В. Поповського. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564с.