

УДК 681.3

**МЕТОДИ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ  
ДЛЯ АНАЛІЗУ СИЛИ СИГНАЛІВ ІНФОРМАЦІЙНИХ ВУЗЛІВ****Карпінський М.П., Чиж В.М., Балабан С.М., Яремчук Т.О.****GEOMETRIC MODELING WIRELESS SENSOR NETWORKS FOR ANALYSIS SIGNAL  
STRENGTH INFORMATION NODES****Karpinski M., Chyzh V., Balaban S., Yaremchuk T.**

*Якість і довговічність роботи бездротової сенсорної мережі (БСМ) оцінюють за силою сигналів інформаційних вузлів. Для аналізу функціонування мережі в цілому і кожного вузла окремо використовують віртуальні моделі, які створюють у комп'ютерному просторі на базі реально існуючих БСМ.*

***Ключові слова:** бездротова сенсорна мережа, інформаційний вузол, геометричне моделювання, графічна візуалізація, евклідов конфігураційний простір, симплекс, гексагональна топологічна сітка.*

**Вступ.** Бездротові сенсорні мережі займають провідне місце серед сучасних інформаційних технологій. Вважається, що технологія БСМ настільки унікальна, що її можна використовувати у всіх сферах діяльності людини, а можливість передавати інформацію від одного інформаційного вузла до іншого дозволяє розгортати БСМ на практично необмежених площах. Розвиток і розширення сфер використання БСМ вимагають постійного підвищення їх надійності, довговічності, швидкодії і рівня захищеності інформації. Перелічені характеристики БСМ у значній мірі залежать від сили сигналів, які посилають в ефір інформаційні вузли (ІВ), що входять до складу БСМ. Таким чином для проектування і організації контролю за роботою БСМ важливим є питання контролю сили сигналів БСМ.

Розвиток інформаційних технологій пов'язаних з використанням БСМ, є неможливим без створення і використання належних засобів моделювання БСМ. Такі засоби дозволяють розробляти апаратне і програмне забезпечення мереж із меншими затратами, ніж у випадку використання реальних пристроїв [1]. Відомі математичні і фізичні моделі БСМ суттєво відрізняються між собою, але дозволяють успішно вирішувати завдання розвитку і удосконалення апаратних і програмних складових БСМ [2]. Зокрема для розроблення енергозберігаючих маршрутів передачі інформації і механізмів контролю за силою сигналів ІВ запропоновано геометричне моделювання для графічного представлення БСМ у двовимірному евклідовому конфігураційному просторі (ЕКП) [3]. Так при

моделюванні мереж до складу яких входять ІВ одного типу конфігураційний простір представляють точки, які знаходяться у вершинах квадратів. Для розроблення маршрутів передачі інформації така модель не є оптимальною, оскільки передбачає переміщення тільки у вертикальному і горизонтальному напрямках, що значно збільшує довжину шляху переміщення інформації, а відповідно і енергетичні затрати на функціонування БСМ в цілому. Використання гексагональної сітки розміщення інформаційних вузлів дозволяє планувати переміщення інформації в трьох напрямках, але передбачає збільшення числа ІВ на одиниці площі, порівняно з попередньою схемою розміщення ІВ.

Для дослідження параметрів сигналів ІВ, зокрема, сили сигналів, пропонуються геометричні моделі для створення, яких використовують методи обчислюваної геометрії, зокрема геометрії відстаней [4,5], яка дозволяє із факту існування співвідношень між вимірюваними відстанями досліджувати внутрішні властивості геометричних фігур. При цьому зручними з точки зору оптимальної кількості зв'язків є метод триангуляції Делоне. В запропонованій моделі відстань між вузлами сітки віртуальної мережі є функціями сили сигналів реальних інформаційних вузлів. В результаті зменшення сили сигналів відстань між вузлами сітки віртуальної мережі збільшується, площа змодельованої мережі зростає, що проводить до її викривлення, тобто відхилення від початкової плоскої форми. За величиною такого відхилення оцінюють кількісні і якісні зміни сили сигналів реальної БСМ. Такі моделі використовують для візуалізації атак червоточини в БСМ.

В основі запропонованих моделей є плоскі геометричні фігури, які при збільшенні розмірів їх елементів не можуть трансформуватися в об'ємні геометричні фігури, отже не придатні для візуалізації окремих ІВ параметри сигналів яких змінюються.

**Основна частина.** Геометричні моделі при відповідному виборі узгоджувальних функціональних залежностей визначають геометричні утворення в ЕКП і дають можливість будувати ієрархічні структури із сигнальних точок

(СТ). Створення структури ґрунтується на принципі самоподібності, який є основою побудови різного виду геометричних структур у фрактальній геометрії [6,7,8]. Ієрархічна структура дозволяє швидко, опускаючись по «ієрархічній драбині», відшукати первинний геометричний об'єкт конфігураційного простору, складений із невеликої кількості СТ, в якому відбулися структурні зміни внаслідок атаки на сигнали одного або декількох ІВ.

В процесі моделювання приймають, що у конфігураційному просторі двох вимірів ІВ геометрично представлені СТ, а відстані між СТ є функціями сили їх сигналів. Якщо сили сигналів відповідних ІВ рівні  $\Omega_1$  і  $\Omega_2$ , то відстань між ними представляють, як  $L_{12}=L(\Omega_1, \Omega_2)$ . При такому представленні істинні відстані між ІВ в реальному просторі не мають значення, оскільки в середовищі, де за звичай працюють БСМ, сигнал

поширюється зі швидкістю близькою до швидкості світла. Для створення відповідності між ІВ і СТ ЕКП враховують і «шумові сигнали»  $\Omega$ , якими наповнений простір розташування реальних ІВ. Тому як відповідність шумового сигналу  $\Omega$ , у моделі представляють відрізок  $L_0=L(\Omega)$ , а сигналом двох однотипних ІВ  $\Omega_1=\Omega_2$  відрізки однакової довжини  $L_J=L(\Omega_1)=L(\Omega_2)$ . Отриманий таким чином відрізок довжиною  $L_{12}=2L_J+L_0$  є функціональним зв'язком (ФЗ), який визначає у ЕКП відстань між СТ 1 і 2 (рис. 1). Таким чином ФЗ представляє два однотипні ІВ в ЕКП:

- кінці відрізка  $L_{12}$  є СТ, які представляють два ІВ в ЕКП;
- довжина відрізка  $L_{12}$  є ФЗ, який характеризує роботу ІВ.

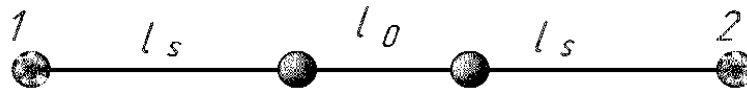


Рис. 1. Функціональний зв'язок (ФЗ) між двома сигнальними точками (СТ).

ФЗ між двома СТ, які представляють не однотипні ІВ визначаються відрізком  $L_{12}=L_{J1}+L_{J2}+L_0$ , де  $L_{J1}$  і  $L_{J2}$  характеризують параметри сигналів ІВ  $\Omega_1$  і  $\Omega_2$  з врахуванням того, що  $\Omega_1 \neq \Omega_2$ .

Якщо ІВ у реальній БСМ зв'язаний з більшою кількістю ІВ, то в ЕКП моделі його представляє СТ з цією ж кількістю ФЗ, відповідної довжини (рис. 2), які формуються аналогічно. Наприклад, ФЗ між СТ 1 і 3 рівний  $L_{13}=L_J+L_{J3}+L_0$ , де  $L_{J3}=L(\Omega_3)$

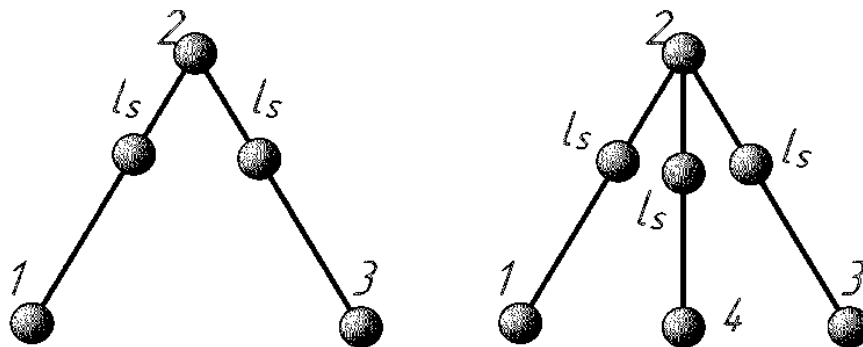


Рис. 2. Функціональні зв'язки сигнальної точки з двома і трьома сусідніми сигнальними точками.

Під час моделювання БСМ, до складу якої входять однотипні ІВ, в основу побудови множини СТ конфігураційного простору беруть рівносторонній трикутник зі стороною  $L$ . У вершинах такого трикутника розміщують три СТ і одержують  $i\Delta_k^j$ , який визначається функціональними зв'язками  $L_{IJ}$ ,  $L_{JK}$ , і  $L_{KI}$  між СТ  $I$ ,  $J$ ,  $K$ . Якщо до складу БСМ входять не

однотипні ІВ в основу побудови беруть звичайний трикутник дотримуючись принципу його нерівності (сума двох сторін трикутника більша за довжину третьої сторони). Таким чином СТ, які представляють ІВ мережі у конфігураційному просторі, розміщують у вершинах трикутників (рис. 3).

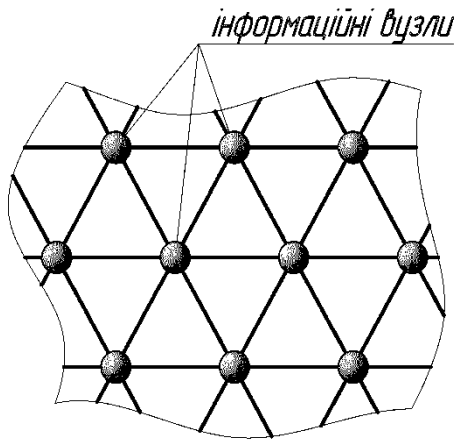


Рис. 3. Фрагмент геометричної моделі БСМ з трикутними комірками.

Для здійснення комп'ютерної візуалізації змін параметрів сигналів ІВ кожні два сусідні трикутники геометричної моделі БСМ об'єднують у чотирикутні симплекси  ${}^j[C]_p^k$  з вершинами **I, J, K, P**. Такі симплекси значно зручніші для подальших досліджень оскільки при переміщенні СТ, що розміщені у їх вершинах симплекси можуть трансформуватися у відрізки прямої лінії, чотирикутники або трикутні піраміди.

Об'єднання двох рівносторонніх трикутників із спільною стороною утворює чотирикутний симплекс, вершини якого з'єднані п'ятьма ФЗ (Рис. 4). Не з'єднаними залишаються дві вершини – велика діагональ. Якщо з'єднати ці вершини відрізком, визначивши його довжину із геометричних властивостей ЕКП, то отримаємо симплекс  ${}^j[C]_p^k$ , в якому чотири вершини з'єднані п'ятьма ФЗ довжиною **L** (чотири сторони і одна діагональ) та одним геометричним зв'язком (ГЗ) довжиною  $d = \sqrt{3}l$  (велика діагональ). Довжини ФЗ визначаються характером роботи ІВ і тому їхні довжини визначають положення СТ в ньому. Тому ГЗ не може змінювати форму симплекса. Він вказує лише відстань між двома його протилежними вершинами, причому ця відстань вимірюється у площині симплекса. ГЗ на рисунку позначені штриховими лініями.

При стабільній роботі ІВ у симплексі фіксується двовимірний евклідовий простір із ФЗ довжиною **L**. ФЗ визначаються характером роботи ІВ, які формують симплекс і визначають положення СТ, які представляють ІВ, які формують симплекс. Зміна в роботі ІВ приводить до зміни довжини ФЗ у симплексі. Зміна в роботі ІВ приводить до зміни довжини ФЗ у симплексі. В залежності від того, яким чином встановлюють залежність між ФЗ і СТ у симплексі існують два види візуалізації сили сигналів ІВ.

Перший вид візуалізації ґрунтується на тому, що первинне положення СТ фіксується у кластері. СТ, таким чином, залишаються

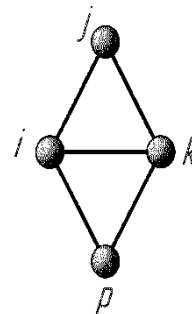


Рис. 4. Схема симплекса-ромба  ${}^j[C]_p^k$  зі сигнальними точками **I, J, K, P** у вершинах

нерухомими і при змінній силі сигналів інформаційних вузлів. Зміна сили сигналу ІВ або групи ІВ спричиняє зміну відповідних ФЗ, які здійснюють викривлення простору навколо тих нерухомих СТ, які визначають ІВ сигнали яких аналізують. Зміненні у довжині ФЗ стають дугами кіл, які відділяються від кола хордами довжиною **L**. Дуги мають своїм початком зафіксовану СТ, яка представляє ІВ сигнал якого аналізують. Кінці дуг фіксують у СТ які визначають ФЗ в початковому створенні симплекса. Таким чином, навколо СТ сигнал ІВ якої аналізують, відбувається викривлення простору. Такий вид візуалізації доцільно використовувати у випадках, коли одночасно змінюється сила сигналів великої кількості ІВ, зокрема для оцінювання енергетичного запасу ІВ з автономним живленням.

Другий вид візуалізації ґрунтується на можливості переміщення СТ в залежності від довжини ФЗ, які визначають точки. При стабільній роботі ІВ, як вже було сказано, геометрична модель БСМ представлена однаковим симплексами – ромбами, в яких п'ять відстаней між СТ є ФЗ довжиною **L**, а шоста відстань – велика діагональ ромба є ГЗ довжиною  $d = \sqrt{3}l$ . Геометрія симплекса змінюється в результаті змін сили сигналу одного або декількох ІВ внаслідок того, що ФЗ, які характеризують роботу ІВ змінюють свою довжину. Зміна довжин ФЗ приведе до переміщення відповідних СТ. Таким чином, відбудеться трансформація простору симплекса навколо СТ, які візуально визначають в конфігураційному просторі комп'ютера ІВ сила сигналів яких зазнала змін.

Перший вид візуалізації можна реалізувати використовуючи метод стаціонарних сигнальних точок (ССТ). В цьому випадку визначення ГЗ потрібне лише при вирішенні конкретних задач, які можуть виникати. Область повної трансформації симплекса  ${}^j[C]_p^k$  складається із

пари взаємозв'язаних трикутників  $\Delta_p^i$  і  $\Delta_k^p$  (рис. 5) дві сторони кожного з яких перетворюються на

дуги, які з'єднують СТ із точкою-представником ІВ сигнал якого аналізують.

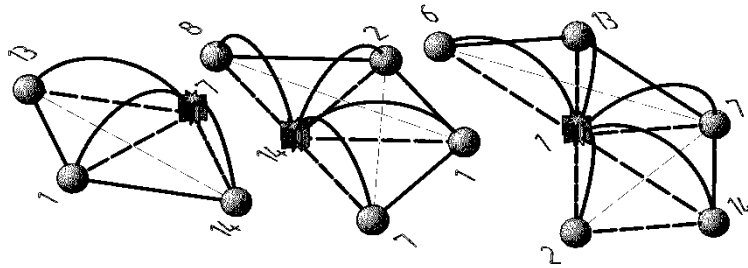


Рис. 5. Візуальне зображення області повної трансформації симплекса за методом ССТ

Розглянемо процес контролю за рівнем залишкової енергії ІВ мережі з автономним живленням. В процесі роботи ІВ запас енергії їхніх джерел живлення зменшується. Відповідно сила сигналів зменшується. Отже, силу сигналів ІВ представляють, як функцію залишкової енергії їхніх джерел живлення. Таким чином візуалізація

сили сигналів дозволяє одержати інформацію про рівень залишкової енергії джерел живлення ІВ. Так візуалізація сили сигналу  $i$ -того ІВ, причиною зменшення якої є зниження енергетичного запасу джерела живлення, відбувається за схемою приведеною на рис. 6.

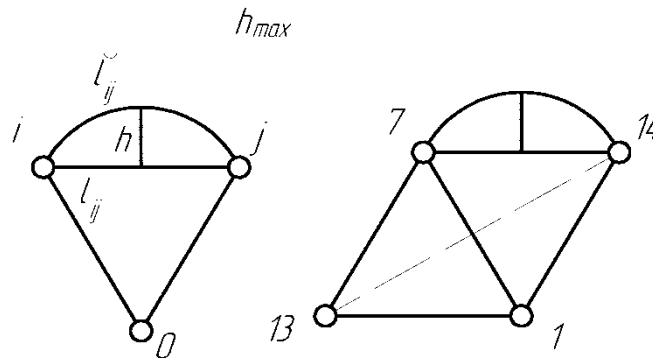


Рис. 6. Схема візуалізація зміни сили сигналу ІВ за методом ССТ.  $I, J$  – номери досліджуваних СТ віртуальної мережі;  $l_{ij}$  – довжина ФЗ між СТ  $I, J$ , на початку досліджень;  $\tilde{l}_{ij}$  – змінена довжина ФЗ між СТ  $I, J$  в процесі досліджень;  $h$  – показник трансформації симплекса.

Відповідно запропонованому методу візуалізації зменшення сили сигналу між СТ  $i, j$  приводить до збільшення довжини дуги  $\tilde{l}_{ij}$  при незмінній довжині хорди  $l_{ij}$ . Отже, збільшується  $h$  - величина найбільшого перевищення дуги  $\tilde{l}_{ij}$  над хордою  $l_{ij}$ , яку називають показником трансформації. При досягненні сили сигналу мінімально критичного значення експлуатація ІВ стає недоцільною, а показник трансформації набуває максимального значення  $h_{max}$ . Таким чином, встановивши на основі фізичних характеристик ІВ та умов експлуатації БСМ  $h_{max}$  і залежність між  $l_{ij}$ ;  $\tilde{l}_{ij}$  і  $h$  одержують можливість аналізу надійності роботи окремих ІВ і БСМ в цілому.

Для встановлення залежності між вказаними геометричними параметрами

представляють довжину дуги  $\tilde{l}_{ij}$  у вигляді формули Гюйгенса:

$$\tilde{l}_{ij} \approx 2l + \frac{(2l - l_{ij})^2}{3} \quad (1);$$

$$l \approx \frac{3\tilde{l}_{ij} + l_{ij}}{8} \quad (2);$$

Як катет прямокутного трикутника

$$h = \sqrt{l^2 - \frac{(l_{ij})^2}{4}} \quad (3);$$

підставивши  $L$  з (2) в (3) одержують

$$h = \frac{\sqrt{3}}{8} \sqrt{3(\tilde{l}_{ij})^2 + 2\tilde{l}_{ij}l_{ij} - 5(l_{ij})^2} \quad (4).$$

Приведені графічні та аналітичні дослідження підтверджують можливість відслідковувати силу сигналів всіх ІВ мережі і оцінювати надійність їхньої роботи.

Для реалізації другого виду візуалізації запропоновано чотири методи: метод

чотириточкових симплексів ([4С]), метод фіксованих сигнальних точок (ФСТ), метод еталонних сигнальних точок (ЕСТ) та аналітичний метод, в основу яких покладено здатність трансформації чотириточкових симплексів із двовимірних у тривимірні внаслідок зміни довжин ФЗ. Оскільки вид трансформації симплекса залежить від положення трансформованої СТ у його структурі, симплексну модель БСМ перетворюють у модель складнішої форми у якій

кожна СТ одночасно належала б до кількох симплексів, в яких займала б різні положення.

Як основу побудови кластера запропоновано правильний шестикутник зі стороною  $l_j$ . У вершинах такого шестикутника розміщують шість СТ. наступним кроком побудови є окантування шестикутника правильними трикутниками зі сторонами такої ж довжини, у вершинах яких також розміщують СТ (рис. 7).

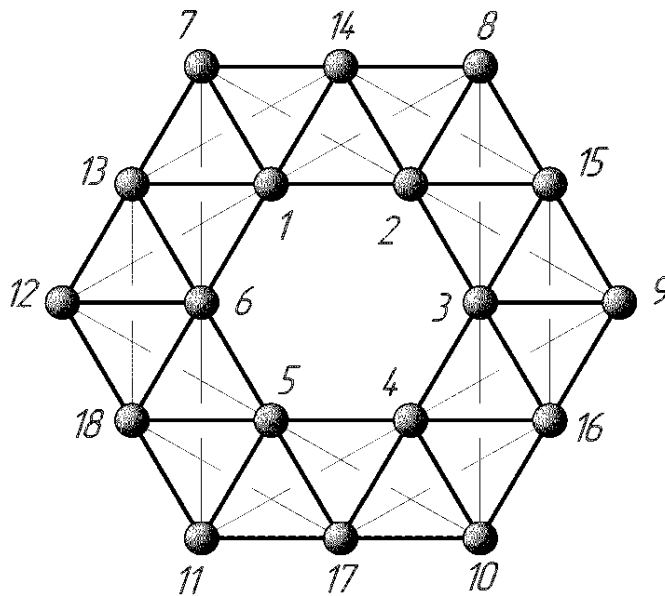


Рис. 7. Кластерна модель із СТ в ЕКП.

Побудова дає можливість утворити ще одну СТ, яку можна помістити в центр внутрішнього шестикутника, з'єднавши її шістьма ФЗ з точками шестикутника. Але це робити недоцільно внаслідок того, що при збільшенні СТ на одиницю кількість ФЗ збільшується на шість.

Утворений таким чином кластер  $K(18,36)$  має шестикутну структуру повністю знаходиться у двовимірному ЕКП. Кластер складається із 18 СТ, з'єднаних за допомогою 36 однакових відрізків ФЗ довжиною  $l_j$ . ФЗ, а отже, і розміщення СТ будуть визначатися характеристиками ІВ, а не властивостями ЕКП. Таким чином СТ є представниками ІВ у конфігураційному просторі комп'ютера, а ФЗ характеризують роботу ІВ у реальних умовах.

У представленому кластері множину ФЗ  $L = \{L_{1,7}; L_{1,13}; L_{1,14}; L_{1,2}; L_{1,6}; L_{2,14}; L_{2,8}; L_{2,15}; L_{2,3}; L_{3,15}; L_{3,9}; L_{3,16}; L_{4,16}; L_{4,10}; L_{4,17}; L_{4,5}; L_{5,17}; L_{5,11}; L_{5,18}; L_{5,6}; L_{6,18}; L_{6,12}; L_{6,13}; L_{7,13}; L_{7,14}; L_{8,14}; L_{8,15}; L_{9,15}; L_{9,16}; L_{10,16}; L_{10,17}; L_{11,17}; L_{11,18}; L_{12,18}; L_{12,13}\}$  розділяють на три класи –  $L = L_1 \cup L_2 \cup L_3$

Множину 12-ти ФЗ, які утворюють сторони зовнішнього обвідного шестикутника  $L_1 = \{L_{7,13};$

$L_{7,14}; L_{8,14}; L_{8,15}; L_{9,15}; L_{9,16}; L_{10,16}; L_{10,17}; L_{11,17}; L_{11,18}; L_{12,18}; L_{12,13}\}$ ;

1. Множину 6-ти ФЗ, які є сторонами внутрішнього шестикутника:  $L_2 = \{L_{1,2}; L_{2,3}; L_{3,4}; L_{4,5}; L_{5,6}; L_{6,1}\}$ ;

2. Множину 18-ти ФЗ, які з'єднують вершини внутрішнього шестикутника із вершинами і серединами сторін зовнішнього шестикутника:  $L_3 = \{L_{1,7}; L_{1,13}; L_{1,14}; L_{2,14}; L_{2,8}; L_{2,15}; L_{3,15}; L_{3,9}; L_{3,16}; L_{4,16}; L_{4,10}; L_{4,17}; L_{5,17}; L_{5,11}; L_{5,18}; L_{6,18}; L_{6,12}; L_{6,13}\}$ .

ФЗ, як утворюючі елементи кластера  $(K18;36)$ , в перетині визначають множину С 18 – ти СТ кластера:  $C = \{C_1; C_2; C_3; C_4; C_5; C_6; C_7; C_8; C_9; C_{10}; C_{12}; C_{13}; C_{14}; C_{15}; C_{16}; C_{17}; C_{18}\}$ .

В залежності від того, перетином скількох ФЗ визначається СТ, усю множину СТ розбивають на три класи ( $C = C_1 \cup C_2 \cup C_3$ ):

1. Вершини зовнішнього обвідного шестикутника  $C_1$ . Цей клас СТ визначають перетином двох сусідніх ФЗ із класу  $L_1$  та одним ФЗ із класу  $L_3$ :

$$C_1 = \{C_7; C_8; C_9; C_{10}; C_{12}\}.$$

Таблиця 1

## СТ утворені трьома ФЗ

Сигнальні точки	Перетин функціональних зв'язків
$c_7$	$l_1^7 \cap l_7^{13} \cap l_7^{14}$
$c_8$	$l_2^8 \cap l_8^{14} \cap l_8^{15}$
$c_9$	$l_3^9 \cap l_9^{15} \cap l_9^{16}$
$c_{10}$	$l_4^{10} \cap l_{10}^{16} \cap l_{10}^{17}$
$c_{11}$	$l_5^{11} \cap l_{11}^{17} \cap l_{11}^{18}$
$c_{12}$	$l_6^{12} \cap l_{12}^{18} \cap l_{12}^{13}$

Кожна СТ класу  $C_1$  має по три ФЗ з іншими СТ. Вона функціонально з'єднана із однією вершиною внутрішнього шестикутника і двома СТ, які є серединами сторін зовнішнього обвідного шестикутника.

2. Середини сторін зовнішнього обвідного шестикутника  $C_2$ . Цей клас СТ визначають перетином двох сусідніх ФЗ із класу  $L_1$  та двох відповідних ФЗ із класу  $L_3$ :  $C_2 = \{C_{13}; C_{14}; C_{15}; C_{16}; C_{17}; C_{18}\}$ .

Таблиця 2

## СТ утворені чотирма ФЗ

Сигнальні точки	Перетин функціональних зв'язків
1	2
$c_{13}$	$l_7^{13} \cap l_{12}^{13} \cap l_1^{13} \cap l_6^{13}$
$c_{14}$	$l_7^{14} \cap l_8^{14} \cap l_1^{14} \cap l_2^{14}$
$c_{15}$	$l_8^{15} \cap l_9^{15} \cap l_2^{15} \cap l_3^{15}$
$c_{16}$	$l_9^{16} \cap l_{10}^{16} \cap l_3^{16} \cap l_4^{16}$
$c_{17}$	$l_{10}^{17} \cap l_{11}^{17} \cap l_4^{17} \cap l_5^{17}$
$c_{18}$	$l_{11}^{18} \cap l_{12}^{18} \cap l_5^{18} \cap l_6^{18}$

Кожна СТ класу  $C_2$  має по чотири ФЗ з іншими СТ. вона функціонально з'єднана із двома сусідніми вершинами зовнішнього обвідного шестикутника та двома вершинами внутрішнього шестикутника.

3. Вершини внутрішнього шестикутника  $C_3$ . Цей клас СТ визначають перетином трьох відповідних ФЗ із класу  $L_3$  та двох сусідніх ФЗ із класу  $L_2$ :  $C_3 = \{C_1; C_2; C_3; C_4; C_5; C_6\}$ .

Кожна СТ класу  $C_3$  має по п'ять ФЗ з іншими СТ. Вона функціонально з'єднана із двома сусідніми вершинами внутрішнього шестикутника, однією вершиною зовнішнього обвідного шестикутника та двома СТ, які є серединами сторін зовнішнього обвідного шестикутника.

Таблиця 3

## СТ утворені п'ятьма ФЗ

Сигнальні точки	Перетин функціональних зв'язків
$c_1$	$l_1^2 \cap l_1^6 \cap l_1^7 \cap l_1^{13} \cap l_1^{14}$
$c_2$	$l_1^2 \cap l_2^3 \cap l_2^8 \cap l_2^{14} \cap l_2^{15}$
$c_3$	$l_2^3 \cap l_3^4 \cap l_3^9 \cap l_3^{15} \cap l_3^{16}$
$c_4$	$l_3^4 \cap l_4^5 \cap l_4^{10} \cap l_4^{16} \cap l_4^{17}$
$c_5$	$l_4^5 \cap l_5^6 \cap l_5^{11} \cap l_5^{17} \cap l_5^{18}$
$c_6$	$l_5^6 \cap l_1^6 \cap l_6^{12} \cap l_6^{18} \cap l_6^{13}$

Множини ФЗ  $L$  і СТ  $C$  дозволяють здійснювати покриття двовимірного евклідового комп'ютерного простору кластера  $K$  (18, 36)

множиною трикутника **T**, яка налічує 18 елементів:

$$T = \{ {}_1\Delta_{14}^7, {}_1\Delta_{2,2}^{14}, {}_2\Delta_{15,2}^{14}, {}_2\Delta_{3,3}^8, {}_3\Delta_{9,3}^{15}, {}_3\Delta_{16,3}^{15}, {}_3\Delta_{4,4}^9, {}_4\Delta_{10,4}^{16}, {}_4\Delta_{17,4}^{10}, {}_4\Delta_{5,5}^{17}, {}_5\Delta_{11,5}^{17}, {}_5\Delta_{18,5}^{11}, {}_5\Delta_{6,6}^{18}, {}_6\Delta_{12,6}^{18}, {}_6\Delta_{13,6}^{12}, {}_6\Delta_{1,1}^{13}, {}_7\Delta_{7,7}^{13} \}$$

Множину трикутників розділяють на дві групи  $T = T_1 \cup T_2$ :

$$1. T_1 = \{ {}_1\Delta_{2,2}^{14}, {}_2\Delta_{3,3}^{15}, {}_3\Delta_{4,4}^{16}, {}_4\Delta_{5,5}^{17}, {}_5\Delta_{6,6}^{18}, {}_6\Delta_{1,1}^{13} \}$$

- множину трикутників, в основі яких наявний ФЗ між двома СТ внутрішнього шестикутника;

$$2. T_2 = \{ {}_1\Delta_{14}^{13}, {}_1\Delta_{2,2}^7, {}_2\Delta_{15,2}^{14}, {}_2\Delta_{3,3}^8, {}_3\Delta_{9,3}^{15}, {}_3\Delta_{16,3}^9, {}_4\Delta_{10,4}^{16}, {}_4\Delta_{17,4}^{10}, {}_5\Delta_{11,5}^{17}, {}_5\Delta_{18,5}^{11}, {}_6\Delta_{12,6}^{18}, {}_6\Delta_{13,6}^{12} \}$$

- множину трикутників, вершини яких є СТ із різних класів СТ.

Контур внутрішнього шестикутника вважають представленою  $18 {}_j^i[4C]_p^k$ , які при побудові мають початкову геометричну форму ромба **RI** ( $\mathbf{I} \in \mathbf{N}_{18}$ ). В таблиці 4 приведенні усі утворенні ромби **RI** ( $\mathbf{I} \in \mathbf{N}_{18}$ ), які є представниками симплексів  ${}_j^i[4C]_p^k$ , при нормальній роботі ІВ у кластері.

Таблиця 4

**Симплекси-ромби кластера при нормальній роботі ІВ**

Ромби	Симплекси	Ромби	Симплекси	Ромби	Симплекси
1	2	3	4	5	6
R1	${}_{13}^7[4C]_1^{14}$	R7	${}_{6}^{13}[4C]_1^7$	R13	${}_{1}^7[4C]_2^{14}$
R2	${}_{2}^{14}[4C]_{15}^8$	R8	${}_{1}^{14}[4C]_2^8$	R14	${}_{2}^8[4C]_3^{15}$
R3	${}_{3}^{15}[4C]_{16}^9$	R9	${}_{2}^{15}[4C]_3^9$	R15	${}_{3}^9[4C]_4^{16}$
R4	${}_{4}^{16}[4C]_{17}^{10}$	R10	${}_{3}^{16}[4C]_4^{10}$	R16	${}_{4}^{10}[4C]_5^{17}$
R5	${}_{5}^{17}[4C]_{18}^{11}$	R11	${}_{4}^{17}[4C]_5^{11}$	R17	${}_{5}^{11}[4C]_6^{18}$
R6	${}_{6}^{18}[4C]_{13}^{12}$	R12	${}_{5}^{18}[4C]_6^{12}$	R18	${}_{6}^{12}[4C]_1^{13}$

При такому розбитті обвідки внутрішнього шестикутника на 18 симплексів в кожному симплексі дві протилежні СТ визначають трьома ФЗ, при чому один ФЗ визначає відстань між цими СТ. Дві інші протилежні СТ визначають двома ФЗ і одним ГЗ, який визначає відстань між цими СТ.

У кластері СТ можуть одночасно належати одному, двом або трьом симплексам. За цими ознаками СТ поділяють на три групи:

- СТ групи  $C_1$  є вершинами для трьох  ${}_j^i[4C]_p^k$ ;
- СТ групи  $C_2$  є вершинами для чотирьох  ${}_j^i[4C]_p^k$ ;
- СТ групи  $C_3$  є вершинами для п'яти  ${}_j^i[4C]_p^k$ .

**Висновки.** Розглянуто два види візуалізації зміни параметрів сигналів ІВ. Перший вид візуалізації ґрунтується на тому, що первинне положення СТ фіксується у кластері. Другий вид на можливості переміщення СТ у залежності від довжини ФЗ, які визначають точки. Запропоновано чотири методи дослідження трансформації кластерних моделей БСМ під час візуалізації зміни параметрів сигналів ІВ.

**Література**

1. Дорошенко, А.Е. О моделировании сенсорных сетей средствами высокого уровня / А.Е. Дорошенко, К.А. Жереб, Р.С. Шевченко // К.: Проблеми програмування. – 2006. – N 2-3. – С. 718-727 – **Текст: рос. – Бібліогр.: 23 назв.** ISSN 1727-4907.  
 2. Рагозин, Д.В. Моделирование синхронизированных сенсорных сетей / Д.В. Рагозин //

Пробл. програмув. — 2008. — N 2-3. — С. 721-729. **Текст: рос. – Бібліогр.: 12 назв.**

3. Săcăleanu, D. I. Increasing lifetime in grid wireless sensor networks through routing algorithm and data aggregation techniques./ D. I. Săcăleanu, D. M. Ofrim, R. Stoian, & V. Lăzărescu // International Journal of Communications. – 2011. – Volume 5. Pp. 157-164.  
 4. Becher, A. Tampering with notes: Real-world physical attacks on wireless sensor networks / A. Becher, Z. Benenson, M. Dornseif // Lecture Notes in Computer Science, In J. A. Clark, R. F. Paige, F. Po-lack, and P. J. Brooke, editors, SPC, – 2006. – Volume 3934. Pp. 104-118.  
 5. Кулаков Ю.И. Теория физических структур. (Математические начала физической герменевтики) / Ю.И. Кулаков. – М., 2004. – 847 с.  
 6. Мандельброт, Бенуа. Фрактальная геометрия природы/ Бенуа Мандельброт;– Ижевск.: [Институт компьютерных исследований](#), 2010. – 756 с. – ISBN 978-5-93972-872-0  
 7. Шредер, М. Фракталы, хаос, степенные законы./ М. Шредер – Ижевск: РИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 528 с. – ISBN 5-93972-041-2  
 8. Koucheryavy, A. Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks / Andrey Koucheryavy, Salim Ahmed // Advanced Communication Technology. ICACT. 11th International Conference on. – 15-18 Feb. 2009. – Volume:03. Pp. 2141 - 2146

**References**

1. Doroshenko, A.E. O modelirovanii sensornih setej sredstvami visokogo urovnja / A.E. Doroshenko, K.A. Zhereb, R.S. Shevchenko // K.: Problemi programuvannja. – 2006. – N 2-3. – S. 718-727 – **Tekst: ros. – Bibliogr.: 23 nazv.** ISSN 1727-4907.  
 2. Ragozin, D.V. Modelirovanie sinhronizirovannyh sensornyh setej / D.V. Ragozin // Probl. programuv. — 2008. — N 2-3. — S. 721-729. **Tekst: ros. – Bibliogr.: 12 nazv.**

3. Săcăleanu, D. I. Increasing lifetime in grid wireless sensor networks through routing algorithm and data aggregation techniques./ D. I. Săcăleanu, D. M. Ofrim, R. Stoian, & V. Lăzărescu // International Journal of Communications. – 2011. – Volume 5. Pp. 157-164.

4. Becher, A. Tampering with motes: Real-world physical attacks on wireless sensor networks / A. Becher, Z. Benenson, M. Dornseif // Lecture Notes in Computer Science, In J. A. Clark, R. F. Paige, F. Po-lack, and P. J. Brooke, editors, SPC, – 2006. – Volume 3934. Pp. 104-118.

5. Kulakov Ju.I. Teorija fizicheskikh struktur. (Matematicheskie nachala fizicheskoy germenevtiki) / Ju.I. Kulakov. – M., 2004. – 847 s.

6. Mandel'brot, Benua. Fraktal'naja geometrija prirody/ Benua Mandel'brot;– Izhevsk.: Institut komp'yuternyh issledovanij, 2010. – 756 s. – ISBN 978-5-93972-872-0

7. Shreder, M. Fraktaly, haos, stepennye zakony./ M. Shreder – Izhevsk: RIC «Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika», 2001. – 528 s. – ISBN 5-93972-041-2

8. Koucheryavy, A. Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks / Andrey Koucheryavy, Salim Ahmed // Advanced Communication Technology. ICACT. 11th International Conference on. – 15-18 Feb. 2009. – Volume:03. Pp. 2141 - 2146

**Н. Карпинский, В. Чиж, С. Балабан,**

**Т. Яремчук**

**МЕТОДЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ  
СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА СИЛЫ  
СИГНАЛОВ ИНФОРМАЦИОННЫХ УЗЛОВ**

*Качество и долговечность работы беспроводной сенсорной сети (БСМ) оценивают по силе сигналов информационных узлов. Для анализа функционирования сети в целом и каждого узла отдельно используют виртуальные модели, которые создают в компьютерном пространстве на базе реально существующих БСМ.*

**Ключевые слова:** беспроводная сенсорная сеть, информационный узел, геометрическое моделирование,

*графическая визуализация, евклидово конфигурационное пространство, симплекс, гексагональная топологическая сетка.*

**М. Karpinski, V. Chyzh, S. Balaban,  
T. Yaremchuk**

**GEOMETRIC MODELING WIRELESS  
SENSOR NETWORKS FOR ANALYSIS SIGNAL  
STRENGTH INFORMATION NODES**

*The quality and durability of the wireless sensor network (WSN) is estimated by the signal strength information nodes. Virtual models was used for the analysis of the network as a whole and each separate node, that were created using the computers based on real-WSN.*

**Keywords:** wireless touch network, information hub, geometrical modeling, graphic visualization, Euclidean configuration space, simplex, hexagonal topological grid.

**Карпінський Микола Петрович** – доктор технічних наук, професор, керівник відділів “Інформатика” Університету в Бельську-Бялій та Державної вищої технічної школи в Новому Сончі, Польща

**Чиж Віталій Михайлович** – аспірант кафедри «Комп'ютерні науки», Тернопільський національний технічний університет

**Балабан Степан Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «графічного моделювання», Тернопільський національний технічний університет

Яремчук Тамара Олександрівна – викладач, Тернопільський національний технічний університет

**Рецензент:** Петров Олександр Степанович – докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри безпеки інформаційних систем, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Луганськ.