

УДК 621.396.4

О.Я. Сова

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації ДУТ, Київ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАДІОЗВ'ЯЗНОСТІ ВУЗЛІВ МОБІЛЬНИХ РАДІОМЕРЕЖ КЛАСУ MANET

Запропоновано інтелектуальну модель забезпечення радіозв'язності вузлів мобільних радіомереж на основі комплексного застосування нечіткої логіки та нейронних мереж. Суть моделі полягає в інтеграції функцій прикладного, мережевого та фізичного рівнів моделі OSI для підтримання радіозв'язності між мобільними вузлами в процесі передачі інформації. В умовах високої динаміки зміни топології, які характерні радіомережам класу MANET, це дозволить не лише підвищити ймовірність успішного прийому пакетів, але й скоротити енергетичні та часові витрати на їх передачу.

Ключові слова: радіозв'язність, інтелектуальна система управління, мобільна радіомережа, система нечітких правил.

Вступ

Актуальність. Управління бойовими підрозділами в ході сучасних бойових дій вимагає повної поінформованості посадових осіб щодо ситуації, яка склалася на полі бою в той чи інший момент часу. Збір, обробка та відповідна реакція на таку інформацію в тактичній ланці управління військами можливі лише шляхом використання сучасних мереж радіозв'язку, які можуть забезпечити зв'язок за принципом „у будь-якому місці, в будь-який час”. Прикладом таких мереж є мобільні радіомережі класу MANET (*Mobile Ad-Hoc Network*) [1], особливістю функціонування яких є мобільність всіх вузлів, а також здатність самоорганізовуватися в радіомережу без завчасно розгорнутої мережевої інфраструктури в умовах невизначеності (достовірна інформація про ситуацію на полі бою в момент розгортання відсутня). Ще однією особливістю функціонування МР є те, що майже кожен вузол працює від батареї, обмежена ємність якої безпосередньо впливає на „час життя” мобільного вузла і, відповідно, на його здатність приймати участь у прийомі та передачі інформації [2].

В МР передача інформації між відправником та адресатом (адресатами) може здійснюватися як безпосередньо, так і шляхом ретрансляції через проміжні вузли. Основною умовою для успішної передачі або прийому інформації між двома будь-якими вузлами є наявність радіозв'язності між ними. Зважаючи на повну мобільність всіх елементів МР (як вузлів, так і базових станцій) забезпечення радіозв'язності між мобільними вузлами можливе як шляхом управління потужністю передавачів, так і шляхом вибору оптимальних маршрутів передачі між вузлами відправником та адресатом. При цьому і в одному, і в іншому випадку виникає актуальне завдання, яке полягає у виборі таких управлінських рішень, які б з одного боку забезпечили передачу інформації в МР із заданою якістю обслуговування,

а з іншого – мінімізували витрати енергетичних ресурсів мобільних вузлів. З урахуванням умов невизначеності, якими характеризується функціонування МР, та непередбачуваності тактичної обстановки (фізичне знищення вузлів, вплив засобів радіоелектронного подавлення, швидкості та напрямки переміщення вузлів у кожен момент часу можуть змінюватися) для вирішення цього завдання пропонується комплексне використання апарата нечіткої логіки та нейронних мереж.

Відповідно, **мета статті** полягає в розробці математичної моделі забезпечення радіозв'язності вузлів мобільних радіомереж на основі нечіткої логіки та апарату нейронних мереж. **Об'єктом** дослідження є процес передачі інформації в МР класу MANET. **Предметом** дослідження є інтелектуальна модель забезпечення радіозв'язності мобільних вузлів.

Основний розділ

Аналіз предметної області. Як зазначалося вище, в залежності від топології МР, яка визначається організаційною структурою бойових підрозділів у тактичній ланці управління військами (рис. 1), передача інформації між відправником та адресатом (адресатами) у МР може здійснюватися як безпосередньо, так і шляхом ретрансляції через проміжні вузли з використанням попередньо визначених маршрутів (чи маршруту) передачі [3]. Однак, у будь-якому випадку в МР успішна передача між двома вузлами може відбутися лише за наявності радіозв'язності між ними. Відсутність радіозв'язності, або її втрата в процесі передачі інформації, призведе до неможливості організації зв'язку між вузлами, або розриву існуючого маршруту передачі. У першому випадку це може безпосередньо вплинути на якість управління бойовими підрозділами через неможливість доставки команд управління до окремих бойових одиниць. У другому – негативно вплине на якість передачі інформації через затримки, пов'язані з необхідністю пошуку нових маршрутів між відправником та адресатом.

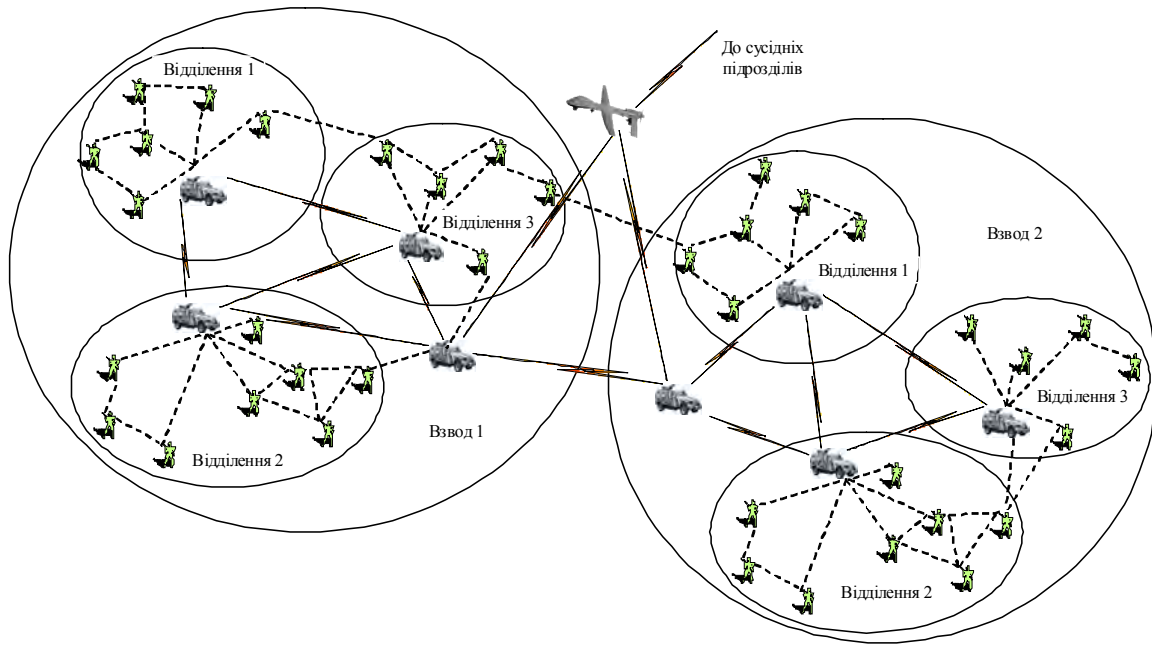


Рис. 1. Зони радіозв'язності мобільних вузлів МР (відділення-взвод)

Під радіозв'язністю Z_{ij} будемо розуміти взаємне знаходження вузла-відправника i та вузла-адресата j в зоні радіовидимості один одного (рис. 2), що дозволяє забезпечити задану якість обслуговування (QoS) ξ -го типу трафіка. У загальному випадку на фізичному рівні моделі OSI якість об-

слуговування кожного типу трафіка $\xi = \overline{1, 3}$ (дані, мова, відео) визначається допустимим значенням ймовірності помилкового прийому бітів інформації $BER_{\xi_{ij}}$ (Bit Error Rate) [4], яка оцінюється на основі статистичних даних.

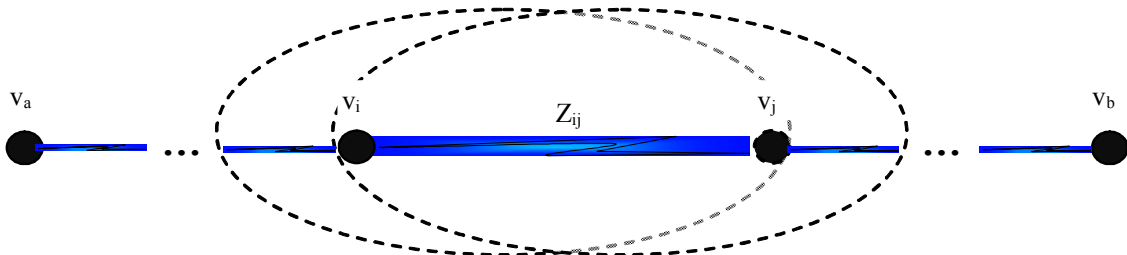


Рис. 2. Радіозв'язність між двома вузлами МР яке, в свою чергу, визначається відношенням

Однак, враховуючи динамічну природу функціонування МР та високу швидкість зміни параметрів радіоканалу вважатимемо, що рішення щодо якості обслуговування трафіка будуть прийматися вузловою СУ на основі поточних значень відношення сигнал/шум (SINR) на вході приймача (коефіцієнт помилок [5]):

$$BER_{\xi_{ij}} = f(SINR_{ij}); \quad (1)$$

$$SINR_{ij} = p_i G_{ij} / \left(\sum_{k \neq j} p_k G_{kj} + \eta_j \right); \quad (2)$$

$$G_{ij} = k_a F d_{ij}^{-\alpha}, \quad (3)$$

де $i, j, k \in N$ – вузли зони МР; p_i – потужність передачі i -го вузла; G_{ij} – величина загасання між вузлами $i - j$; k_a – коефіцієнт, що враховує характеристики антен; F – множник ослаблення; d_{ij} – відстань між

вузлами $i - j$; $\alpha = 2...4$ – ступінь втрати потужності в залежності від умов поширення радіохвиль; η_j – спектральна щільність потужності шуму у смузі пропускання приймача. При цьому, для виключення переривань зв'язку, пов'язаних з різким зменшенням SINR на прийомі (через збільшення рівня шуму в радіоканалі, або через завмирання сигналу, тощо), необхідно, щоб виконувалися такі умови:

$$SINR_{ij} \geq SINR_{доп}; \quad (4)$$

$$p_c - p_{рч} \geq p_{ез}, \quad (5)$$

де $SINR_{доп}$ – визначається конкретною моделлю та параметрами прийомопередавача мобільного вузла; $p_{рч}$ – реальна чутливість приймача; $p_{ез}$ – енергетичний запас. Необхідність введення коефіцієнта $p_{ез}$ пов'язана з тим, що вузол повинен мати час для

прийняття рішення з управління потужністю передавача у випадку різкої зміни потужності сигналу на прийомі p_{ij} , яка залежить від швидкості руху мобільних вузлів та умов поширення радіохвиль.

Основними причинами втрати радіозв'язності між вузлами МР можуть бути: знищення мобільного вузла, розрядження вузлової батареї та вихід вузла за межі зони взаємної радіовидимості. При цьому, як зазначалося вище, останні дві причини безпосередньо залежать від потужності з якою здійснюється передача інформації мобільним вузлом, однак мають різну фізичну природу: збільшення потужності передачі вузлів приводить до збільшення ймовірності успішного прийому пакетів, проте вимагає більших витрат енергії батарей і створює високий рівень взаємних завад, що в результаті спричиняє різке зниження пропускної спроможності радіомережі.

У стаціонарних безпроводових телекомунікаційних мережах (зокрема, стандартів GSM, CDMA, 802.11), де мобільними являються лише абоненти, а маршрути передачі між ними будуються через стаціонарну мережу зв'язку, управління радіозв'язністю вузла з базовою станцією здійснюється шляхом зміни потужності передачі $p_{ij}(t)$. Для цього використовується показник RSSI (англ. *Received Signal Strength Indication*), який визначає рівень потужності сигналу на прийомі [6]: якщо значення RSSI низьке – приймається рішення щодо підвищення потужності сигналу передавача, і навпаки. Наприклад, у стільникових мережах з кодовим розділенням каналів управління потужністю здійснюється за таким ітераційним правилом [7]:

$$p_{ij}(t) = \min_{p_{ij} \leq p_{ij\max}} \left(\frac{\text{SINR}_{\text{доп}}}{\text{SINR}_{ij}(t-1)} p_{ij}(t-1) \right). \quad (6)$$

Як видно з виразу (6), вузли стаціонарних радіомереж здійснюють вибір мінімального значення потужності лише на основі співвідношення $\text{SINR}_{\text{доп}}/\text{SINR}_{ij}(t-1)$. Тобто, якщо рівень сигналу перевищує поріг, то потужність передачі зменшується і навпаки. При цьому вважається, що робота вузла-відправника на мінімальній потужності передачі дозволить мінімізувати витрати ємності вузлових батарей (хоча даний показник не враховується під час прийняття рішення з управління потужністю передачі) та зменшити рівень взаємних завад у радіомережі.

Однак, головною відмінністю МР від стільникових мереж зв'язку є відсутність базових станцій і, як наслідок, стаціонарних маршрутів передачі між вузлами відправником та адресатом, що робить проблему маршрутизації однією з найважливіших при проектуванні МР класу MANET. Крім того, як зазначалося вище, повна витрата ємності батареї вузла, який використовується в тактичній радіомережі, призведе не тільки до неможливості приймати та передавати інформацію даним вузлом, але й до неможливості використання даного вузла в якості ретранслятора.

Це, в свою чергу, може призвести до суттєвих топологічних змін у МР, які негативно вплинуть як на якість передачі інформації в МР так і на якість управління бойовими підрозділами в цілому.

Зазначені вище особливості МР класу MANET потребують нових підходів до вирішення завдання забезпечення радіозв'язності між вузлами. Одним із таких підходів є пошук та використання оптимальних маршрутів передачі між відправником та адресатом, що, в сукупності з управлінням потужністю передачі, дозволить не лише підвищити ймовірність успішного прийому пакетів (за рахунок збільшення SINR), але й скоротити енергетичні та часові витрати на їх передачу [8]. Це пояснюється тим, що залежність необхідної потужності передачі від відстані носить нелінійний характер, тому маршрут, що складається з декількох „коротких” інтервалів, витрачає менше енергії, ніж маршрут, який складається з „довгих” – $p_{ij} > p_{ik} + p_{kj}$, хоча затримка передачі пакетів за таким маршрутом буде більшою $t_{ij} < t_{ik} + t_{kj}$ (рис. 3).

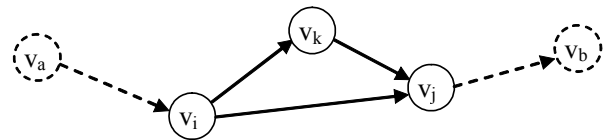


Рис. 3. Приклад мережі

Для цього в протоколах маршрутизації, запропонованих для використання в МР [2], в якості метрики вартості маршруту, крім часу затримки передачі пакетів, пропонується використовувати мінімальний рівень потужності передачі між вузлами і та j при забезпеченні заданого значення ймовірності бітової помилки (1), показник, який відображає стан вузлової батареї в момент часу $e_i^6(t)$, а також пріоритет інформації $\Pi_{\xi_{ij}}$, яка передається в радіоканалі.

Вихідні дані та постановка задачі. Для побудови моделі радіозв'язності мобільних вузлів введемо наступні позначення вхідних параметрів, обмеження та допущення.

Параметри МР: мережа представляється направленим графом $G = (V, E)$, де $V = \{v_i\}$, $i = \overline{1, N}$ – множина випадково розташованих вузлів, кожен має ідентифікаційний номер, та $E = \{e_l\}$, $l = \overline{1, L}$ – множина радіоканалів між мобільними вузлами (симетричні, напівдуплексні). N – загальна кількість вузлів МР.

Параметри вузла МР: кожен вузол обладнаний батареєю, ємність якої в кожен момент часу t не може бути вищою за деяке максимальне значення $e_i^6(t) \leq e_{i\max}^6$. Вузли МР мають можливість змінювати потужність передавача в залежності від обстановки $p_i(t) \leq p_{i\max}$. Також, приймач кожного мобільного вузла характеризується реальною чутливістю p_{rci} , яка визначає мінімальну потужність сигналу p_c , який може

бути прийнятий вузлом. У складі кожного мобільного вузла функціонує інтелектуальна система управління (ICU), що складається з множини підсистем, які виконують функції управління вузловими та мережевими ресурсами відповідно до рівнів моделі OSI [9]. У [10] запропоновано для побудови підсистем вузлової ICU використовувати технології обробки знань та інтелектуальних агентів (IA), що забезпечить можливість ICU приймати управлінські рішення в умовах невизначеності та неповноти інформації про МР.

Параметри інформаційного обміну: кількість адресатів при кожній сесії – один (однокористувальницька передача); m_{ab} – маршрут між вузлом-відправником v_a та вузлом-адресатом v_b , який складається з h інтервалів ретрансляцій ($h = \overline{1, N-1}$); побудова маршруту між відправником та адресатом здійснюється за протоколом OLSR [11], який забезпечує вузол-відправник інформацією про вузлів-сусідів v_k , що знаходяться на відстані одного-двох інтервалів ретрансляцій.

Допущення та обмеження: відповідно до організаційної побудови підрозділів у тактичній ланці управління, найменшою зоною МР, у якій повинна забезпечуватися постійна радіозв'язність між вузлами, є множина вузлів відділення чи взводу (рис. 1), тобто вважатимемо, що $N \leq 10$. Як видно з рис. 1, у межах зони (відділення) з'єднання між мобільними вузлами відбувається або безпосередньо, або шляхом побудови маршрутів з використанням мінімальної кількості ретрансляцій (зазвичай до трьох). Приймаючи до уваги те, що кожен вузол володіє інформацією про сусідні з ним вузли, а також децентралізований принцип управління МР та динамічну природу їх функціонування (часті зміни топології МР спричинені мобільністю усіх вузлів), можна зробити висновок, що питання радіозв'язності доцільно розглядати окремо між кожною парою вузлів, які утворюють h -й інтервал, а не на всьому маршруті передачі m_{ab} .

Для спрощення множину параметрів, які визначають стан вузла та МР, позначимо $X = \{x_b(t)\}$, $b = \overline{1, B}$.

Необхідно: розробити математичну модель забезпечення радіозв'язності вузлів МР, яка, з урахуванням ситуації $X(t) = \{x_b(t)\}$, $b = \overline{1, B}$, що склалася в МР (чи її зоні), дозволить прийняти такі управлінські рішення на фізичному $U_\phi(t)$ та мережевому $U_m(t)$ рівнях моделі OSI, які відповідатимуть системній цільовій функції

$$U^*(t) = \arg \underset{U_\phi(t), U_m(t) \in \Omega}{\text{opt}} Y(t)(X(t), U_\phi(t), U_m(t)); \quad (7)$$

$$\forall Z_{ij} = 1, i, j \in N, i \neq j,$$

де $Y(t) = P(t) \cup M(t); \quad (8)$

$$X(t) = \left\{ \begin{array}{l} p_{ij}(t), p_c(t), p_{pc}, \text{BER}_{\xi_{ij}}(t), \dots \\ \dots, m_{ab}, e_i^6(t), \xi(t), \Pi_{\xi_{ij}} \end{array} \right\}, \quad (9)$$

і дозволять мінімізувати витрати енергоресурсу мобільних вузлів та забезпечити задану якість обслуговування ξ -го типу трафіка на маршруті передачі m_{ab} при виконанні обмежень на ресурси

$$\Omega = \{p_{ij} \leq p_{i\max}, p_c(t) \geq p_{pc}, \text{BER}_{\xi_{ij}}(t) \leq \text{BER}_{\text{дон}\xi}, \dots, e_{ij\min}^6 < e_i^6 \leq e_{i\max}^6\}, \quad (10)$$

де $U_\phi(t)$ – множина управляючих рішень вузлової СУ на фізичному рівні моделі OSI щодо вибору оптимальних значень потужності передачі $P(t) = \{p_{ij}(t)\}$, $i, j = \overline{1, N}$ в радіоканалі ij ; $U_m(t)$ – множина управляючих рішень на мережевому рівні моделі OSI щодо вибору оптимальних маршрутів передачі $M(t) = \{m_{ab}(t)\}$, $a, b = \overline{1, N}$ між вузлами відправником v_a та адресатом v_b або проміжними вузлами v_i та v_j на маршруті m_{ab} ; $e_{ij\min}^6$ – мінімально допустима ємність батареї, необхідна для забезпечення передачі потокового трафіка об'ємом, який визначений у межах поточного з'єднання (для пульсуючого/випадкового трафіка, наприклад мова чи відео в режимі реального часу, визначається мінімально-допустимою ємністю батареї $e_{ij\min}^6$, необхідною для функціонування вузла); $\Pi_{\xi_{ij}}$ – пріоритет ξ -го типу трафіка в каналі ij .

Математична модель забезпечення радіозв'язності вузлів МР. Відповідно до виразів (1) – (5) на фізичному рівні моделі OSI умову успішної передачі інформації між кожною парою вузлів $i - j$ на маршруті передачі m_{ab} (чи двома вузлами a та b) можна записати у вигляді системи:

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } \text{BER}_{\text{дон}\xi} - \text{BER}_{\xi_{ij}}(t) > 0; \\ 0, \text{ у іншому випадку,} \end{cases} \quad (11)$$

де Z_{ij} – радіозв'язність між вузлами i та j ($i, j \in N, i \neq j$); N – загальна кількість вузлів МР чи її зони; $\text{BER}_{\xi_{ij}}(t)$ – визначене значення ймовірності помилки для ξ -го типу трафіка в момент часу t ; $\text{BER}_{\text{дон}\xi}$ – допустиме значення ймовірності помилки для ξ -го типу трафіка.

Як зазначалося вище, у разі відсутності прямої видимості між відправником та адресатом радіозв'язність може бути забезпечена шляхом побудови маршрутів передачі між ними [3]. Приймаючи до уваги те, що під час передачі інформації маршрутом, який складається з h , $h = \overline{1, N-1}$ інтервалів (ретрансляцій), кількість невиправлених помилок на кожному інтервалі буде додаватися [5, 4], вираз (11) перепишемо в такому вигляді:

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } \text{BER}_{\text{доп}\xi} - \sum_{h=1}^H \text{BER}_{\xi}^h(t) > 0; \\ 0, \text{ у іншому випадку,} \end{cases} \quad (12)$$

де $\text{BER}_{\xi}^h(t)$, $h = \overline{1, H}$ – визначене значення ймовірності помилки для ξ -го типу трафіка в момент часу t між двома вузлами на маршруті передачі, які відповідають h -му інтервалу ретрансляції.

У загальному випадку на фізичному рівні взаємодія між двома вузлами в процесі передачі інформації може бути описана такою системою рівнянь:

$$\begin{cases} \text{BER}_{\xi ij}(t) = f(p_{ij}(t), \text{BER}_{\xi ij}(t-1)), \\ p_{ij}(t) = g(u_i(t), p_{ij}(t-1)), \end{cases} \quad (13)$$

де $p_{ij}(t), p_{ij}(t-1) \in P(t)$ – потужності вузла-передавача в поточний (t) та попередній ($t-1$) моменти часу, відповідно; $\text{BER}_{\xi ij}(t)$ та $\text{BER}_{\xi ij}(t-1)$ – визначені вузлом-приймачем значення ймовірності помилки для ξ -го типу трафіка в моменти часу (t) та ($t-1$), відповідно; $u_i(t) \in U_{\phi}(t)$ – управлінське рішення вузла i щодо вибору необхідного значення потужності передавача.

Однак, вирази (11) – (13) не враховують вплив ємності вузлових батарей та наявних маршрутів передачі на можливість забезпечення радіозв'язності між вузлами. Так як зазначені параметри $X(t) = \{x_b(t)\}$, $b = \overline{1, B}$ відносяться до різних рівнів моделі OSI (фізичного та мережевого), то, відповідно до запропонованої в [12, 13] крос-рівневої моделі мережевої архітектури, взаємодію рівнів щодо забезпечення радіозв'язності вузлів у МР можна представити у вигляді наступної схеми (рис. 4). Як видно з рисунка, інформація про множину параметрів $X(t)$ поступає на крос-рівень, який відіграє роль бази даних службової інформації. Подальша обробка даної інформації здійснюється вузловою ІСУ з метою прийняття управлінських рішень щодо вибору необхідного значення потужності передавача, яке відповідає поточній ситуації в МР, або зміни існуючого маршруту передачі.

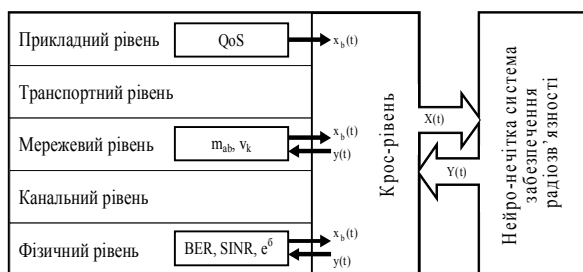


Рис. 4. Приклад міжрівневої взаємодії

Як і в будь-якій ІСУ, центральне місце вузлової ІСУ займає база знань (БЗ), у якій міститься інформація про стан вузлів та МР в цілому, а також правила використання цієї інформації щодо здійснення

управління вузловими та мережевими ресурсами. Враховуючи неточність службової інформації та неповноту знань про ситуацію в МР, які викликані складністю МР як системи та динамічною природою функціонування її елементів, в [10] запропоновано комплексне застосування апарата нечітких множин [14] та нейронних мереж [15] для побудови правил БЗ. Застосування нейро-нечіткої системи забезпечить вузлову ІСУ такими можливостями як самонавчання, адаптація, накопичення та систематизація знань про ситуацію, яка склалася в МР.

З урахуванням цільової функції (7) прийняття рішень нейро-нечіткою системою забезпечення радіозв'язності вузлів можна представити таким чином:

$$y^* = f_y(x_1^*, x_2^*, \dots, x_b^*), \quad b = \overline{1, B} \quad (14)$$

де $X^* = \langle x_1^*, x_2^*, \dots, x_b^* \rangle$ – вектор фіксованих значень змінних, які поступають на вхід вузлової ІСУ; y^* – значення вихідної змінної, яка відображає вибраний рівень потужності передавача або рішення щодо переходу на нові маршрути передачі. Відповідно до системи рівнянь (13) та цільової функції (7) у якості вхідних змінних нейро-нечіткої системи забезпечення радіозв'язності пропонується використовувати наступні параметри оцінки стану вузла та МР: $x_1^* = p_{ij}(t-1)$ – значення потужності передавача вузла-відправника в момент часу ($t-1$); $x_2^* = \text{BER}_{\xi ij}(t) - \text{BER}_{\xi ij}(t-1)$ – різниця між значеннями ймовірності помилки для ξ -го типу трафіка, які визначені вузлом-приймачем в моменти (t) та ($t-1$); $x_3^* = e_j^{\delta}$, $e_{ij \min}^{\delta} < e_j^{\delta} \leq e_{j \max}^{\delta}$ – ємність батареї вузла-адресата (або проміжного вузла на маршруті m_{ab}); $x_4^* = \{v_k\}$, $k \in N$ – інформація про вузли-сусіди, які в момент часу (t) знаходяться в зоні радіозв'язності i -го вузла ($Z_{ik} = 1$); $x_5^* = \Pi_{\xi ij}$ – пріоритет трафіка, який передається в каналі ij (високий пріоритет присвоюється командам бойового управління та трафіку реального часу, нижчі ступені пріоритету – у трафіка, який не функціонує в режимі реального часу та не вимагає гарантій якості обслуговування [12]).

Задача прийняття рішення із забезпечення радіозв'язності вузлів полягає в тому, щоб на основі інформації про вектор входів X^* визначити вихід $y^* \in Y$. Для вирішення даної задачі формується система нечітких правил (СНП) типу R: якщо $x_1 \in a_{1m}$ ТА $x_2 \in a_{2m}$ ТА ... ТА $x_b \in a_{bm}$, ТО $y \in d_h$,

$$(b = \overline{1, B}); (h = \overline{1, H}); (m = \overline{1, M}), \quad (15)$$

де a_{bm} – m -та лінгвістична оцінка (терм) вхідної змінної x_b , яка вибирається з відповідної термножини A_b ; d_h – h -та лінгвістична оцінка вихідної змінної y , яка визначена з термножини можливих рішень D :

$$A_b = \{a_{b1}, a_{b2}, \dots, a_{bm}\};$$

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_h\}.$$

В табл. 1 наведені базові значення нечітких термів зазначених вище терм-множин вхідних та вихідної лінгвістичних змінних. На рис. 5 зображені функції належності для вхідних та вихідних змінних. Як видно з рисунку, з метою забезпечення максимальної швидкодії нейро-нечіткої системи забезпечення радіозв'язності пропонується використовувати параметричні, нормальні, унімодальні, трикутні функції належності [16].

Відповідно до значень лінгвістичних термів, які відображають рішення нейро-нечіткої системи забезпечення радіозв'язності між вузлами МР (табл. 1), в роботі запропоновано дві групи СНП: правила управління потужністю передачі вузла-відправника та правила вибору альтернативних маршрутів передачі до вузла-адресата. При цьому, кожна з груп правил повинна передбачати два випадки побудови маршрутів переда-

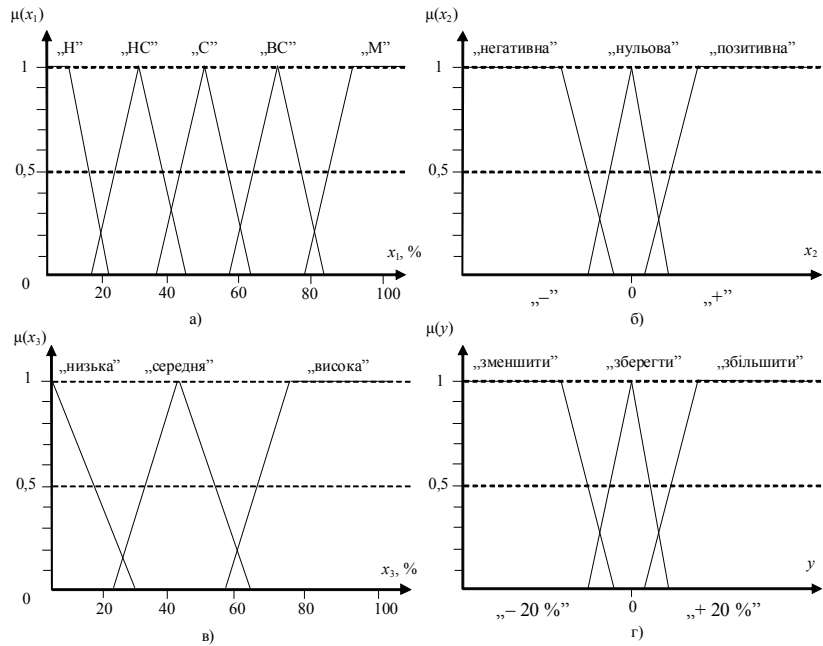


Рис. 5. Приклади функцій належності

чі: коли вузол-відправник та вузол-адресат з'єднані безпосередньо (маршрут передачі складатиметься з одного інтервалу, $i = a$ та $j = b$, $i, j, a, b \in N$) та коли маршрут складається з h , $h = 1, N - 1$ інтервалів (рис. 3).

Таблиця 1

Параметри бази знань нейро-нечіткої системи забезпечення радіозв'язності

Змінні	Значення лінгвістичних термів	Примітка
x_1^* – потужність передавача	a_1^1 – низька (Н); a_1^2 – нижче середньої (НС); a_1^3 – середня (С); a_1^4 – вище середньої (ВС); a_1^5 – максимальна (М)	Чіткі значення величин, що отримуються з фізичного рівня
x_2^* – різниця значень ймовірності помилки	a_2^1 – негативна; a_2^2 – нульова; a_2^3 – позитивна	
x_3^* – залишкова ємність батарей	a_3^1 – висока; a_3^2 – середня; a_3^3 – низька	
x_4^* – вузли-сусіди	a_4^1 – немає; a_4^2 – один; a_4^3 – більше одного	Чіткі значення величин, що отримуються з мережевого рівня
x_5^* – пріоритет трафіка	a_5^1 – високий; a_5^2 – середній; a_5^3 – низький	Чіткі попередньо запрограмовані значення величин, що отримуються з прикладного рівня
y^* – рішення щодо забезпечення радіозв'язності	d^1 – зменшити потужність передавача; d^2 – зберегти потужність передавача на попередньому рівні; d^3 – збільшити потужність передавача; d^4 – перейти на новий маршрут до вузла-адресата; d^5 – ініціювати пошук нових маршрутів до вузла-адресата за критерієм $\min p_{ij}^*$; d^6 – продовжити передачу існуючим маршрутом; d^7 – перейти в режим очікування радіозв'язності з вузлами-сусідами	Чіткі значення потужності передавача (на фізичному рівні) або рішення щодо вибору альтернативних маршрутів передачі (на мережевому рівні)

Примітка: * в залежності від вибраного методу маршрутизації можуть використовуватися і інші критерії (метрики) пошуку маршруту, наприклад, мінімальний час затримки передачі, максимальна ємність батарей, тощо.

Наведемо приклади правил для кожного випадку.

1. *Безпосереднє з'єднання вузлів відправника та адресата.*

1.1. Група правил управління потужністю передачі вузла-відправника буде мати такий вигляд:

Правило 1.1.1: ЯКЩО потужність передавача „низька” ТА різниця значень ймовірності помилки на прийомі „позитивна” ТА залишкова ємність батарей вузла-адресата „висока” ТО „збільшити потужність передавача”.

Правило 1.1.2: ЯКЩО потужність передавача „середня” ТА різниця значень ймовірності помилки на прийомі „негативна” ТА залишкова ємність батареї вузла-адресата „середня” ТО „зменшити потужність передавача”.

Правило 1.1.3: ЯКЩО потужність передавача „висока” ТА різниця значень ймовірності помилки на прийомі „нульова” ТА залишкова ємність батареї вузла-адресата „низька” ТО „зберегти потужність передавача на попередньому рівні”.

1.2. Правила вибору альтернативних маршрутів передачі будуть використовуватися нейро-нечіткою системою у випадку, коли забезпечення заданої якості обслуговування трафіка не можливо досягти шляхом підвищення потужності передавача ($p_{ab}(t) = p_{a,max}$):

Правило 1.2.1: ЯКЩО потужність передавача „максимальна” ТА різниця значень ймовірності помилки на прийомі „позитивна” ТА вузлів сусідів „один” ТО „перейти на новий маршрут до вузла-адресата” (рис. 6).

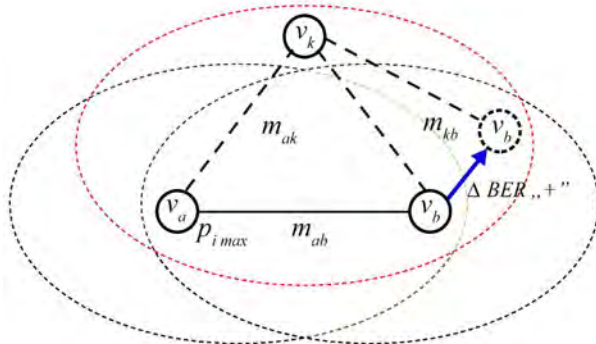


Рис. 6. Приклад реалізації правила переходу на новий маршрут передачі при максимальній потужності передавача та високих значеннях коефіцієнта помилки на прийомі

Правило 1.2.2: ЯКЩО потужність передавача „максимальна” ТА різниця значень ймовірності помилки на прийомі „позитивна” ТА вузлів сусідів „більше одного” ТО „ініціювати пошук нових маршрутів до вузла-адресата за критерієм $\min p_{ij}$ ”.

Правило 1.2.3: ЯКЩО потужність передавача „максимальна” ТА різниця значень ймовірності помилки на прийомі „позитивна” ТА вузлів сусідів „немає” ТО „перейти в режим очікування радіозв'язності з вузлами-сусідами”.

2. З'єднання вузлів відправника та адресата за допомогою маршруту m_{ab} .

2.1. Група правил управління потужністю передачі вузла-відправника для випадку, коли вузли i та j є проміжними (ретрансляторами) на маршруті передачі m_{ab} , буде мати такий же вигляд, як і у випадку безпосереднього з'єднання вузлів (правила 1.1.1 – 1.1.3).

2.2. Правила вибору альтернативних маршрутів. Як зазначалося вище, втрата радіозв'язності між проміжними вузлами на маршруті передачі (через мобільність вузлів або виснаження ємності акумуляторних

батареї) може призвести до розриву існуючого маршруту i , як наслідок, спричинить затримки передачі пакетів з даними, пов'язані з необхідністю пошуку нових маршрутів між відправником та адресатом. Для уникнення такої ситуації, крім правил 1.2.1 – 1.2.3, пропонуються правила вибору альтернативних маршрутів передачі, які враховують параметр ємності батареї j -го вузла та пріоритет трафіка, який передається:

Правило 2.2.1: ЯКЩО потужність передавача „вище середньої” ТА різниця значень ймовірності помилки на прийомі „негативна” ТА залишкова ємність батареї j -го вузла „низька” ТА вузлів сусідів „один” ТО „перейти на новий маршрут до вузла-адресата”.

Правило 2.2.2: ЯКЩО потужність передавача „вище середньої” ТА різниця значень ймовірності помилки на прийомі „нульова” ТА залишкова ємність батареї j -го вузла „низька” ТА вузлів сусідів „більше одного” ТО „ініціювати пошук нових маршрутів до вузла-адресата за критерієм $\min p_{ij}$ ” (рис. 7).

Правило 2.2.3: ЯКЩО потужність передавача „середня” ТА різниця значень ймовірності помилки на прийомі „нульова” ТА залишкова ємність батареї j -го вузла „низька” ТА вузлів сусідів „немає” ТА пріоритет трафіка „високий” ТО „продовжити передачу існуючим маршрутом”.

Наведені вище приклади правил є орієнтовними і можуть використовуватися у якості навчальної вибірки на етапі навчання нейро-нечіткої системи забезпечення радіозв'язності. Реальна кількість правил у базі знань буде значно більшою і залежатиме від вибраного алгоритму навчання нейро-нечіткої системи, у якості якого може бути використана комбінація градієнтного спуску у вигляді алгоритму зворотного поширення помилки і методу найменших квадратів [17]. Алгоритм зворотного поширення помилки налаштовує параметри підумов правил, тобто функцій належності. Методом найменших квадратів оцінюються коефіцієнти висновків правил, тобто вони лінійно пов'язані з виходом мережі.

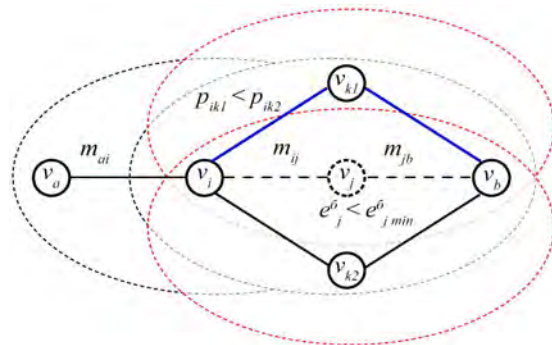


Рис. 7. Приклад реалізації правила переходу на нові маршрути передачі при низькій ємності батареї проміжного вузла на маршруті передачі

Висновки

Таким чином, в статті вперше запропоновано інтелектуальну модель забезпечення радіозв'язності

вузлів МР класу MANET. Суть моделі полягає в інтеграції функцій прикладного, мережевого та фізичного рівнів моделі OSI для підтримання радіозв'язності між мобільними вузлами в процесі передачі інформації. На відміну від запропонованих для стаціонарних радіомереж моделей, які забезпечують радіозв'язність між радіовузлом та базовою станцією шляхом управління потужністю передачі, в представленій інтелектуальній моделі додатково пропонується вирішувати завдання забезпечення радіозв'язності між мобільними вузлами шляхом пошуку та використання оптимальних маршрутів передачі між відправником та адресатом, з урахуванням ємності батареї вузлів, які приймають участь у формуванні маршруту. Для цього, на основі комплексного використання нечіткої логіки та апарата нейронних мереж, в моделі запропоновано дві групи нечітких правил, які, в залежності від параметрів стану вузлів, дозволяють вибрати необхідне значення потужності передачі вузла-відправника або прийняти рішення щодо необхідності використання альтернативних маршрутів передачі до вузла-адресата. В умовах високої динаміки зміни топології, які характерні МР класу MANET, це дозволить не лише підвищити ймовірність успішного прийому пакетів, але й скоротити енергетичні та часові витрати на їх передачу.

У ході подальших досліджень буде розроблено імітаційну модель оцінки радіозв'язності вузлів МР у залежності від їх розташування, потужності передачі та ємності вузлових батарей.

Список літератури

1. Conti M. Mobile ad hoc networking: milestones, challenges, and new research directions / M. Conti, S. Giordano // *Communications Magazine, IEEE*. – Vol. 52, Issue 1. – P. 85-96.
2. Миночкин А.И. Управление энергоресурсом мобильных радиосетей / Миночкин А.И., Романюк В.А. // *Зв'язок*. – 2004. – № 8. – С. 50-53.
3. Миночкин А.И. Маршрутизация в мобильных радиосетях – проблема и пути решения / А.И. Миночкин, В.А. Романюк // *Зв'язок*. – 2006. – № 7. – С. 49-55.
4. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации / А. Голдсмит. – М.: Техносфера, 2011. – 904 с.
5. Голяницкий И.А. Математические модели и методы в радиосвязи / И.А. Голяницкий; под ред. Ю.А. Громакова. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 440 с.
6. Sauter M. From GSM to LTE: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband / M. Sauter. – Wiley, 2010. – 480 p.
7. Elbatt T. Joint Scheduling and Power Control for Wireless Ad Hoc Networks / T. Elbatt, A. Ephremides // *IEEE Trans. on Wireless Commun.* – 2004. – № 1. – P. 55-60.
8. Миночкин А.И. Управление топологией мобильной радиосети / Миночкин А.И., Романюк В.А. // *Зв'язок*. – 2003. – № 2. – С. 28 – 33.
9. Проблема построения системы управления в сетях MANET: XX Межд. Крымск. конф. [„СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии“], (КрыМиКо). / [В.А. Романюк, О.Я. Сова, А.В. Жук, Д.А. Миночкин]. – Севастополь, 2010. – С. 43-44.
10. Методи обробки знань про ситуацію в мобільних радіомережах класу MANET для побудови вузлових інтелектуальних систем управління / [О.Я. Сова, В.А. Романюк, Д.А. Міночкин, А.В. Романюк] // *Збірник наукових праць ВПІ ДУТ*. – 2014. – № 1. – С. 97-110.
11. Кирьянов А. Методы исследования переходных характеристик протокола OLSR при включении/выключении узла связи / А. Кирьянов, А. Сафонов, Е. Хоров // *Труды 33-й конференции ИППИ РАН "Информационные технологии и системы (ИТуС)"*. – 2010. – С. 20-29.
12. Investigating Communication Architecture For Tactical Radio Networks Design / [B. Suman, S.C. Sharma, M. Pant, S. Kumar] // *Int. Journal of Research in Engineering & Applied Sciences*. – Vol. 2, Issue 2. – 2012. – P. 106-118.
13. Романюк В.А. Напряжки підвищення ефективності функціонування тактичних мобільних радіомереж: VII НПС [„Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення“] / В.А. Романюк. – К.: ВПІ ДУТ, 2013. – С. 40-56.
14. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 166 с.
15. Рутковский Л. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / Л. Рутковский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2010. – 520 с.
16. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: ГИИТ, 2004. – 452 с.
17. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

Надійшла до редколегії 15.04.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Кувшинов, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації ДУТ, Київ.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИОСВЯЗНОСТИ УЗЛОВ МОБИЛЬНЫХ РАДИОСЕТИ КЛАССА MANET

О.Я. Сова

Предложена интеллектуальная модель обеспечения радиосвязности узлов мобильных радиосетей на основе комплексного применения нечеткой логики и нейронных сетей. Суть модели заключается в интеграции функций прикладного, сетевого и физического уровней модели OSI для поддержания радиосвязности между мобильными узлами в процессе передачи информации. В условиях высокой динамики изменения топологии, которые характерны радиосетям класса MANET, это позволит не только повысить вероятность успешного приема пакетов, но и сократить энергетические и временные затраты на их передачу.

Ключевые слова: радиосвязность, интеллектуальная система управления, мобильная радиосеть, система нечетких правил.

AN INTELLECTUAL MODEL OF THE MOBILE NODES RADIO CONNECTIVITY IN THE MANET

O.Ya. Sovva

An intellectual model of the mobile nodes radio connectivity in the MANET based on the complex application of fuzzy logic and neural networks is proposed in the article. The essence of the model is the functions integration of an application, network and physical OSI model layers to maintain radio connectivity between mobile nodes during information transmission. Under conditions of frequent topology changes that are characteristic of the MANET, it will not only increase the probability of successful packets receiving, but also reduce energy and time expenses for their transmission.

Keywords: radiocoherentness, intellectual control the system, mobile radio network, system of unclear rules.