

УДК 004.891

Є.С. Ленков<sup>1</sup>, Д.В. Зайцев<sup>2</sup>, І.В. Муляр<sup>3</sup>, Р.М. Михалечко<sup>3</sup><sup>1</sup> Військовий інститут телекомунікацій і інформатизації, Київ<sup>2</sup> Військовий інститут Київського національного університету імені Т. Шевченка, Київ<sup>3</sup> Хмельницький національний університет, Хмельницький

## ФОРМУВАННЯ ТОПОЛОГІЇ БЕЗДРОТОВОЇ AD HOC МЕРЕЖІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ ДИНАМІКИ ПОДВІЙНИХ НАЙКРАЩИХ ВІДПОВІДЕЙ

У статті розглядається задача формування топології бездротової ad hoc мережі. На площині розташовані вузли, оснащені бездротовими передавачами. Кожен вузол може змінювати потужність свого передавача. Потрібно назначити передавачам такі потужності, щоб забезпечити зв'язність мережі і мінімізувати сумарну потужність. Завдання формування топології розглядається як некооперативна гра. Досліджуються алгоритми колективної поведінки вузлів, що використовують правило подвійної найкращої відповіді. Це правило прийняття рішення, яке моделює поведінку агентів першого рангу рефлексії. Запропоновано два алгоритми формування мережі, що використовують метод подвійних найкращих відповідей. Ефективність запропонованих алгоритмів досліджується в численних експериментах і порівнюється з традиційним теоретично-ігровим алгоритмом простих найкращих відповідей.

**Ключові слова:** гра формування мережі, ad hoc мережі, рефлексія, подвійна найкраща відповідь.

### Вступ

Мережі ad hoc утворюються декількома бездротовими вузлами без використання будь-якої додаткової інфраструктури [1]. Розрізняють декілька видів ad hoc-мереж. Мобільні ad hoc-мережі (MANET) застосовуються у військових і рятувальних операціях. Сенсорні мережі (WSN) використовують для збору даних на об'єктах з метою екологічного моніторингу, дослідження (розвідки) території тощо. В даний час вивчаються можливості для того, щоб використовувати доступні ad hoc мережі для збільшення пропускної можливості і розширення зони покриття стільникових мереж покоління 3g і 4g [2].

Пристрої в ad hoc мережах зазвичай працюють від автономних акумуляторів, тому велике значення мають методи забезпечення енергоефективності. Управлінням топологією (topology control) називається динамічним налаштуванням потужності передавачів для підтримки зв'язності мережі, мінімізації енергоспоживання або поліпшення якості зв'язку. Автори статті розглядають тільки процес формування мережі, коли потрібно назначити кожному вузлу таку потужність, щоб забезпечити зв'язність мережі і мінімізувати сумарну потужність вузлів.

У класичному розумінні теорії ігор агенти – це суб'єкти, які мають свободу, але діють раціонально, тобто максимізують функцію корисності. Спочатку теорія ігор вивчала ситуацію, в яких агентами були комерційні фірми, політичні партії і будь-які інші організації, в яких рішення приймаються людьми. Зараз методи теорії ігор виявилися затребувані та-

кож й стосовно технічних систем, зокрема, телекомунікаційних мереж.

Пристрої в технічних системах спеціального призначення не володіють здатністю приймати рішення. Але розробник може задати алгоритм поведінки пристрою, що імітує раціональне прийняття рішень. Припустимо, що кожен пристрій наділений вбудованою функцією корисності, яка оцінює якість виконання пристроєм своїх завдань залежно від цілей пристрою, його дій і стану зовнішнього середовища. В системі діє кілька таких пристроїв і кожний прагне максимізувати свою функцію корисності, не враховуючи корисності інших. Такі завдання вивчає некооперативна теорія ігор та такі пристрої можна вважати агентами. Якщо є алгоритм, який координує дії пристроїв, то замість теорії ігор можна використовувати стандартні методи управління і оптимізації.

В роботі досліджується правило прийняття рішення агентами, яке має назву подвійної найкращої відповіді. Вже згадана гра формування топології мережі характерна наявністю більшого числа рівноваг, які сильно відрізняються між собою по ефективності. Рівноваги, одержувані класичним теоретично-ігровим алгоритмом послідовної найкращої відповіді, сильно залежать від порядку дій агентів. Встановлено, що якщо при створенні мережі застосувати алгоритм подвійної найкращої відповіді, результат більш стійкий до порядку дій і в середньому забезпечує менші загальні витрати.

Запропоновано два алгоритми формування мережі. В першому, системо утворюючи вузли мережі використовують подвійну найкращу відповідь до тих пір, поки мережа не стабілізується, потім пере-

микаються на звичайну найкращу відповідь, щоб завершити формування зв'язної мережі. В другому алгоритмі вузли використовують звичайну найкращу відповідь до тих пір, поки можуть покращувати свою корисність, а потім переходять на подвійну найкращу відповідь. При цьому подвійну найкращу відповідь вузол може використовувати обмежену кількість разів. Обидва алгоритми в численних експериментах показали покращення якості мережі щодо стандартної найкращої відповіді.

**Огляд сучасних публікацій.** Управлінню топологією бездротових мереж присвячено достатньо багато робіт, які відрізняються використаними моделями мережі, критеріями якості та обмеженнями, якими повинна задовольняти мережу. Докладний огляд теоретичних результатів приведений в [3]. Пошук рішення, що мінімізує сумарну потужність вузлів, є NP-важким завданням [4]. Централізовані алгоритми цілочисельної оптимізації та деякі евристики наведені в [2].

Розроблено багато децентралізованих алгоритмів управління топологією. Наприклад, алгоритм LMST [3] реалізує децентралізований пошук мінімального остовного дерева. Для цього вузли повинні мати інформацію про розташування своїх сусідів. Для алгоритму СВТС вузлів потрібне вміння визначати напрямок до інших вузлів [2]. В алгоритмі ХТС кожен вузол вибудовує своїх сусідів за якістю сигналу, потім створює  $k$  кращих зв'язків [5]. Сучасні і більше орієнтовані на практичне застосування алгоритми розглядаються в [4].

Методи теорії ігор останнім часом активно застосовуються для моделювання конфліктних ситуацій, що виникають в телекомунікаційних мережах, зокрема, в бездротових. Проведений аналіз по застосуванню теорії ігор в сенсорних мережах [1], багато завдань, які описані в ньому характерні і для інших типів мереж. У роботах [2, 5] управління топологією сформульовано як некооперативна гра, що має потенційну функцію, рішенням є рівновага Неша. В [4] досліджується Байєсова гра вузлів різних типів, як рішення використовується порівняння рівноваги Байєсова рівновазі Неша. В [2] вузли використовують навчальну динаміку стохастичного фіктивного розіграшу (stochastic factious play) в повторювальній грі, рішенням якої також виступає рівновага Неша.

Основні положення теорії рефлексивних ігор описані в [5]. Алгоритм колективної поведінки, багато в чому аналогічний подвійній найкращій відповіді, використовується в [4] для управління групою агентів, які повинні проникнути через систему датчиків. В [3] з позицій теорії рефлексивних ігор розглядається дуополія Курно, пошук консенсусу в багатоагентній системі та активна експертиза. Задача формування мережі подвійної найкращої відповіді вперше застосована в [2].

Управління топологією має багато спільного з іграми формування соціально-економічних мереж [1]. У них розглядаються різні концепції стійких мереж, а також динамічні процедури формування мережі [4]. Але роботи, в яких би теорія рефлексивних ігор застосовувалася до формування мереж, на даний момент невідомі.

**Постановка задачі.** Метою статті є розробка алгоритмів формування мережі на основі методу подвійної найкращої відповіді.

В ході досягнення поставленої мети були вирішені такі завдання:

1. Проведено огляд додатків теорії ігор до завдань управління та оптимізації у бездротових мережах, в тому числі до задачі формування ефективної топології мережі. Огляд показав, що розробка нових теоретично-ігрових алгоритмів формування мереж є актуальною науковою і практичною задачею.

2. Використано метод прийняття рішень агентами – подвійна найкраща відповідь. Метод заснований на ідеях теорії рефлексивних ігор. Доведено, що у задачі формування зв'язкової мережі новий метод робить нестійкими всі неприпустимі рівноваги.

3. На основі методу подвійної найкращої відповіді розроблено два алгоритми формування мережі. Показано, що нові алгоритми отримують в середньому більшу ефективність рівноваги, ніж стандартний метод найкращої відповіді.

## Результати досліджень

**Модель мережі.** Мережа складається з безлічі пристроїв і вузлів  $N = \{1, \dots, n\}$ , розташованих на площині. Кожен пристрій оснащений бездротовим передавачем, потужність якого може змінюватися. Потужності всіх передавачів задаються вектором  $p = (p_1, \dots, p_n)$ ,  $p_i \in [0, p^{\max}]$ . Вважаємо, що вузли однорідні і максимальна потужність однакова для кожного вузла.

Вузол і може успішно передавати дані вузлу  $j$ , якщо виконується умова:

$$p_i / (\delta_{ij})^a \geq B, \quad (1)$$

де  $p_i$  – потужність передавача вузла  $i$ ,  $B \geq 1$  – параметр, який задає необхідну якість передачі,  $a \geq 2$  – показник загасання сигналу  $\delta_{ij}$  – Евклідова відстань між вузлами  $i$  та  $j$ .

Ця модель описує поширення радіосигналу в однорідному середовищі без сторонніх перешкод, пере відбиття та інших явищ, що зустрічаються в реальних умовах. Проте така модель часто використовується в роботах, присвячених управлінню топологією.

**Рівновага в грі формування топології.** Якщо в системі встановилася рівновага Неша, жоден агент

не зможе збільшити корисність, поодиноці змінивши свою дію. У розглянутій грі формування топології існує більше однієї рівноваги Неша. Проблема в тому, що ці рівноваги можуть сильно відрізнятися за сумарними витратами потужності.

На рис. 1 показані всі можливі рівноваги, що виникають у грі формування мережі з трьох вузлів, розташованих на відрізку довжини два. Вузол  $b$  зміщений відносно середини відрізка на малу величину  $\varepsilon$ . Рівноваги на рис. 1, а і 1, б не є допустимими рішеннями завдання формування мережі, оскільки граф не зв'язаний. Рівновага на рис. 1, в допустима, але не оптимальна. Тільки рівновага на рис. 1, г є оптимальною з точки зору мінімуму сумарної потужності вузлів. Інтерес представляють алгоритми, які б дозволили виключити неприпустимі і субоптимальні рівноваги.

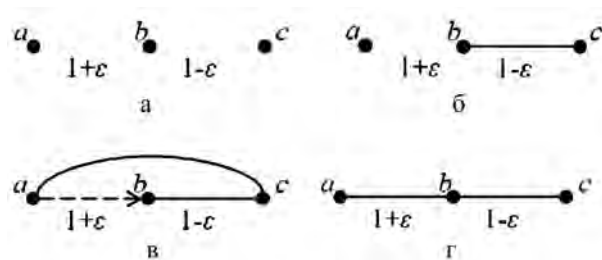


Рис. 1. Рівноваги в грі формування мережі з трьох вузлів: а – тривіальна неприпустима рівновага; б – інші неприпустимі рівноваги; в – субоптимальна рівновага; г – оптимальний баланс

**Найкраща відповідь.** Аналіз гри в стратегічній формі дозволяє зрозуміти, які в даній грі існують рівноваги. Механізм вибору одної з цих рівноваг задається алгоритмом колективної поведінки агентів. Так називається ітераційний процес, при якому агенти на кожному кроці вибирають свою дію по визначеному локальному правилу. В англійській літературі це називається процесом навчання (learning process). Одним з найбільш поширених і природних алгоритмів пошуку рівноваги є алгоритм послідовних найкращих відповідей (iterated best response) [6].

Найкращою відповіддю (best response) агента  $i$  на обстановку  $a_{-i}$  називається дія, яка може бути виражена як

$$BR_i(a_{-i}) = \arg \max_{x \in A_i} u_i(x, a_{-i}), \quad (2)$$

Алгоритм послідовних найкращих відповідей визначається наступним чином. Зафіксуємо початковий вектор дій  $a^0$ . Агенти діють по черзі в деякому порядку. Звичайно вважається, що порядок задається випадково. На кроці  $k$  агент  $i$  вибирає свою дію як найкращу відповідь на поточну обстановку  $a_{-i}^{k-1}$ .

Алгоритм послідовних найкращих відповідей залежить від початкового стану  $a^0$  і від порядку дій вузлів.

**Подвійна найкраща відповідь.** Найкраща відповідь (2) моделює поведінку агента, яку можна назвати «недалекоглядною», яка передбачає, що обстановка в грі залишиться незмінною. Теорія рефлексивних ігор, розроблена в [5], розглядає агентів, які намагаються прогнозувати майбутню реакцію опонентів на свої дії.

Крім того, в [5] вводиться поняття рангу рефлексії агента. Агенти, володіючи 0-м рангом рефлексії, використовують просту найкращу відповідь (2). Агент, що володіє 1-м рангом рефлексії, вважає, що всі інші агенти володіють рангом 0. Ранги рефлексії вище 1-го ми розглядати не будемо, їх використання до аналізу прикладних задач теорії ігор описано в монографії [3].

В [4] агенти вибирають дію як лінійну комбінацію поточної дії і подвійної найкращої відповіді. Такий підхід забезпечує стійкість колективної поведінки.

**Результати моделювання.** Для проведення експериментів використовувалось середовище чисельного моделювання MATLAB. Вузли випадковим чином, слідує рівномірному розподілу, розміщувалися в квадраті 100 на 100 «умовних метрів». Щільність розташування становила 10, 20, 30, 40 і 50 вузлів на квадрат. Для кожного значення щільності було згенеровано 100 варіантів розташування. Максимальна потужність вузлів  $p^{\max}$  була обрана таким чином, щоб радіус дії становив половину сторони квадрата.

На рис. 2 показано, як змінюється сумарна потужність вузлів в мережах, що отримані з використанням різних алгоритмів залежно від щільності розміщення вузлів. Порівняння проводилося з використанням алгоритму 1 та звичайної найкращої відповіді (d на графіках), з централізованим алгоритмом, що будує мінімальний кістяк (a на графіках). В роботі [5] експериментально було показано, що мінімальний кістяк апроксимує оптимальне рішення з точністю 14-16%.

Відзначимо, що жоден з трьох теоретико-ігровий алгоритм не перевершив централізований алгоритм мінімального остовного дерева. Це можна пояснити, оскільки функції корисності (4) враховують тільки локальну інформацію, в той час як в розпорядженні алгоритму а тільки загальна інформація про мережу.

На рис. 2, а порівнюються дві модифікації алгоритму 2. З використанням подвійної найкращої відповіді (6) (b на графіках) і обмеженої подвійної найкращої відповіді (1), де рефлексивні множини обмежувалися максимальним радіусом дії вузла (3) (c на графіках). Графіки b і c показують, що обмеження рефлексивних множин вузлів знижує ефективність алгоритму. Одночасно зростає час збіжності (рис. 3, а).

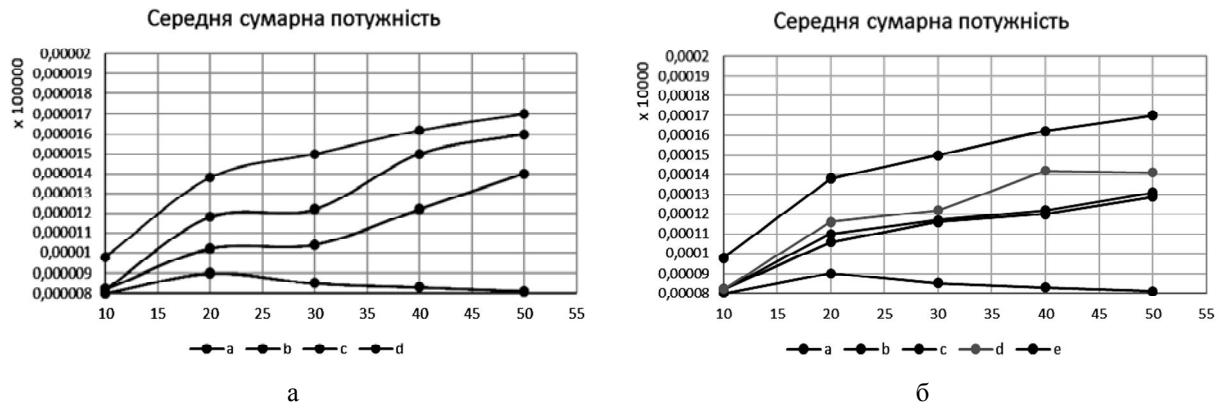


Рис. 2. Порівняння ефективності алгоритмів (по осі x – кількість вузлів в мережі; по осі y – сумарна потужність вузлів для мереж, отриманих алгоритмами): а – з постійним рангом рефлексії; б – зі змінним рангом рефлексії

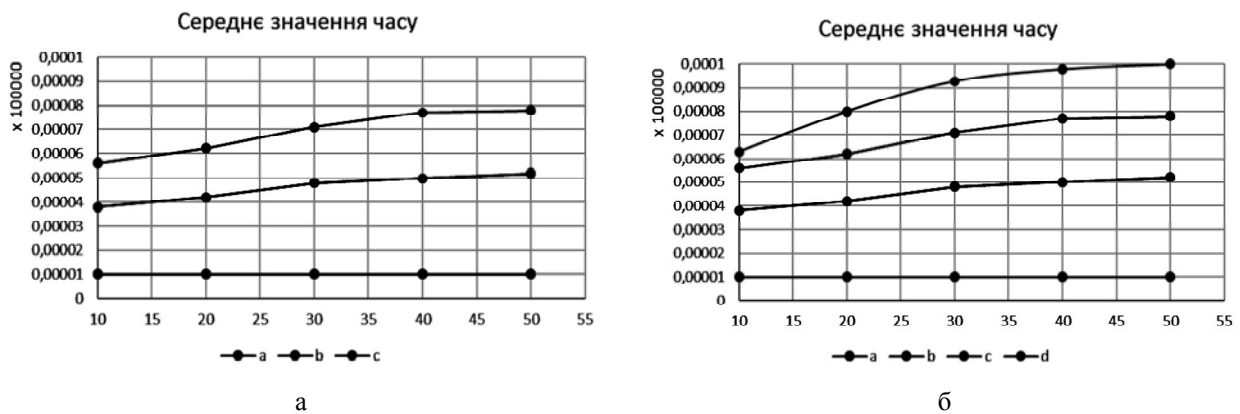


Рис. 3. Порівняння швидкодії алгоритмів (по осі x – кількість вузлів в мережі; по осі y – середній час збіжності): а – з постійним рангом рефлексії; б – зі змінним рангом рефлексії.

Таким чином, робимо висновок, що підвищення рефлексивних здібностей агента збільшує ефективність рішення і знижує час, потрібний для формування мережі.

Для алгоритму 3 зі змінним рангом рефлексії показаний результат для значень ліміту на використання рефлексії від 1 до 3 (на графіках b, c, d). У міру збільшення ліміту ефективність алгоритму зростає й різниця лежить між значеннями 2 і 3. Для великих значень експерименти також проводилися, але зростання значення ефективності алгоритму припинилося, тому ці результати не показані на графіках.

Графіки на рис. 2, б свідчать, що при значенні ліміту більше 1 алгоритм зі змінним рангом перевершує по ефективності алгоритм з постійної подвійної найкращою відповіддю для мереж з високою щільністю вузлів (40 і 50 на графіках).

Час збіжності показано на рис. 3, б.

Збільшення ліміту на використання подвійної найкращої відповіді збільшує час збіжності в середньому на 2 ітерації (тобто знаходження за наближеним значенням величини наступного наближення).

Проведені експерименти показали, що заміна найкращої відповіді на правило подвійної найкращої відповіді підвищує ефективність алгоритмів і дозволяє отримувати мережі з меншою сумарною потужністю, але зі збільшеним часом збіжності алгоритмів. Звичайна найкраща відповідь для мережі будь-якого розміру сходиться за одну ітерацію. Наприклад, на рис. 3а показано, що подвійна найкраща відповідь для мережі з 30 вузлів сходиться в середньому за 5,5 ітерацій. При цьому якість рішення в середньому покращується на 30%.

Максимальне зростання ефективності подвійної найкращої відповіді показує для мереж середньої щільності 20 і 30 вузлів на область. Для цих мереж число можливих рівноваг вже достатньо значне, і домогтися такого ж рівня ефективності простим запуском декількох ітерацій звичайної найкращої відповіді неможна.

Алгоритм 3 зі змінним рангом рефлексії перевершує алгоритм 2, в якому вузли використовують тільки подвійну найкращу відповідь. При цьому для істотного підвищення ефективності досить, щоб кожен вузол міг більше 1 разу застосувати подвійну найкращу відповідь.

## Висновки

В статті досліджені алгоритми колективної поведінки, що засновані на методі подвійної найкращої відповіді, котре моделює поведінку агентів І-го рангу рефлексії.

Подібні алгоритми знаходять своє застосування в децентралізованому управлінні багатоагентними спеціальними, технічними, соціально-економічними тощо системами.

Запропоновано два алгоритми формування мережі. В першому – вузли використовують тільки подвійну найкращу відповідь, в другому – динамічно змінюють ранг рефлексії, перемикаючись між звичайною найкращою відповіддю та подвійною. Ефективність алгоритмів досліджувалася в численних експериментах.

Всі алгоритми, що використовують подвійну найкращу відповідь, формують більш ефективні мережі, ніж алгоритм зі звичайною найкращою відповіддю.

Алгоритм, в якому рефлексивна безліч вузлів обмежується радіусом дії передавача, поступається алгоритму, в якому рефлексивні можливості вузлів не обмежувалися й за ефективністю і за швидкістю збіжності.

Алгоритм зі змінним рангом рефлексії показав кращий результат ніж алгоритм з постійним обмеженням подвійної найкращої відповіді.

## Список літератури

1. Губко М.В. Управление организационными системами с сетевым взаимодействием агентов. Часть I: Обзор теории сетевых игр / М.В. Губко // Автоматика и телемеханика. – 2004. – № 8. – 148 с.

2. Базенков Н.И. Рефлексия в задаче управления топологией беспроводной сети / Н.И. Базенков // Труды 55-й научной конференции МФТИ. Радиотехника и кибернетика. – М.: МФТИ, 2012. – Т. 1. – 119 с.

3. Корепанов В.О. Модели рефлексивного группового поведения и управления / В.О. Корепанов. – М.: ИПУ РАН, 2011. – 127 с.

4. Новиков Д.А. Задача о диффузной бомбе / Д.А. Новиков // Проблемы управления. – 2011. – Т. 5. – С 73-79.

5. Чхартишвили А.Г. Рефлексивные игры / А.Г. Чхартишвили. – М.: СИНТЕГ, 2003. – 149 с.

6. Althaus E. Power Efficient Range Assignment in Ad hoc Wireless Network / E. Althaus // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2003), New Orleans, LA, USA, March 2003. – Vol. 3. – 1894.

## References

1. Hubko M.V. Upravlenye orhanyzatsyonnyy systemy s setevym vzaymodeistviem ahentov. Chast I: Obzor teoryy setevykh yhr / Avtomatyka y telemekhanyka. – 2004. – №8. – 148 p.

2. Bazenkov N.Y. Refleksiya v zadache upravleniya topolohyei besprovodnoi sety. Trudy 55-y nauchnoi konferentsyy MFTY. Radyotekhnika y kybernetyka. – М.: MFTY, 2012. – Tom 1. – 119 p.

3. Korepanov V.O. Modely refleksivnoho hruppovoho povedeniya y upravleniya. – М.: YPU RAN, 2011. – 127 p.

4. Novikov D.A. Zadacha o dyffuznoi bombe / Problemy upravleniya. – 2011. – Tom 5. – 73 p.

5. Chkhartyshvily A.H. Refleksivnyye yhry. – М.: SYNTEH, 2003. – 149 p.

6. Althaus E. Power Efficient Range Assignment in Ad hoc Wireless Network / IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2003), New Orleans, LA, USA, March 2003. – Vol. 3. – 1894.

Надійшла до редколегії 9.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Барабаш, Державний університет телекомунікацій, Київ.

## ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ БЕСПРОВОДНЫХ AD HOC СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ДИНАМИКИ ДВОЙНЫХ НАИЛУЧШИХ ОТВЕТОВ

Е.С. Ленков, Д.В. Зайцев, И.В. Муляр, Р.М. Михалечко

В статье рассматривается задача формирования топологии беспроводной ad hoc сети. На плоскости расположены узлы, оснащенные беспроводными передатчиками. Каждый узел может изменять мощность своего передатчика. Требуется назначить передатчикам такие мощности, чтобы обеспечить связность сети и минимизировать суммарную мощность. Задача формирования топологии рассматривается как некооперативная игра. Исследуются алгоритмы коллективного поведения узлов, использующие правило двойного наилучшего ответа. Это правило принятия решения, которое моделирует поведение агентов первого ранга рефлексии. Предложено два алгоритма формирования сети, использующие метод двойных наилучших ответов. Эффективность предложенных алгоритмов исследуется в численных экспериментах и сравнивается с традиционным теоретико-игровым алгоритмом простых наилучших ответов.

**Ключевые слова:** игра формирования сети, ad hoc сети, рефлексия, двойной наилучший ответ.

## THE FORMATION TOPOLOGY WIRELESS AD HOC NETWORK BASED ON DOUBLE DYMANICS BEST ANSWER

Ye.S. Lenkov, D.V. Zayce, I.V. Mulyar, R.M. Mykhalechko

This article considers a topology formation problem for wireless ad hoc networks. There are nodes that have wireless transmitters on a plane. Each node can adjust its transmission power. It is necessary to assign an optimal transmission power that can provide the connectedness of the network and minimize the total power cost. The topology formation problem is studied as a noncooperative game. The algorithms of collective behavior of devices that are based on the "double best response" decision rule are researched. This decision rule describes the behavior of an agent with reflexion rank 1. Two network generating algorithms that use the method of two best responses are offered. The efficiency of the suggested algorithms is researched in the numeral experiments and compared with the traditional game-theoretic algorithm of the best simple responses.

**Keywords:** game of the network formation, ad hoc networks, reflexion, double best response.