

УДОСКОНАЛЕНИЙ ІМОВІРНІСНИЙ МЕТОД УПРАВЛІННЯ ДОСТУПОМ ДО СЕРЕДОВИЩА ПЕРЕДАЧІ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ РАДІОМЕРЕЖ НА ОСНОВІ TDMA

У статті на основі аналізу імовірного методу завдання часових слотів для мобільних радіомереж на основі TDMA показано, що у мережах, в яких існує множина непризначених часових слотів, доцільно визначити ймовірність використання вузлами непризначених слотів диференційовано, з урахуванням їх рівня ієрархії в мережі та швидкості руху. Пропонується удосконалений імовірнісний метод, при якому кожним вузлом потенційно використовуються всі часові слоти, причому вузлом з „вищим пріоритетом” надається більша ймовірність доступу.

Загребельний О.Ю. Усовершенствованный вероятностный метод управления доступом к среде передачи для мобильных радиосетей на основе TDMA. В статье на основе анализа вероятностного метода задания временных слотов для мобильных радиосетей на основе TDMA показано, что в сетях, в которых существует множество неназначенных временных слотов, целесообразно определять вероятность использования узлами неназначенных слотов дифференцированно, с учетом их уровня иерархии в сети и скорости движения. Предлагается усовершенствованный вероятностный метод, при котором каждым узлом потенциально используются все временные слоты, причем узлом с „высшим приоритетом” предоставляется большая вероятность доступа.

O. Zagrebelny Improved probabilistic method of media access control for TDMA mobile radio networks. In the article, based on the analysis of the probabilistic method for setting time slots for mobile radio networks based on TDMA, it is shown that in networks in which there are many unassigned time slots, it is expedient to determine the probability of using nodes of unassigned slots differentially, taking into account their hierarchy level in the network and the speed of movement. An improved probabilistic method is proposed, in which each node potentially uses all time slots, and nodes with a „higher priority” are given a greater probability of access.

Ключові слова: управління доступом, методи доступу, MANET.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Найбільш технічно розвинуті країни світу приділяють велику увагу розвитку систем оперативного (бойового) управління, зв'язку, розвідки та спостереження (C4ISR), які ґрунтуються на мережецентричному принципі ведення війн та організації інформаційного простору. В якості основи побудови перспективної мобільної компоненти системи зв'язку тактичної ланки управління (ТЛУ) найбільш перспективним є застосування самоорганізованих мобільних радіомереж (MR) або мереж MANET (Mobile Ad-Hoc Networks), що представляють собою динамічну самоорганізовану архітектуру побудови мереж зв'язку [1]. Особливостями MR є відсутність базових станцій і фіксованих маршрутів передачі інформації. У даних мережах всі вузли мобільні. Під вузлом мережі розуміється термінал (комп'ютер, сенсорний пристрій й ін.), який оснащений радіомодемом, і реалізує функції маршрутизації та комутації пакетів даних.

MR характеризуються високою щільністю розміщення вузлів на місцевості поряд з високою динамікою топології мережі, значною розмірністю, неоднорідністю вузлів (по ресурсах потужності й продуктивності, по мобільності й ін.). Перспективна архітектура MR буде складатися з декількох рівнів [1]. Наприклад, в останній версії тактичної інформаційної системи полю бою США – WIN-T – можна виділити до 4 рівнів [2].



Рис. 1 Архітектура перспективної тактичної інформаційної системи полю бою WIN-T

Одним із завдань управління МР є ефективний розподіл її радіоресурсу між множиною незалежно функціонуючих вузлів, що припускає застосування на каналному рівні відповідних методів доступу (МД).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [3] представлені огляд і класифікація протоколів МАС (Medium Access Control), засновані на механізмах їхньої роботи й основних особливостях. До класу випадкових належать численні методи управління доступом до середовища передачі, які застосовуються, як правило, в асинхронних мережах. Найбільш відомий з них – IEEE 802.11 DCF (на основі CSMA/CA). Детерміновані МД засновані, як правило, на багатостанційному доступі із часовим ущільненням каналів (TDMA), де кожному вузлу призначено для передачі деяка множина часових слотів. Наприклад, просторовий TDMA (S-TDMA) здатний забезпечити безконфліктне планування передач, засноване на застосуванні ортогональних множин часових слотів. Рішення задачі розподілу часових слотів належать до класу NP-повних [4].

У МД на основі TDMA, запропонованому Хламтаком і Фараго [5], часові слоти задаються випадково для кожного вузла без урахування топології, використовуючи математичні властивості багаточленів з коефіцієнтами кінцевих полів Галуа. При цьому гарантується, що кожен вузол має не менш одного безконфліктного слоту в кадрі. Метод, запропонований Лі [6], максимізує мінімальну гарантовану пропускну здатність мережі. Однак, запропоновані МД допускають зіткнення пакетів, тому що вузол-відправник не знає, який слот є безконфліктним [7].

Для подолання цього недоліку були запропоновані методи безконфліктного планування [8 – 11], а в [12] було запропоноване використання квітування (acknowledge – АСК) наприкінці кожного часового слоту. Однак всі перераховані методи не використовують для передачі непризначені часові слоти.

Запропонований у [13] імовірнісний метод на основі TDMA відноситься до p -наполеглих методів і передбачає використання непризначених часових слотів. Але ймовірність їх використання p , а також попереднє призначення безконфліктних слотів не залежить від таких характеристик вузлів мережі, як швидкість руху та приналежність до рівня ієрархії мережі.

Мета статті. Метою статті є удосконалення ймовірнісного методу управління доступом до середовища передачі для мобільних радіомереж на основі TDMA для врахування динамічних та ієрархічних параметрів вузлів МР при розподілі безконфліктних слотів та визначенні ймовірності використання незайнятих слотів.

Виклад основного матеріалу.

1. Модель мережі

Мережу представимо у вигляді графа $G(V, E)$, де V – множина вузлів мережі, E – множина каналів зв'язку між вузлами в деякий момент часу. Нехай $N = |V|$ позначає число вузлів у мережі.

Позначимо: S_u – множина сусідів вузла u , $u \in V$; D – максимальне число сусідів вузла, $|S_u| \leq D$, $u \in V$. Нехай v – сусіди вузла u , до яких можлива пряма (без переприйомів) передача від вузла u (передача $u \rightarrow v$).

Для моделі вводяться наступні обмеження:

- вузли використовують всепрямовані антени;
- час розділений на слоти фіксованої тривалості;
- всі вузли синхронізовані;
- вузли належать до певного рівня ієрархії мережі δ , $\delta \in \Delta$, де Δ – множина рівнів ієрархії МР;
- вузли належать до певної динамічної групи ζ , приналежність до якої визначається їх швидкістю руху, $\zeta \in Z$, де Z – множина динамічних груп;
- втрати пакетів даних можливі тільки через зіткнення передач;
- передавальний вузол знає про неспотворену передачу за рахунок АСК наприкінці

слоту;

– передбачається, що вузол u передає сусідньому вузлу v , $v \in S_u$, тільки в одному часовому кадрі.

Для успішної передачі $u \rightarrow v$ у деякому часовому інтервалі (слоті) i (рис. 2) повинні виконуватися дві умови:

1. Вузол v не повинен передавати в часовому інтервалі i (тобто, у часовому інтервалі i не повинно бути ніякої передачі $v \rightarrow \psi$, $\psi \in S_v$);

2. Ніякий сусід вузла v , крім u , не повинен передавати в часовому інтервалі i (тобто, у часовому інтервалі i не повинно бути ніякої передачі $\zeta \rightarrow \chi$, $\forall \zeta \in S_v - \{u\}$ й $\chi \in S_\zeta$).

Передача $u \rightarrow v$ буде спотворена, якщо в часовому інтервалі i буде хоча б одна передача $\chi \rightarrow \psi$, $\chi \in S_v \cup \{v\} - \{u\}$ й $\psi \in S_\chi$. Передача (передачі), що спотворює передачу $u \rightarrow v$, сама може бути переключена.

Передача $\chi \rightarrow \psi$ буде спотворена передачею $u \rightarrow v$ (суцільні стрілки на рис. 2), якщо $\chi \in S_v \cup \{v\} - \{u\}$ й $\psi \in S_\chi \cap (S_u - \{u\})$. Передача $\chi \rightarrow \psi$ не буде спотворена передачею $u \rightarrow v$ (пунктирні стрілки), якщо $\psi \in S_\chi - (S_\chi \cap (S_u \cup \{u\}))$.

Нехай: $\Phi_{u \rightarrow v}$ – множина передач, які спотворюють передачу $u \rightarrow v$ і самі нею також спотворюються; $\Theta_{u \rightarrow v}$ – множина передач, які спотворюють передачу $u \rightarrow v$, але не спотворюються нею. Помітимо, що передачі $\Theta_{u \rightarrow v}$, можуть спотворюватися іншою передачею, крім передачі $u \rightarrow v$.

Множини передач $\Phi_{u \rightarrow v}$ й $\Theta_{u \rightarrow v}$ визначаються рівняннями (1) і (2) відповідно.

$$\Phi_{u \rightarrow v} = \{\chi \rightarrow \psi: \chi \in S_v \cap \{v\} - \{u\}, \psi \in S_\chi \cap (S_u \cup \{u\})\} \quad (1)$$

$$\Theta_{u \rightarrow v} = \{\chi \rightarrow \psi: \chi \in S_v \cup \{v\} - \{u\}, \psi \in S_\chi - (S_\chi \cap (S_u \cup \{u\}))\}. \quad (2)$$

$\Phi_{u \rightarrow v} \cup \Theta_{u \rightarrow v}$ – множина передач, які спотворюють передачу $u \rightarrow v$. Очевидно, що $\Phi_{u \rightarrow v} \cap \Theta_{u \rightarrow v} = \emptyset$.

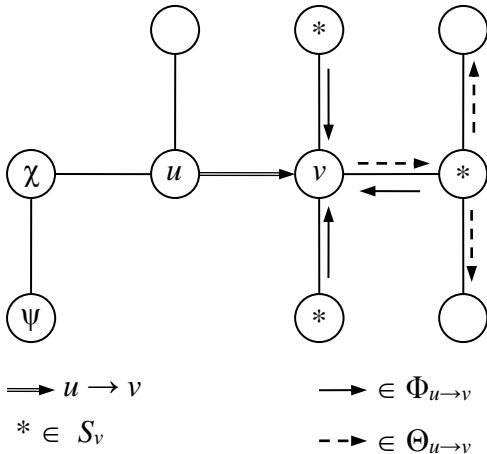


Рис. 2

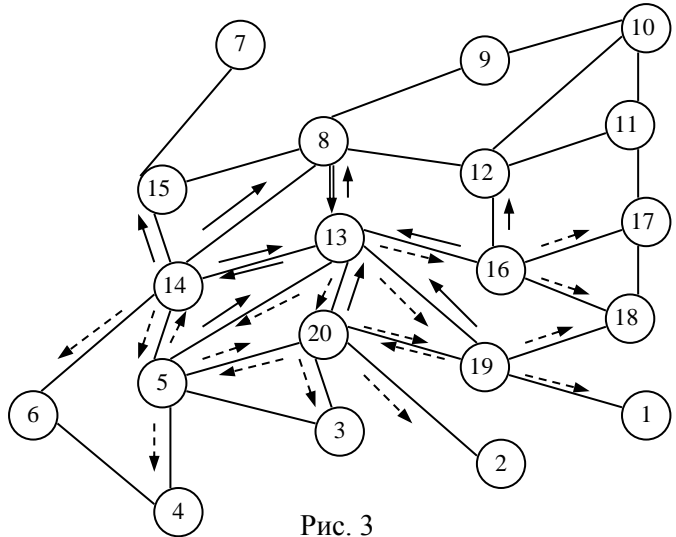


Рис. 3

На рис. 3 зображений приклад топології мережі з 20 вузлів. Передача $8 \rightarrow 13$ позначена білою стрілкою між вузлами 8 й 13, а передачі, що належать $\Phi_{8 \rightarrow 13}$ ($\Theta_{8 \rightarrow 13}$), позначені суцільними (пунктирними) стрілками.

2. Опис методу

Децентралізований імовірнісний метод заснований на детермінованому методі (ДМ)

розподілу часових слотів, відповідно до якого кожному вузлу $u \in V$ випадково призначений унікальний багаточлен f_u ступеня k з коефіцієнтами кінцевого поля Галуа порядку q ($GF(q)$) [5, 6]. Багаточлен f_u представимо як

$$f_u(x) = \sum_{i=0}^k a_i x^i \text{ mod } q,$$

де $a_i \in \{0, 1, 2, \dots, q-1\}$. Параметри q й k розраховані на підставі N й D відповідно до алгоритму, представленою в [5, 6]. Співвідношення між N , D , q й k важливо для визначення головної властивості ДМ: існує не менш одного часового слоту в кадрі, протягом якого дана передача не спотвориться. Нехай Ω_u – множина часових слотів, призначених вузлу u . Отже, $|\Omega_u|=q$. Відповідно до ДМ кожен вузол u передає в слоті i тільки якщо $i \in \Omega_u$ за умови, що він має дані для передачі. МД заснований на TDMA з кадром, що складається з q^2 часових слотів. Кадр розділений на q підциклів s розміром q , а часовий інтервал, призначений вузлу u у підциклі s , ($s = 0, 1, \dots, q-1$), має вигляд $f_u(s) \text{ mod } q$ [6].

При імовірнісному методі (ВМ) кожен вузол u завжди передає в слоті i , якщо $i \in \Omega_u$, і передає з імовірністю p у слоті i , якщо $i \notin \Omega_u$, та якщо має дані для передачі. Імовірність доступу p – простий параметр, загальний для всіх вузлів [13].

Пропонований удосконалений імовірнісний метод (УВМ) враховує динамічні та ієрархічні параметри вузлів МР. При УВМ кожен вузол u завжди передає в слоті i , якщо $i \in \Omega_u$, і передає з імовірністю p у слоті i , якщо $i \notin \Omega_u$, та якщо має дані для передачі. На відміну від розглянутого ВМ, імовірність доступу p – параметр, різний для всіх вузлів МР. Він залежить від рівня δ та групи ζ вузла.

При УВМ для передачі використовуються всі непризначені слоти без потреби в постійній координації між вузлами. Значення ω групи вузла, й, відповідно, імовірність доступу p , визначається вузлом автономно згідно заздалегідь встановлених критеріїв (швидкості руху). Значення δ приналежності до рівня МР призначається вузлу при вихідному настроюванні МР. Також, на відміну від ВМ, пропонований УВМ розподіляє призначені слоти з урахуванням приналежності до рівня МР δ . Чим більше значення δ (чим вищий рівень) – тим більше слотів призначається даному вузлу при розподілі слотів кадру. Проаналізуємо УВМ.

3. Аналіз пропонованого методу

Припустимо, що двом сусіднім вузлам u й v були призначені (відповідно до значення δ) унікальні багаточлени f_u й f_v ступеня k . Нехай призначені кожному вузлу множини часових слотів, що відповідають кореням багаточлена, мають у двох сусідніх вузлів k спільних слотів. Тоді k – максимальне число часових слотів будь-якого вузла, у яких передача може бути спотворена. Число можливих для передачі часових слотів у кадрі для вузла u дорівнює q_u , для вузла v дорівнює q_v , і тому для будь-якого вузла в кадрі буде не менш одного часового слоту, у якому дана передача не буде спотворена, якщо $q_v > k$, $q_u > k$ або $q_v \geq D + 1$, $q_u \geq D + 1$ (де k й D – цілі числа).

Унікальні багаточлени можна вважати розпізнавальними номерами МАС (ідентифікаторами МАС) і призначити на кожен вузол, використовуючи механізм управління. Для збільшення кількості призначених слотів вузлам вищих рівнів δ призначаються, додатково до першого, який ідентифікує вузол, стоїть другого (наступного) багаточлена. Якщо вузлам до входу в мережу унікальні багаточлени були призначені випадково (не беручи до уваги сусідні вузли і їхні багаточлени), важливо, щоб число унікальних багаточленів було достатньо для всіх вузлів у мережі, тобто $q^{k+1} \geq N$, з урахуванням призначення додаткових багаточленів. Якщо для деяких N й q нерівність $q^{k+1} \geq N$ не виконується, то k повинен бути збільшений. Збільшення значення k приводить до збільшення значення q , так само й D (лінійне збільшення), і ще більше N (експонентне збільшення). Отже, для мережі з великим N і порівняно малим D , $k > 1$ [6].

При випадковому завданні багаточленів двом вузлам можуть бути призначені спільні часові слоти, що перекриваються (тобто, $\Omega_u \cap \Omega_v \neq \emptyset$). Позначимо:

$C_{u \rightarrow v}$ – множина спільних часових слотів серед слотів, призначених вузлу u і будь-якому вузлу $\chi \in S_v \cup \{v\} - \{u\}$,

$$C_{u \rightarrow v} = \Omega_u \cap \bigcup_{\chi \in S_v \cup \{v\} - \{u\}} \Omega_\chi \quad ; \quad (3)$$

$R_{u \rightarrow v}$ – множина часових слотів i , $i \notin \Omega_u$, у яких передача $u \rightarrow v$ була б успішна, тобто $R_{u \rightarrow v}$ містить слоти, не включені в множину $\bigcup_{\chi \in S_v \cup \{v\}} \Omega_\chi$,

$$|R_{u \rightarrow v}| = q^2 - \left| \bigcup_{\chi \in S_v \cup \{v\}} \Omega_\chi \right|. \quad (4)$$

При використанні для передачі $u \rightarrow v$ множини непризначених прийнятних часових слотів $R_{u \rightarrow v}$ імовірність даної передачі могла б бути збільшена. На рис. 4 наведений приклад кадру розміром $q^2=121$ і множин Ω_u й $R_{u \rightarrow v}$.

Збільшення ймовірності передачі $u \rightarrow v$ не обов'язково збільшує усереднену ймовірність успіху всіх передач у мережі (тобто пропускну здатність). Передача $u \rightarrow v$ у слоті i , $i \notin \Omega_u$, може спотворити іншу передачу $\chi \rightarrow \psi$, для якої $i \in \Omega_\chi$ (передача $u \rightarrow v \in \Theta_{\chi \rightarrow \psi}$). Отже, передача $\chi \rightarrow \psi$ буде спотворена, а $u \rightarrow v$ лишиться неспотвореною.

Припустимо, що $|R_{u \rightarrow v}| \geq q(k-1)D$. Докажемо дане припущення. Звернемо увагу, що $\bigcup_{\chi \in S_v \cup \{v\}} \Omega_\chi \leq (|S_v| + 1)q$, тому що $|\Omega_\chi| = q$, $\forall \chi \in V$. З рівняння (4) бачимо, що $|R_{u \rightarrow v}| \geq q^2 - (|S_v| + 1)q$, тобто $|R_{u \rightarrow v}| \geq q(q - |S_v| - 1)$. $D \geq |S_v|$, тому $|R_{u \rightarrow v}| \geq q(q - D - 1)$. Тому що $q \geq k + 1$ (див. [5, 6]), значить $q - D - 1 \geq (k - 1)D$. Отже, $|R_{u \rightarrow v}| \geq q(k - 1)D$.

Очевидно, що для $k > 1$ $|R_{u \rightarrow v}| > q$. Отже, кількість непризначених прийнятних для передачі часових слотів може бути великою для випадків, коли $k > 1$ (цей випадок відповідає мережам з малою зв'язністю [6]). Навіть для випадку, коли $k = 1$, $|R_{u \rightarrow v}| \geq 0$, $|R_{u \rightarrow v}|$ може бути більше нуля. Для тих вузлів, для яких множина слотів, що накладаються (спотворюються), найменша, вірно $\bigcup_{\chi \in S_v \cup \{v\}} \Omega_\chi < (|S_v| + 1)q$, тобто $|R_{u \rightarrow v}|$ завжди більше нуля, навіть при $k = 1$. Крім

того, якщо множина сусідів вузла $v \in$ невеликою, або $|S_v|$ мало в порівнянні з D , то $|R_{u \rightarrow v}|$ значно зростає (див. рівняння (4)).

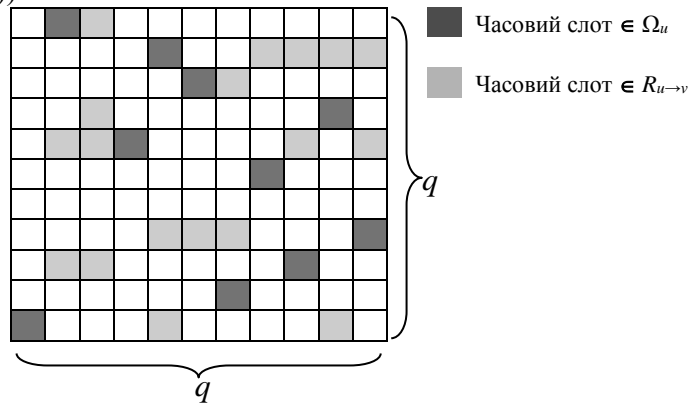


Рис. 4

Використання слотів i , $i \in R_{u \rightarrow v}$, може збільшити середню кількість успішних передач, поки $R_{u \rightarrow v}$ визначено й часові слоти $i \in R_{u \rightarrow v}$ використовуються ефективно. Визначення $R_{u \rightarrow v}$ вимагає існування механізму для екстракції множин Ω_χ , $\forall \chi \in S_v$. Крім того, ефективне використання слотів множини $R_{u \rightarrow v}$ вузлом u вимагає постійної координації й обміну керуючою інформацією із сусідніми вузлами χ , чії передачі $\chi \rightarrow \psi$, коли $R_{\chi \rightarrow \psi} \cap R_{u \rightarrow v} \neq \emptyset$, можуть використовувати ті ж самі слоти в $R_{\chi \rightarrow \psi} \cap R_{u \rightarrow v}$ і зруйнувати передачу $u \rightarrow v$, або $\chi \rightarrow \psi$, або обидві.

Крім того, в умовах ненапруженого трафіка існує безліч незайнятих слотів, додатково

до $R_{u \rightarrow v}$, що не використовуються вузлами, яким вони призначені. При УВМ всі слоти $i \notin \Omega_v$ потенційно використовуються вузлом v : з множини $R_{v \rightarrow v}$ для даної передачі $v \rightarrow v$, так само й ті, що не входять в $\Omega_v \cup R_{v \rightarrow v}$, і які можуть не використовуватися сусідніми вузлами в умовах неінтенсивного трафіка. У той же час, застосування даного методу приводить до спотворення інших, потенційно безконфліктних передач. Надання вузлам вищої групи ζ більшої p у порівнянні з вузлами з меншою групою ζ дозволить збільшити ймовірність їх успішних передач, що повинно компенсувати втрати пакетів, пов'язані з їх вищою швидкістю руху.

Висновки. У статті досліджений імовірнісний метод завдання часових слотів для мобільних радіомереж на основі TDMA [13]. Показано, що у мережах великої розмірності й з малим ступенем зв'язності, в яких існує множина непризначених часових слотів, і передача пакетів у яких була б успішна, доцільно визначати ймовірність використання вузлами непризначених слотів диференційовано, з урахуванням їх рівня ієрархії в мережі та швидкості руху. У статті пропонується удосконалений імовірнісний метод завдання часових слотів, що збільшує пропускну здатність мережі за рахунок використання з диференційованою ймовірністю часових слотів, не призначених вузлу. При удосконаленому імовірнісному методі кожним вузлом потенційно використовуються всі часові слоти, причому вузлам з „вищим пріоритетом” надається більша ймовірність доступу.

У подальших дослідженнях передбачається визначити умови, при яких диференційоване призначення імовірності p використання непризначених часових слотів не зменшує загальну продуктивність мережі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бунин С.Г. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами / С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк. – К.: НПП „Издательство „Наукова думка” НАН України”. – 444 с.: ил.
2. <https://gdmissionsystems.com/communications/warfighter-information-network-tactical>
3. Загребельний О.Ю. Методи управління множинним доступом в мобільних радіомережах // Збірник наукових праць № 1. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2006. – С. 31 – 46.
4. Минович А.И., Романюк В.А. Методы множественного доступа в мобильных радиосетях // Зв'язок. – № 2. – 2004. – С. 28 – 33.
5. Chlamtac I., Farago A. Making Transmission Schedules Immune to Topology Changes in Multi-Hop Packet Radio Networks // IEEE/ACM Trans. on Networking, 2: 23 – 29, 1994.
6. Ju J., Li J. An Optimal Topology-Transparent Scheduling Method in Multihop Packet Radio Networks // IEEE/ACM Trans. on Networking, 6:298 – 306. 1998.
7. Nelson R., Kleinrock L. Spatial TDMA, a collision-free Multihop Channel Access Protocol // IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-33, №. 9, September 1985.
8. Rozovsky R., Kumar P.R. SEEDEX: a MAC protocol for ad hoc networks // ACM Mobihoc'01, October 2001.
9. Borgonovo F., Capone A. ADHOC MAC: a new MAC architecture for ad hoc networks providing efficient and reliable point-to-point and broadcast services // INET Special Issue on Ad Hoc Networking, 2001.
10. Ephremides A., Truong T. J. Scheduling Broadcasts in Multihop Radio Networks // IEEE Transactions on Communications, 38 (4): 456 – 60, April 1990.
11. Wang G., Ansari N. Optimal Broadcast Scheduling in Packet Radio Networks Using Mean Field Annealing // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, February 1997, Vol. 15, № 2, pp. 250 – 260.
12. Krishnan R., Sterbenz J. An Evaluation of the TSMA Protocol as a Control Channel Mechanism in MMWN // Technical report. BBN Technical Memorandum. № 1279, 2000.
13. Загребельний О.Ю. Імовірнісний метод управління доступом до середовища передачі для мобільних радіомереж на основі TDMA. Збірник наукових праць № 2. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2005. – С. 34 – 40.