

УДК 531.7.08

А. С. Дуднік, канд. техн. наук

Київський національний університет імені Т. Шевченка, м. Київ

## МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВІДСТАНІ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ ЗАСОБАМИ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

На сьогоднішній день у всьому світі усе більш пильну увагу привертають до себе «безпроводні сенсорні мережі» («Sensor Networks», далі просто сенсорні мережі). Поняття «Сенсорна мережа» з'явилося порівняно недавно (кілька років тому) але на сьогоднішній день є вже повністю сталим терміном (Sensor Network), що означає розподілену, таку, що самоорганізовується, стійку до відмови окремих елементів мережу, що складається з великого числа малогабаритних і дешевих напівпроводникових приладів, що обмінюються інформацією по безпроводному каналу зв'язку, не обслуговуються і не вимагають спеціальної установки. Кожен пристрій може містити різні датчики фізичних параметрів середовища (рух, світло, температура, вологість, тиск і так далі), а також засоби для первинної обробки і зберігання отриманих даних. Кількість об'єктів в такій мережі теоретично визначається лише сферою застосування і бюджетом, і завдяки низькій ціні окремих пристроїв (порядку декілька доларів і нижче) може бути дуже велике (порядку декілька тисяч і вище). Різні методи намагаються оцінити відстань між двома вузлами, використовуючи час, виміри часу поширення сигналу від передавача до приймача так, щоб на його основі було розрахувати відстань між передавачем і приймачем. У статті проведено порівняльний аналіз методів та алгоритмів локалізації з використанням наступних компонентів систем локалізації: оцінка відстані/кута, обчислення позиції та алгоритм локалізації. Вибір методу оцінки відстані між вузлами в системі локалізації є важливим коефіцієнтом, який впливає на продуктивність системи. Зазвичай, щоб оцінити точне розташування вузла потрібно використовувати принаймні три оцінки відстані. Визначено, що для для сенсорних мереж, найважливіше – те, що сам вузол обчислює свою власну позицію, тому для цього необхідно мати принаймні три вузли з відомими координатами. Невідомий вузол оцінює свій кут до кожного з трьох опорних вузлів, заснований на цих кутах і на позиціях опорних вузлів (які формують трикутник), обчислює свою власну позицію, використовуючи прості тригонометричні співвідношення.

**Ключові слова:** *безпроводна сенсорна мережа, вузол, якір, похибка, локалізація, zigbee.*

**Вступ.** Однією з актуальних задач є визначення місця розташування окремих об'єктів мережі. Неодмінною умовою при експлуатації будь-яких систем моніторингу та контролю є прив'язка даних, зібра-

них всією системою до географічних координат для відображення зібраної інформації на карті і подальшого аналізу. Крім того, така мережа (на відміну від традиційних радіомереж) за наявності вбудованої підсистеми позиціонування окремих об'єктів може бути розгорнута практично де завгодно з мінімальними витратами. Це може бути зроблено, наприклад, шляхом розкидання об'єктів мережі з літака.

Крім прив'язки отриманих мережею даних в процесі роботи до карти місцевості, інформація про координати об'єктів буде необхідна в процесі функціонування самої мережі (побудова ефективних з точки зору енергоспоживання алгоритмів маршрутизації, збір отриманих даних).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням дослідження інформаційно-вимірювальних систем, в тому числі і дослідженням технологій моделювання, управління і взаємодії комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин, присвячено роботи сучасних вчених Кваснікова В. П., Орнадського Д. П., Осмоловського А. І., а також роботи Геєра Д., Ірвіна Дж., Лієрі Дж., Рошана П., Столлінгса В., Харля Д. та ін.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Даний підхід до формування мережі дозволяє адаптувати сенсорні мережі до вирішення надзвичайно широкого спектру завдань. Зокрема одним з основних застосувань сенсорних мереж є створення різних систем моніторингу і контролю. Слід чекати, що в недалекому майбутньому сенсорні мережі займуть значно ширшу нішу серед наявних телекомунікаційних технологій, які використовують безпроводний радіозв'язок.

У зв'язку з цим аналіз пошук методів визначення координат об'єктів в сенсорній мережі стає актуальним завданням.

**Мета статті.** Пошук алгоритмів локалізації об'єктів та можливих джерел інформації про географічне місце розташування об'єктів.

**Виклад основного матеріалу.** Різні методи намагаються оцінити відстань між двома вузлами, використовуючи час, виміри часу поширення сигналу від передавача до приймача так, щоб на його основі можна було розрахувати відстань між передавачем і приймачем. Найпростішим є ToA — Time of Arrival (рис. 1, а) [1, с. 117]. В цьому випадку, відстань між двома вузлами безпосередньо пропорційна часу, коли сигнал використовується, щоб поширитися від одного пункту до іншого. Відстань між відправником і приймачем визначається за формулою:

$$d = S_r (t_2 - t_1),$$

де  $S_r$  — швидкість поширення радіосигналу (швидкість світла),  $t_1$  і  $t_2$  — час, коли сигнал відіслано і отримано. Цей тип оцінки вимагає точно синхронізованих вузлів, і час, коли сигнал залишає вузол, має бути в пакеті, який посилають [2, с. 51].

TDoA (Time Difference of Arrival) (рис. 1, б) заснований на відмінності часів коли єдиний сигнал від одного вузла прибуває в три або більше вузли або різниці часу, коли кілька сигналів від одного вузла надходять в інший вузол. Перший випадок, більш поширений в стільникових зв'язках, вимагає точно синхронізованих вузлів приймача (в цьому випадку, базові станції).

У другому випадку, більш поширеному і відповідному до бездротових сенсорних мереж, вузли повинні бути обладнані додатковими апаратними засобами, здатними до відправлення двох типів сигналів одночасно. У цих сигналів повинні бути різні швидкості поширення, як радіо / ультразвук або радіо/акустичний. Зазвичай, перший сигнал — пакет безпосередньо, який із швидкістю світла ( $\sim 300,000 \text{ km/c}$ ), і другий сигнал — деякий звук, через його повільніше поширення ( $\approx 340 \text{ м/c}$ ) [2, с. 65].

Метод TDoA використовується для обчислення координат бездротових сенсорних мереж, де ультразвуковий імпульс передається одночасно з радіосигналом. В цьому випадку, вузли вираховують різницю часу прибуття двох сигналів. Відстань може тепер бути обчислена наступною формулою:

$$d = (S_r - S_s)(t_2 - t_1),$$

де  $S_r$  і  $S_s$  — швидкість поширення радіо та ультразвукового сигналу,  $t_1$  і  $t_2$  — час прибуття радіо та ультразвукових сигналів, відповідно.

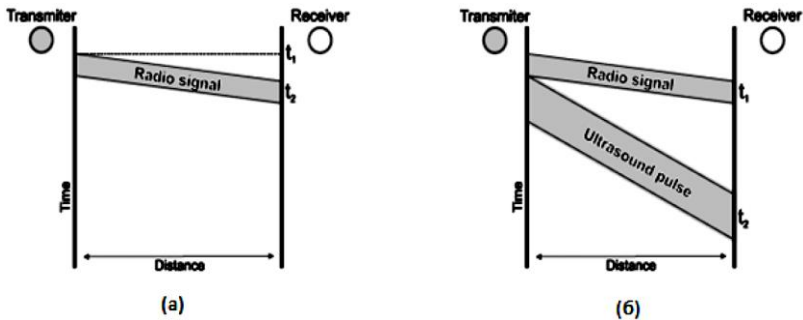


Рис. 1. Визначення відстаней за допомогою методів:

а) TOA — (Time of Arrival); б) TDOA (Time Difference of Arrival)

Оцінка помилки на відстані, отримані TDOA, вимірюються в сантиметрах. Експерименти з ультразвуком, показують помилки приблизно два або три сантиметри (менші ніж вузол).

Незважаючи на більш низькі помилки, у цих методах є певні недоліки. Перший — потреба додаткових апаратних засобів щоб надсилати другий сигнал, який збільшує вартість вузла. Другий — діапазон другого сигналу, який зазвичай менший між 3 м і 10 м з більш потужними передавачами [3, с. 12].

Метод визначення координат на основі кута отриманого сигналу (від англ. Angle of Arrival, AOA), координати мобільних вузлів розраховуються за законами гоніометрії [4, с. 325]. За допомогою спрямованих антен або набору антен, мобільним вузлом вимірюються кути приходу сигналів від стаціонарних вузлів, з відомими координатами (рис. 2). По вимірних напрямках обчислюється координати рухливого об'єкту. Точність цього підходу обмежена можливими затуханнями сигналу на вимірювальній апаратурі, так само через багатопроменеві відображення сигналу, які приходять з різних напрямів.

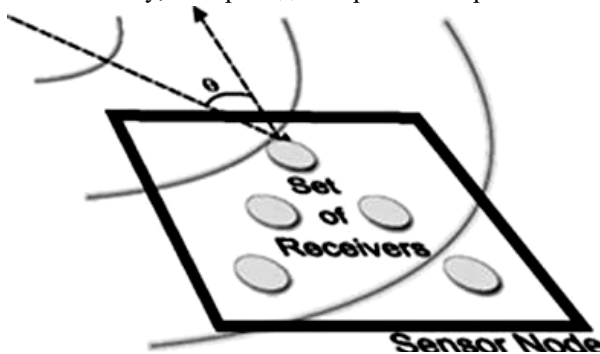


Рис. 2. Angle of Arrival

Експерименти показують, що цей метод має похибку в кілька градусів (близько 5 на практиці до 36) [4, с. 325]. Недоліками цього методу є необхідність додаткового обладнання та необхідність мінімальної відстані між приймачами.

В деяких випадках, інформацію для оцінки відстані є тільки дальність зв'язку вузлів. Якщо вузол отримує пакет даних з іншого вузла, то відстань між цими вузлами між нулем і максимальною дальністю зв'язку.

Як правило, методики, які використовують цей метод оцінки відстані не потребують точної відстані, а тільки інтервал. Щоб отримати тільки відстань (а не інтервал), ми можемо вибрати одну точку з інтервалу, як в середній точці, наприклад. В цьому випадку максимальна похибка цієї оцінки буде наполовину менша від дальності зв'язку.

Цей метод визначення відстані має ту перевагу, що найпростіший і з найменшими витратами. Додаткового обладнання не потрібно, так само як і додаткових обчислень, необхідних для оцінки відстані. З іншого боку, похибка розміром 50% від дальності зв'язку для кожної відстані, є не придатною для більшості систем локалізації. Візьмемо, наприклад дальність зв'язку до 100 метрів. У цьому випадку похибка цього методу може бути близько 50 м [4, с. 325].

Коли у вузла є досить інформації про відстані або кути позицій, тоді можна визначити свою власну позицію, використовуючи один з методів, які будуть розглянуті далі.

Декілька методів можуть використовуватися, щоб вирахувати позицію вузла. Такі методи включають: трилатерацію, мультилатерацію, триангуляцію. Вибір, який метод використовувати, залежить від кінцевої продуктивності системи локалізації. Такий вибір залежить від доступної інформації і від обмежень процесора.

Трилатерація — основний та найпростіший метод. Цей метод обчислює позицію вузла перетином трьох кругів, як зображено на рисунку 3. Щоб оцінити його позицію, використовуючи трилатерацію, вузол повинен знати положення трьох довідкових вузлів і відстані до кожного з цих вузлів. Відстані можуть бути обчислені, використовуючи один з вищезгаданих методів.

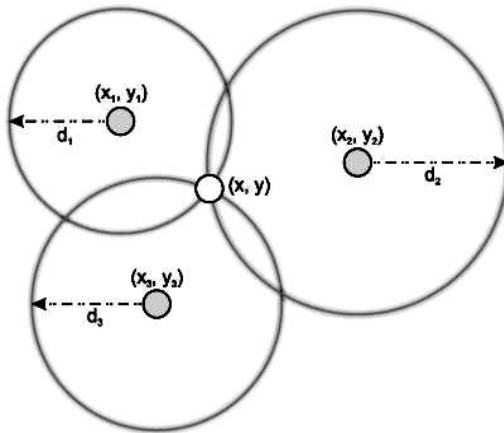


Рис. 3. Теоретична модель трилатерації

Кола, які сформовані положенням і відстанню до кожної точки виражаються за формулою:

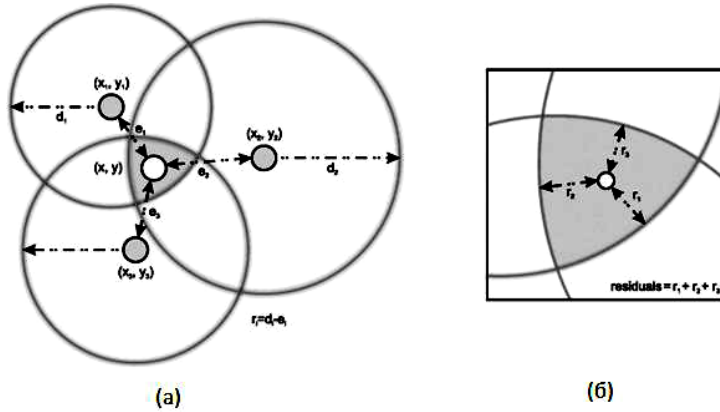
$$(\hat{x} - x_1)^2 + (\hat{y} - y_1)^2 = d_1^2,$$

$$(\hat{x} - x_2)^2 + (\hat{y} - y_2)^2 = d_2^2,$$

$$(\hat{x} - x_3)^2 + (\hat{y} - y_3)^2 = d_3^2,$$

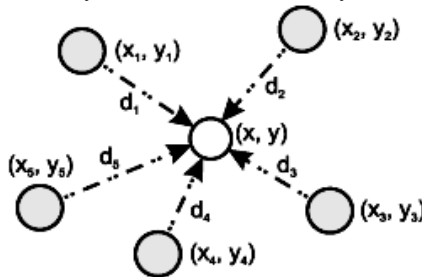
де  $(\hat{x}, \hat{y})$  — позиція яку потрібно знайти,  $(x_i, y_i)$  — позиція якірних вузлів,  $d_i$  та — відстань якірного вузла до невідомого вузла. В цьому випадку, у нас є три квадратичні рівняння з двома невідомими, які можуть бути вирішені, теоретично.

У практичному застосуванні важко оцінити відстані і точну інформацію про розташування довідкових вузлів, щоб обчислити координати. Як зображено на рисунку 4 а, кола не перетинаються лише в одній точці, що призводить до нескінченного набору можливих рішень.



**Рис. 4.** Практична модель трилатерації: а) невідповідність позицій і відстаней генерують систему з нескінченними рішеннями; б) залишкове значення, як сума квадратів різниць між передбачуваними і обчисленими відстанями

Крім того, коли доступно більше трьох вузлів з відомими координатами, ми можемо використати метод мультилатерації, щоб обчислити положення вузла. Тоді невизначена система рівнянь, де число рівнянь більше (за рахунок збільшення числа якірних вузлів), кількість невідомих повинна бути вирішена. На рисунку 5 зображений цей випадок. Зазвичай, у таких систем не має унікального вирішення.



**Рис. 5.** Модель мултилатерації, застосовується тільки тоді коли використовується більше ніж три якірні вузли

Розглянувши  $n$  якірних вузлів і похибку оцінки відстані, яка складає  $d_i = \hat{d}_i - \epsilon$ , система рівнянь виглядатиме наступним чином:

$$\begin{aligned}
 (\hat{x} - x_1)^2 + (\hat{y} - y_1)^2 &= \hat{d}_1^2 - \epsilon \\
 &\vdots \\
 (\hat{x} - x_n)^2 + (\hat{y} - y_n)^2 &= \hat{d}_n^2 - \epsilon
 \end{aligned}$$

де,  $\epsilon$  — зазвичай вважається незалежна нормальна випадкова величина.

Враховуючи останню рівність, систему рівнянь можна спростити до лінійної,  $Ax \approx b$ , або:

$$\begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_1^2 - d_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_{n-1}^2 - d_n^2 \end{bmatrix}.$$

Ця лінійна система може бути розв'язана, використовуючи стандартні методи як підхід найменших квадратів. Це може бути зроблено наступним чином:

$$x = (A^T A)^{-1} (A^T b).$$

Основна ідея цього методу полягає в мінімізації суми квадратів різниці між розрахунками (наприклад, за допомогою RSSI) і обчислені відстані (за оцінками, положення). Сума відмінностей відома як залишки, як показано на рисунку 4 б.

Математично записується так:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \min \left( \sum_{i=1}^n (\sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2} - d_i)^2 \right),$$

де  $(x_i, y_i)$  позиція опорного вузла,  $d_i$  — оцінка відстані,  $\sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2} - d_i$  — відстань між обчисленою позицією і позицією опорного вузла, який є обчисленим відстанню.

Необхідно обчислити декілька операцій з плаваючою комою в залежності від методу який вираховує положення, що використовується для вирішення системи рівнянь. У випадку методу найменших квадратів  $\left(m + \frac{n}{3}\right)n^2$ , операцій з плаваючою комою (де  $m$  — кількість невідомих і  $n$  — кількість рівнянь) необхідних для визначення позиції [5, с. 61].

В методі триангуляція, використовується інформація кутів замість відстаней. Обчислення позиції може бути зроблене віддалено або вузлом безпосередньо. У обох випадках позиція обчислюється з використанням тригонометрії законам синусів і косинусів.

У першому випадку, віддаленого позиціонування, зображено на рисунку 6.а принаймні два опорні вузли оцінюють кут прибуття і віддалено обчислюють положення невідомого вузла як місце, де лінії кутів від кожного опорного вузла перетинаються. Цей тип триангуляції в основному використовується у стільникових зв'язках [4, с. 325].

Але для сенсорних мереж, найважливіше — те, що сам вузол обчислює свою власну позицію, тому для цього необхідно мати принаймні три вузли з відомими координатами (рис. 6 б). Невідомий вузол оцінює

свій кут до кожного з трьох опорних вузлів, заснований на цих кутах і на позиціях опорних вузлів (які формують трикутник), обчислює свою власну позицію, використовуючи прості тригонометричні співвідношення [6, с. 238]. Цей метод подібний до методу трилатерації.

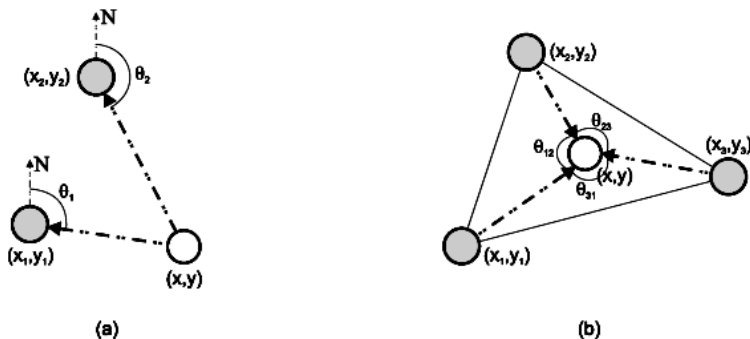


Рис. 6. Триангуляція: а) двома якірними вузлами; б) трьома якірними вузлами

**Висновки.** Проведено порівняльний аналіз методів та алгоритмів локалізації з використанням наступних компонентів систем локалізації: оцінка відстані/кута, обчислення позиції та алгоритм локалізації.

Вибір методу оцінки відстані між вузлами в системі локалізації є важливим коефіцієнтом, який впливає на продуктивність системи. Зазвичай, щоб оцінити точне розташування вузла потрібно використовувати принаймні три оцінки відстані.

### Список використаних джерел:

1. Hofmann-Wellenho B. Global Positioning System: Theory and Practice / B. Hofmann-Wellenho, H. Lichtenegger, J. Collins. — 4th ed. — Berlin, 2003.
2. Elson J. Time synchronization in wireless sensor networks / J. Elson // Department Computer Sciences, University of California, Ph.D. dissertation. — Los Angeles, 2003.
3. Whitehouse K. The design of calamari: An ad hoc localization system for sensor networks / K. Whitehouse. — Berkeley, 2009.
4. Priyantha N. The cricket compass for context aware mobile applications / N. Priyantha, H. Balakrishnan, S. Teller // In 7th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. — Rome, 2006. — P. 325.
5. Golub G., Van Loan C. Matrix Computations / G. Golub, C. Van Loan. — 3rd ed. — Baltimore, 2010. — P. 213.
6. Niculescu D. Ad hoc positioning system (aps) using aoa / D. Niculescu, B. Nath // I Proceedings of INFOCOM 2003. — San Francisco, 2009. — P. 238.
7. Niculescu D. Ad hoc positioning system (aps) using aoa / D. Niculescu, B. Nath // I Proceedings of INFOCOM 2009. — San Francisco, 2009. — P. 238.
8. Priyantha N. The cricket compass for context aware mobile applications / N. Priyantha, H. Balakrishnan, S. Teller // In 17th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. — Rome, 2016. — P. 325.



9. Savvides A. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors / A. Savvides, C. Han, M. Strivastava // In 7th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. — Rome, 2010. — P. 166–179.
10. Yu Y. Geographical and energy aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks / Y. Yu, R. Govindan, D. Estrin // Technical Report CSD-TR-01-0023, UCLA Computer Science Department. — 2011.
11. Квасніков В. П. Концепція повірки координатно-вимірювальних машин через Інтернет / В. П. Квасніков, Т. М. Хаєїн // Метрологія та прилади. — 2013. — № 6. — С. 48–53.
12. Квасніков В. П. Способи побудови аналогових інтерфейсів інформаційно-вимірювальних систем механічних величин / В. П. Квасніков, Д. П. Орнатський, Т. П. Нічкова, І. В. Гаврилов // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». — 2013. — № 1. — С. 164–169.
13. Орнатський Д. П. Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань переміщень диференціально-трансформаторними індуктивними датчиками / Д. П. Орнатський, М. В. Михалко, О. І. Осмоловський // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2014. — № 1/2 (67). — С. 52–57.

## METHODS OF DETERMINATION BETWEEN OBJECTS BY SENSOR NETWORKS

To date, «wireless sensory networks» («Sensor Networks»), hereinafter referred to as sensory networks) attract more and more attention all over the world. The concept of «Sensor Network» appeared relatively recently (several years ago), but to date there is already a completely constant term (Sensor Network), which means distributed, self-organizing, resistant to the failure of individual elements of the network consisting of a large number small and cheap semiconductor devices that exchange information over a wireless communication channel, are not serviced and do not require a special installation. Each device can contain various sensors of physical parameters of the medium (motion, light, temperature, humidity, pressure, etc.), as well as means for the primary processing and storage of the received data. The number of objects in such a network is theoretically determined only by the scope and budget, and due to the low price of individual devices (about a few dollars and below) can be very large (about a few thousand and above). Different methods try to estimate the distance between two nodes using time, measurements of the time of signal propagation from the transmitter to the receiver so that on its basis it was possible to calculate the distance between the transmitter and the receiver. In the article a comparative analysis of methods and algorithms of localization using the following components of localization systems: distance / angle estimation, position calculations and localization algorithm are carried out. Choosing a method for estimating the distance between nodes in a localization system is an important factor that affects the system's performance. Usually, to estimate the exact location of the site, you must use at least three distance estimates. It is determined that for sensory networks, the most important thing is that the node itself calculates its own position, so it is necessary for it to have at least three knots with known coordinates. An unknown node evaluates its angle to each of

the three reference nodes, based on these corners and at the positions of the reference nodes (which form the triangle), calculates its own position using simple trigonometric relationships.

**Key words:** *wireless sensor network, node, anchor, error, localization, zigbee.*

Отримано: 16.07.2018

УДК 519.64

**А. А. Дячук\***, канд. техн. наук,

**Н. Л. Костьян\*\***, канд. техн. наук

\* НУ «Институт экономики и прогнозирования НАН Украины», г. Киев,

\*\*Черкасский государственный технологический университет,  
г. Черкассы

## **КОЛЛОКАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ВОЛЬТЕРРЫ**

Несмотря на широкое использование метода коллокации для решения интегральных уравнений с постоянными пределами интегрирования, до сих пор мало внимания уделялось реализации данного метода применительно к интегральным уравнениям с переменными пределами. В данной статье рассматриваются задачи решения интегральных уравнений Вольтерры 1 и 2 рода. Приближенное решение определяется в виде кусочно-гладкого полинома, составленного из полиномов по участкам области определения переменной интегрирования. Алгоритм метода представляет собой итерационный процесс. Задача сводится к решению систем в общем случае нелинейных уравнений относительно коэффициентов соответствующих полиномов. На каждом шаге итерации определяется аналитическое выражение для очередного полинома, что позволяет найти решение в любой точке заданного интервала. Особенностью коллокационного алгоритма для уравнений Вольтерры 2 рода является замена квадратурными формулами интегралов, которые входят в систему уравнений относительно приближенных значений коэффициентов. Выбор коэффициентов квадратурных формул зависит от принятого количества узлов на участке. В работе рассмотрен частный случай системы для трех узлов. При этом была произведена замена подынтегрального выражения решаемого уравнения интерполяционным многочленом в форме Ньютона. Результаты решения тестовых примеров подтверждают работоспособность предложенных алгоритмов и свидетельствуют о высокой точности расчетов. Метод коллокации позволяет получать решения уравнений Вольтерры по участкам промежутка интегрирования, выбирая их длину и применяя на каждом из них аппроксимирующее выражение с небольшим числом коор-