

## ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ МЕДІАННОГО АЛГОРИТМУ РІВНОМІРНОГО ОТОЧЕННЯ ЗОНИ ЗБУРЕНЬ КОЛЕКТИВОМ АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ АГЕНТІВ

© Голембо В.А., Бочкар'юв О.Ю., Січ Т.М., 20121

Запропоновані нові шляхи покращення медіанного алгоритму рівномірного оточення зони збурень у межах концепції параметричної самоорганізації колективу автономних мобільних агентів. Наведено результати моделювання модифікованого медіанного алгоритму.

**Ключові слова:** медіанний алгоритм, зона збурення, мобільний агент.

**New approaches to improvement of median algorithm for uniform distribution along the boundary of disturbance area in the context of parametric self-organization concept for collective of autonomous mobile agents are proposed. The results of simulation of modified median algorithm are considered.**

**Key words:** median algorithm, disturbance area, mobile agent.

### Вступ

Задача автономних розподілених досліджень стає все актуальнішою із зростанням можливостей зі створення відповідних систем в інтересах різних наук (океанологія, метеорологія), вирішення екологічних проблем (екологічний моніторинг, виявлення та контроль забруднень довкілля), а також промислових та військових застосувань [1]. Одним з найперспективніших напрямків виконання завдання автономних розподілених досліджень є застосування концепції багатоагентних систем (multi-agent systems), у межах якої розглядається колектив автономних мобільних агентів (дослідницьких станцій), здатних до самоорганізації. Розрізняють самоорганізацію – в просторі, в часі та за певним параметром середовища.

У цій роботі розглянуто проблему параметричної самоорганізації колективу автономних мобільних агентів за певним параметром на прикладі задачі рівномірного розподілу агентів вздовж виявленого ними контуру (границі) деякої зони збурень у двовимірному просторі [2]. Під зоною збурень розумітимемо обмежену замкнуту область простору, в якій досліджуваний параметр середовища приймає значення в певних наперед заданих межах. Відтак, границею зони збурень є умовна лінія, де значення параметра виходить за вказані межі. Надалі будемо вважати, що ця лінія є замкнутою і в загальному випадку може змінювати свою форму в часі. Згідно з умовами задачі вважається також, що всі мобільні агенти, які утворюють колектив, перед початком розв'язання задачі вже виявили границю зони збурень і знаходяться на цій границі. При цьому кількість автономних мобільних агентів, які утворюють колектив, невідома та може змінюватись в часі.

### Стан проблеми

У роботі [2] було запропоновано декілька алгоритмів рівномірного оточення зони збурень, серед яких найперспективнішим з погляду практичної реалізації виявився медіанний алгоритм. Розглянемо особливості цього алгоритму, його переваги та недоліки. Під рівномірним оточенням зони збурень будемо розуміти ситуацію, коли довжина відрізка границі (контуру) зони збурень між будь-якими двома сусідніми агентами є однаковою. Цю ситуацію можна описати такою вимогою: довжина відрізка контуру між цим агентом та його сусідом по контуру за годинниковою стрілкою

повинна бути однаковою для всіх агентів і дорівнювати загальній довжині контуру  $L$ , поділеній на кількість агентів  $n$ :

$$d_i(t) = d^* = \frac{L}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

де  $d_i(t)$  – довжина відрізка контуру між  $i$ -м агентом і його сусідом за годинниковою стрілкою в момент часу  $t$ . До того ж в якості оціночного параметра зручно розглядати максимальне серед усіх агентів відхилення поточної довжини відрізка контуру  $d_i(t)$  від цільової довжини відрізка  $d^*$ , яка повинна бути забезпечена при рівномірному розподілі:

$$K_{\max}(t) = \left| \max\{d_i(t)\} - d^* \right|, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

У межах медіанного алгоритму усі агенти, потрапивши на контур, переходять до початкового стану, намагаються утриматись на контурі зони збурень та не переміщуються вздовж контуру. Після того, як всі агенти знаходять контур, відбуваються вибори координатора – агента, який першим почне рух вздовж контуру за годинниковою стрілкою. Зустрівши агента-сусіда, координатор обчислює координату середини пройденого відрізка і повідомляє її агенту-сусіду, після чого починає рухатись проти годинникової стрілки і зупиняється в точці середини пройденого відрізка. Сусід, "отримавши естафету", рухається за годинниковою стрілкою до наступного агента, і, знаючи, де зупинився попередній агент, обчислює координату середини відрізка між попереднім і наступним агентом і рухається до неї. Отже, вздовж контуру йде «хвиля» переміщень, після проходження якої агенти розміщуються вздовж контуру рівномірніше ніж перед тим.

Перевагами медіанного алгоритму є те, що він спрацьовує для будь-якого початкового розміщення (розподілу) агентів вздовж контуру, а також дозволяє утримувати границю зони збурень із збереженням рівномірного оточення навіть у разі, коли кількість агентів у колективі змінюється. Медіанний алгоритм також має недоліки, яких, на нашу думку, доцільно позбутися. Перший недолік полягає у тому, що в деяких випадках при повторному запуску алгоритму в ситуації, коли вже всі агенти рівномірно розподілені по контуру, відбувається порушення рівномірного розподілу. Другий недолік медіанного алгоритму полягає в тому, що в ньому не передбачена процедура зупинки роботи алгоритму в ситуації, коли рівномірний розподіл агентів вздовж контуру вже досягнутий, внаслідок чого відбувається надлишкова витрата ресурсів та можливі порушення рівномірності розподілу (див. перший недолік).

### Постановка задачі

Знайти шляхи покращення медіанного алгоритму рівномірного оточення зони збурень колективом автономних мобільних агентів, які б дозволили позбутися зазначених вище недоліків цього алгоритму.

### Розв'язання задачі

*Вирішення проблеми збереження рівномірності розташування агентів при повторному виконанні алгоритму.* На першому кроці медіанного алгоритму вибраний серед усіх агентів агент-координатор робить ті самі дії, що й інші агенти: вимірює відстань від себе до наступного агента і ділить її на два. Після цього він відходить на цю відстань і повідомляє її величину наступному агенту. Наступний агент виконує ті самі кроки вже по відношенню до свого сусіда. Недолік такого підходу виявляється, коли алгоритм виконується вже при рівномірному розташуванні агентів. Агент-координатор своїми діями спотворює рівномірний розподіл і починає виконувати завдання спочатку, тобто в цій ситуації рівномірність розподілу агентів до виконання алгоритму є кращою, ніж після його виконання. Для усунення цього недоліку ми пропонуємо змінити логіку дій агента-координатора так:

- 1) знайти попереднього сусіднього агента, обходячи контур границі зони збурень в напрямку проти годинникової стрілки;
- 2) знайти наступного сусіднього агента, обходячи контур границі зони збурень в напрямку: за годинниковою стрілкою;
- 3) визначити координати точки середини пройденого шляху, повідомити їх наступному сусідньому агенту (знайденому в напрямку за годинниковою стрілкою), рухатись до цієї точки та зупинитись в ній.

Вирішення проблеми забезпечення ознаки кінця виконання алгоритму. Нехай припустима похибка рівномірності оточення  $\delta_s$  дорівнює деякому значенню  $K_{\max}$ , за якого розподіл агентів ще можна вважати рівномірним, і нехай це значення відоме кожному агенту. Ми пропонуємо передавати разом зі значенням відстані, на якій стоїть попередній агент, інформацію про те, наскільки змістилися координати цього агента після визначання середини відрізка між ним та його сусідом. Знаючи цю інформацію, агенти можуть виконувати її сумісний аналіз, а саме визначати максимальне значення зміщення серед усіх агентів. При цьому кожний окремих агент порівнює значення, отримане від попереднього агента, з власним показником зміщення координат, визначає максимум і передає його далі по ланцюжку агентів. У такий спосіб в колективі агентів по колу буде передаватися інформація про останнє знайдене максимальне зміщення деякого агента з усіх попередніх агентів. Знайдене максимальне зміщення використовується як оцінка рівномірності розподілу агентів на границі зони збурення (тобто як еквівалент поточного значення величини  $K_{\max}$ ). Максимальне зміщення також може бути використане для зупинення (чи тимчасового призупинення) виконання алгоритму в тому випадку, коли воно є меншим за припустиму похибку рівномірності оточення  $\delta_s$ . Можлива ситуація зупинки виконання медіанного алгоритму в момент часу, коли повідомлення з максимальним зміщенням, що передається по ланцюжку агентів, було проаналізовано ще не всім колективом (тобто ще не пройшло весь шлях навколо границі зони збурень через всіх агентів). Для уникнення цієї ситуації відповідне повідомлення повинно мати певний формат для того, щоб агенти могли визначити чи пройшло повідомлення повне коло по всіх агентах колективу, чи ні. З огляду на це можна запропонувати такі формати повідомлення:

1) структура повідомлення з використанням індексного масиву:

8 байт	1 біт	N + 1 біт
Max	Visited	VisitedAgents

2) структура повідомлення з використанням бінарного дерева:

8 байт	1 біт	V біт
Max	Visited	VisitedBinarySearchTree

де Max – значення максимального зміщення; Visited – прапорець ознаки проходження повідомленням повного кола по усіх агентах; N – максимально припустиме значення ідентифікатора окремого агента; VisitedAgents – бітовий масив із прапорцями ознак проходження повідомлення через відповідних агентів; VisitedBinarySearchTree – бінарне дерево пошуку (структура даних, яка може бути альтернативою лінійному бітовому масиву), V – кількість розрядів необхідна для збереження бінарного дерева пошуку.

Агент, який отримав повідомлення, спочатку записує максимальне значення зміщення своїх координат в поле Max. Потім агент перевіряє значення прапорця Visited і, якщо він дорівнює нулю, то в першому випадку формату повідомлення аналізує комірку з номером агента у масиві VisitedAgents, а в другому випадку формату повідомлення шукає вершину бінарного дерева із числом, яке дорівнює номеру його індексу. Реалізація бінарних дерев пошуку детально розглянута в [3,4]. Якщо агент знаходить свій ідентифікатор, то записує значення 1 у біт Visited. Якщо прапорець Visited встановлений, то агент аналізує значення максимального зміщення координат після визначення середини відрізка і порівнює його із припустимою похибкою рівномірності оточення  $\delta_s$ . Якщо значення зміщення менше, то тоді можна призупинити виконання алгоритму на певний час  $t_s$ . Після цього агент обнуляє всі комірки масиву VisitedAgents, крім комірки із індексом, який дорівнює номеру його ідентифікатора для першого випадку формату повідомлення або звільняє пам'ять, виділену під бінарне дерево, для другого випадку формату повідомлення. Час  $t_s$ , упродовж якого агенти перебувають у стані очікування, визначається під час виконання алгоритму.

Вирішення проблеми визначення оптимального часу очікування. Проблема полягає у визначенні оптимального часу очікування (призупинення роботи)  $t_s$  між двома кроками медіанного алгоритму. До того ж бажано, щоб час очікування був меншим за час зміни форми контуру границі зони збурень. Також зауважимо, що кількість послідовних кроків, які йдуть поспіль без очікування (призупинення) між ними тим менша, чим менші зміни відбулися у формі границі зони збурень перед цим за час очікування  $t_s$ . Відтак можна говорити про деяке оптимальне співвідношення частоти спрацювання медіанного алгоритму (яка задається величиною  $t_s$ ) та невідомої наперед частоти зміни форми контуру зони збурень. З огляду на це можна запропонувати такі дві стратегії визначення оптимального часу очікування (призупинення) між двома кроками медіанного алгоритму: лінійну та логарифмічну. Блок-схема модифікованого медіанного алгоритму з можливістю використання як лінійної, так і логарифмічної стратегії визначення оптимального часу очікування зображена на рис. 1.

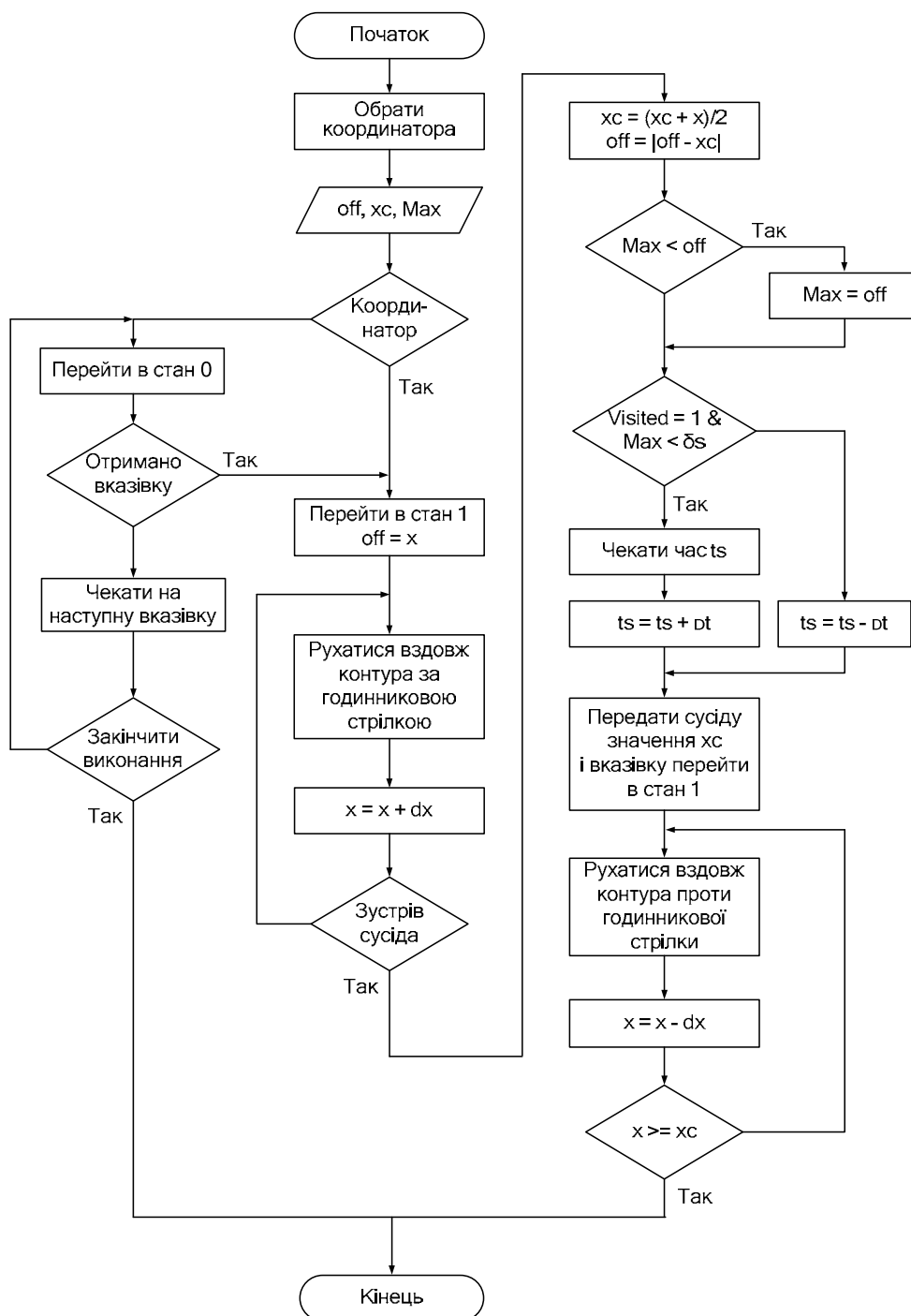


Рис. 1. Блок-схема модифікованого медіанного алгоритму

Поточне значення часу очікування  $t_s$  передається від одного агента іншому по ланцюжку так само як значення максимального зміщення. Якщо цей агент виявляє відхилення поточного розміщення від рівномірного, то він зменшує час очікування на величину  $\Delta t$ . Якщо ж поточне розміщення залишається рівномірним, то час очікування навпаки збільшується на величину  $\Delta t$  (рис. 1). У випадку лінійної стратегії визначення оптимального часу величина  $\Delta t$  є константою, значення якої визначено заздалегідь. У випадку логарифмічної стратегії визначення оптимального часу величина  $\Delta t = t_s / 2$ , що дозволяє здебільшого швидше знаходити оптимальний час оновлення порівняно з лінійною стратегією. Отже, чим частіше агенти виявляють відхилення від рівномірного розміщення (що еквівалентно зміні форми контуру зони збурень), тим меншим стає час очікування  $t_s$  і навпаки. За рахунок цього частота спрацювання медіанного алгоритму підлаштовується під частоту змін форми контуру зони збурень.

**Оцінка збіжності модифікованого медіанного алгоритму.** Нехай відстань між  $i$ -м та  $i+1$ -м агентом:

$$d_i = d^* + \delta_i, \quad (3)$$

де  $\delta_i$  – відхилення від цільової довжини відрізка  $d^*$ , яка повинна бути забезпечена при рівномірному розподілі. На рис. 2 показано умовне зображення границі зони збурень, на якій розташовано колектив мобільних агентів. Кожен агент має свій ідентифікатор від 0 до  $n$ . Нехай вибори координатора здійснені і агент 1 вибраний як координатор. Агент-координатор стає на половині відстані між ним і наступним по годинниковій стрілці сусідом (рис.2).

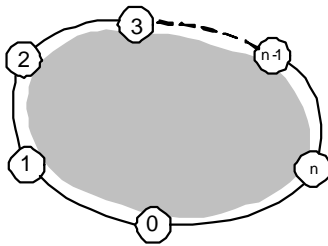


Рис. 2. Схематичне зображення оточеної зони збурень

Після цього є справедливою рівність

$$d_0 = d_1 = \frac{2x + \delta_0 + \delta_1}{2} = x + \frac{\delta_0 + \delta_1}{2}. \quad (4)$$

Надалі матимемо на увазі, що для рівномірного розподілу потрібно, щоб відхилення  $\{\delta_i\}$  або стали дорівнювати нулю або всі стали рівними між собою. Тобто після виконання першого кроку відхилення між агентом 0 і агентом 1 та між агентами 1 і 2 починають дорівнювати половині їхньої суми:

$$\delta_0 = \delta_1 = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2}. \quad (5)$$

Після виконання другого кроку:

$$\delta_1 = \delta_2 = \frac{\frac{\delta_0 + \delta_1}{2} + \delta_2}{2}. \quad (6)$$

Після виконання третього кроку:

$$\delta_2 = \delta_3 = \frac{\frac{\delta_0 + \delta_1}{4} + \frac{\delta_2}{2} + \delta_3}{2} = \frac{\delta_0 + \delta_1}{8} + \frac{\delta_2}{4} + \frac{\delta_3}{2}. \quad (7)$$

Після виконання  $n$ -го кроку:

$$\delta_{n-1} = \delta_n = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2^n} + \frac{\delta_2}{2^{n-1}} + \frac{\delta_3}{2^{n-2}} + \dots + \frac{\delta_n}{2}. \quad (8)$$

Далі все повторюється при кожному проході, тільки із новими значеннями відхилень.

Після виконання другого проходу алгоритму (значення відхилень для другого проходу позначено індексами  $n+i$ ) значення  $\delta_n$ :

$$\delta_n = \delta_{n+1} = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2^{n+1}} + \frac{\delta_2}{2^n} + \frac{\delta_3}{2^{n-1}} + \dots + \frac{\delta_n}{4} + \frac{\delta_{n+1}}{2}. \quad (9)$$

Після виконання другого проходу алгоритму  $\delta_{n+1}$ :

$$\delta_{n+1} = \delta_0 = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2^{n+2}} + \frac{\delta_2}{2^{n+1}} + \frac{\delta_3}{2^n} + \dots + \frac{\delta_n}{8} + \frac{\delta_{n+1}}{4} + \frac{\delta_0 + \delta_1}{4}. \quad (10)$$

Після виконання другого проходу алгоритму значення  $\delta_i$ :

$$\delta_0 = \delta_1 = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2^{n+3}} + \frac{\delta_2}{2^{n+2}} + \frac{\delta_3}{2^{n+1}} + \dots + \frac{\delta_n}{16} + \frac{\delta_{n+1}}{8} + \frac{\delta_0 + \delta_1}{4} + \frac{\delta_2}{4}. \quad (11)$$

Як видно із рівностей (9) – (11) відхилення не зменшуються до нуля, але з часом зрівнюються і в результаті кожне із відхилень набуває вигляду суми часток відношень до відповідних степенів двійки. Із збільшенням кількості кроків збільшується кількість доданків, а також значення знаменників в цих доданках. Після виконання достатньої кількості кроків кожне  $\delta_i$  буде включати доданки, в чисельниках яких, містяться значення  $\{\delta_i\}$  для усіх інших агентів колективу, що призведе до вирівнювання значень кожного із відхилень до потрібної величини, при якій розподіл вважається рівномірним, що, своєю чергою, доводить збіжність алгоритму. При цьому зазначена достатня кількість кроків залежить від кількості агентів та початкових значень відстаней між ними.

*Моделювання модифікованого медіанного алгоритму.* Для оцінювання збіжності алгоритму та ефективності його роботи було проведено низку обчислювальних експериментів для різних початкових розподілів агентів вздовж границі зони збурень. Нехай  $n$  агентів вже розподілені по контуру і пронумеровані від 0 до  $n-1$ . Будемо розглядати такі початкові розподіли агентів, які при однаковій кількості агентів мають однакову початкову величину  $K_{\max}$ . (для випадкового розподілу ця величина коливатиметься між 0 і  $K_{\max}$ ). Нижче розглянуто чотири типи початкового розподілу агентів на границі зони збурення, які використовувались у обчислювальних експериментах.

1. Лінійний розподіл. Відстань між двома сусідніми агентами визначається за формулою

$$d_i = k \cdot \frac{i+1}{n} \cdot K_{\max} + c, \quad (12)$$

де  $i$  – номер агента;  $k, c$  – константи; величина  $K_{\max}$ , визначена в (2). Для прикладу розглянемо колектив автономних мобільних агентів, пронумерованих від 0 до 9 включно. Тоді відстані між агентами при лінійному розподілі схематично можна зобразити на прямій (рис. 3), де пунктиром позначено замикання контуру зони збурень.



Рис. 3. Схематичне зображення відстаней при лінійному розподілі

2. Лінійний розподіл із загасанням. Відстань між двома сусідніми агентами визначається за формулою

$$d_i = k \cdot \left( \frac{i+1}{n} \bmod \frac{n}{2} \right) \cdot K_{\max} + c, \quad (13)$$

де  $i$  – номер агента,  $n$  – кількість агентів;  $k, c$  – константи;  $\bmod$  – бінарна операція взяття залишку від ділення. Для прикладу відстані між автономними мобільними агентами ( $n = 10$ ) при лінійному розподілі із загасанням схематично зображені на рис.4.

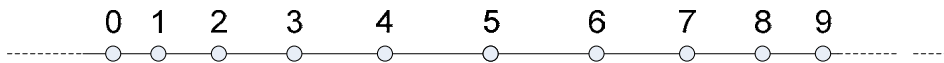


Рис. 4. Схематичне зображення відстаней при лінійному розподілі із загасанням

3. Централізований розподіл. Відстань між двома сусідніми агентами визначається за формулою

$$\begin{aligned} i = \frac{n}{2} &\Rightarrow d_i = K_{\max} \\ i \neq \frac{n}{2} &\Rightarrow d_i = c, \end{aligned} \quad (14)$$

де  $i$  – номер агента;  $c$  – константа. Для прикладу відстані між автономними мобільними агентами ( $n = 10$ ) при централізованому розподілі схематично зображені на рис.5.

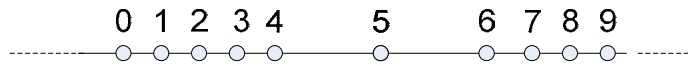


Рис. 5. Схематичне зображення відстаней при централізованому розподілі

4. Випадковий розподіл. Нехай  $M$  множина усіх можливих позицій розміщення агента на границі зони збурення і  $m$  – загальна кількість таких позицій. Позначимо через  $A_i$  подію при якій  $i$ -й агент буде розташований в деякій позиції  $\mu \in M$ . Тоді ймовірність події  $A_i$  дорівнюватиме

$$P(A_i) = \frac{1}{m}. \quad (15)$$

Тобто, при випадковому розподілі позиція розташування окремого агента  $\mu$  не залежить від позицій інших агентів, лише з тим обмеженням, що два агенти не можуть бути розташовані в одній позиції.

У таблиці наведені результати моделювання модифікованого медіанного алгоритму, які показують залежність кількості кроків, які потрібні для досягнення рівномірного розподілу агентів вздовж границі зони збурень, від кількості агентів для розглянутих вище різних типів початкового розподілу агентів на границі ( $n$  – кількість агентів,  $K_{max}$  – максимальне відхилення відстані між сусідніми агентами від цільової,  $L_1$  – кількість кроків для лінійного розподілу,  $L_2$  – кількість кроків для лінійного розподілу із загасанням,  $C$  – кількість кроків для централізованого розподілу,  $R$  – кількість кроків для випадкового розподілу).

#### Результати моделювання медіанного алгоритму

$n$	$K_{max}$	$L_1$	$L_2$	$C$	$R$
10	80	500	503	477	481
20	180	3600	3636	3316	3000
30	280	11932	12090	10770	10664
40	380	28314	28684	25145	26183
50	480	55571	56309	48735	51131

Аналіз отриманих результатів моделювання показує, що кількість кроків, які потрібні для виконання алгоритму, збільшується із збільшенням кількості агентів, які виконують алгоритм (у разі збільшення кількості агентів в два рази, необхідна кількість кроків алгоритму збільшується майже на порядок). При цьому різниця у результатах для різних типів початкового розподілу для однакової кількості агентів є незначною.

#### Висновки

У роботі запропоновано нові шляхи покращення медіанного алгоритму рівномірного розподілу колективу автономних мобільних агентів навколо виявленої ними зони збурень у деякому середовищі. Досліджено основні властивості алгоритму та запропоновані шляхи його покращення. Наведено оцінку збіжності вдосконаленого варіанта алгоритму та показані результати обчислювальних експериментів з дослідження алгоритму. Результати проведених експериментів показали, що за допомогою вдосконаленого медіанного алгоритму колектив автономних мобільних агентів здатний знаходити рівномірне розміщення на границі зони збурень, що динамічно змінює свою форму.

1. Бочкарёв А.Ю., Голембо В.А. Самоорганизация коллектива мобильных измерительных агентов в задаче распределенных контактных измерений // Искусственный интеллект, Донецк, № 3, 2005. – С.723–731. 2. Бочкарёв О.Ю., Голембо В.А., Грицуляк Т.О., Параметрична самоорганізація колективу вимірювальних агентів: задача оточення зони збурень // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. “Комп’ютерні системи та мережі”, 2004, № 523. – С.6–15. 3. Кнут Д. Искусство программирования, Т. 3. Сортировка и поиск – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2007. – 824 с. 4. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ / Под ред. И. В. Красикова. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2005. – 1296 с.