

## ЛОКАЛІЗАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ У БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

*В статті розглянуто аспекти локалізації, основні складові завдання локалізації, класифікацію алгоритмів локалізації.*

*Проведено аналіз методів вирішення проблеми локалізації.*

*В результаті, враховуючи ряд критеріїв, було визначено найбільш перспективний метод локалізації, його переваги, недоліки, а також напрямки його подальшого вивчення.*

*Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, моніторинг, вузли мережі, локалізація, алгоритм, координати, сигнал, мультилатерація, триангуляція, трилатерація, позиціонування.*

**Вступ.** В останні роки в усьому світі все більш пильну увагу привертають до себе "безпроводні сенсорні мережі" ("Sensor Networks", далі БСМ). Основною їх відмінністю від класичних радіомереж є використання в якості об'єктів мережі більшого числа надмініатюрних і дешевих пристроїв. Даний підхід до формування мережі дозволяє адаптувати сенсорні мережі до вирішення надзвичайно широкого спектра завдань. Зокрема одним з основних застосувань сенсорних мереж є створення різноманітних систем моніторингу та контролю. Слід очікувати що в майбутньому БСМ займуть свою нішу серед наявних телекомунікаційних технологій, які використовують бездротовий радіозв'язок.

До недавнього часу питанням пов'язаним з виробництвом і розширенням БСМ вже присвячено велику кількість робіт, переважно зарубіжних авторів. Тематика робіт простягається від вузькоспеціальних питань, пов'язаних із створенням окремих компонентів об'єктів мережі (мікроконтролерів, давачів і т.д.) з низькою ціною та енергоспоживанням до проблем, які виникають при експлуатації сенсорних мереж (питання пов'язані з організацією роботи мережі, розробка програмного забезпечення, прив'язка місця розташування об'єктів мережі до географічних координат і ін.). Принципова можливість визначення координат окремих об'єктів мережі робить ці системи ще більш привабливими завдяки здешевленню і зменшенню енергоспоживання окремих пристроїв (за рахунок відсутності необхідності використовувати давачі GPS), спрощенню розгортання таких мереж (наприклад шляхом розкидання пристроїв з літака), можливості використовувати БСМ у важкодоступних місцях. При цьому слід зазначити, що визначення координат на сьогоднішній день фактично є невід'ємною частиною багатьох бездротових телекомунікаційних мереж, зокрема мереж стільникового зв'язку, однак незважаючи на однакові принципи визначення координат (геометрична триангуляція) в силу специфіки мережі питання визначення координат в них вирішуються по-різному. На сьогоднішній день опубліковано ряд робіт зарубіжних авторів, присвячених питанню визначення координат в таких мережах на основі використання інформації про взаємне розташування об'єктів мережі (відстаней, напрямків, азимута), одержуваної в процесі роботи. Тим не менш універсального рішення, (при відсутності апріорної інформації про топологію мережі, без використання звукових сигналів, без вирішення складних оптимізаційних задач та ін.) на разі не знайдено, а значить дана область актуальна для проведення подальших наукових досліджень.

В якості першого аспекту локалізації розглянемо задання системи координат. Вона може бути глобальною (наприклад, якщо джерелом еталонних координат є пристрій, обладнаний GPS) або відносною, у разі, коли вузли використовують деякі умовні координати. Також виділяється локальна система координат (в випадку прив'язки відносної системи до локальної області, наприклад, до схеми будівлі). Другий аспект – наявність, так званих, опорних вузлів (reference, beacon, anchor nodes). Опорним вузлом апріорно задаються фізичні координати або вони обладнуються модулями глобального позиціонування GPS, ГЛОНАСС і т.д. Алгоритми локалізації використовують опорні вузли для визначення

координат інших вузлів (blindfolded, non-anchor nodes). При цьому одні алгоритми локалізують вузли у відносній системі координат, потім використовують кілька опорних вузлів для перетворення відносних координат в глобальні, інші - використовують сигнальні вузли для безпосереднього обчислення глобальних координат вузлів.

Виділяють кілька основних складових завдання локалізації: метод визначення відстані між вузлами, алгоритм визначення положення відносно опорних вузлів, методи поліпшення (підвищення точності) отриманих в результаті виконання алгоритмів даних.

Метою даної роботи є вивчення існуючих і вибір найбільш перспективних підходів до вирішення проблеми локалізації в БСМ.

Серед методів визначення відстані між вузлами виділяють три класи методів: засновані на аналізі інформації про кути прийому сигналів, пов'язані з визначенням відстані між об'єктами і профілювання сили сигналу.

**Методи, засновані на аналізі інформації про кути прийому сигналів** (angle of arrival, AOA). Інформацію про кути приходу сигналів зазвичай збирається за допомогою мікрофонів або радіо. Її також можна отримати, використовуючи оптичні методи зв'язку. В таких методах кілька мікрофонів вловлюють один і той же сигнал. Аналізуючи фазу або різницю приходу сигналу в різних мікрофонах, можна визначити кут приходу сигналу. Подібні методи дають точність порядку декількох кутових градусів [1]. Однак обладнання, необхідне для обчислення кута сигналу, досить складне і дороге. Крім цього, для здійснення пеленгації, мікрофони повинні бути на відстані, що впливає на розмір пристроїв мережі.

**Методи, пов'язані з визначенням відстані між об'єктами.** Вимірювання в цьому класі методів засновані на: часі розповсюдження сигналу (propagation time based measurements), потужності прийнятого сигналу (received signal strength based measurements), досяжності (connectivity measurements).

**Методи, засновані на аналізі потужності сигналів** (received signal strength profiling techniques). Часто буває складно вибрати відповідну модель розповсюдження радіохвиль для використання методів вимірювань, заснованих на силі прийнятого сигналу. Також непросто підібрати відповідні параметри цієї моделі для конкретної реалізації БСМ. Подібні труднощі можуть бути подолані при використанні методів, заснованих на аналізі потужності сигналу - вони оцінюють становище вузлів безпосередньо виходячи з вимірів RSS (received signal strength). [2] Дана техніка полягає в наступному: в першу чергу створюється карта потужності сигналів, випромінюваних опорними вузлами в зоні, що нас цікавить. Карта може бути отримана, як апіорними вимірами, до введення мережі в дію (offline), так і в процесі роботи БСМ (online) з використанням прослуховуючих пристроїв, які розміщені в місцях із заздалегідь відомими координатами. Звертаючись до даної карти, звичайні вузли можуть оцінити своє місце розташування з використанням даних про потужність прийнятого сигналу.

Алгоритми локалізації можна розділити на ті, що використовують інформацію про відстань між об'єктами (measurement-based, range-based) і про досяжності об'єктів (connectivity-based, range-free).

Ще одна класифікація алгоритмів заснована на їх обчислювальній організації. Централізовані алгоритми розробляються для виконання на центральній машині з великим потенціалом обчислювальної потужності. Вузли збирають інформацію про фізичні параметри об'єкта і передають її на базові станції для подальшої обробки, після чого обчислені координати для кожного вузла повертаються в мережу. Централізовані алгоритми обходять проблему обмеженості обчислювальних ресурсів, проте завдають великі витрати на передачу даних на базову станцію і від неї. Це принципове обмеження проявляється сильніше при зростанні мережі, при цьому основне навантаження лягає на вузли, найближчі до базових станцій. Частково проблема може бути вирішена встановленням декількох базових станцій.

Діаметральний підхід - розподілені алгоритми. Розробляються для роботи в мережі, використовуючи масовий паралелізм і взаємодії між вузлами для компенсації дефіциту

обчислювальних ресурсів. Часто розподілені алгоритми використовують підмножини даних для визначення позицій кожного з вузлів окремо, тобто полегшену апроксимацію відповідного централізованого алгоритму, в якому враховуються і використовуються всі дані для єдиного обчислення координат. Розподілені алгоритми досягають надійності за рахунок ітеративного поширення інформації по мережі за допомогою елементарних переходів.

Lee D. [3] пропонує поділ алгоритмів локалізації на ті, що використовують геометричні обмеження (geometrical confinement) та ітеративне удосконалення (iterative refinement). Перші оцінюють становище мети шляхом аналізу геометрії з'єднань (оцінок дистанцій) і вузлів (оцінок позицій). Другі визначають положення, зменшуючи помилку з використанням градієнтного пошуку. В Локалізації алгоритмів і стратегії для безпроводних сенсорних мереж [4] методи локалізації поділяються на геометричні методи (наприклад, мультилатерація, триангуляція і т.д.) і методи відбитків (fingerprinting methods). Геометричні методи локалізують пристрої на основі оцінки властивостей певних випромінюваних елементами мережі сигналів. Методи відбитків являють собою двоетапний підхід. Під час першої фази алгоритму (offline phase) формується база даних на основі параметрів сигналів. Ця база даних використовується під час другої фази для визначення місця положення вузлів.

Опишемо основні існуючі на даний момент методи вирішення проблеми локалізації. Почнемо з методу «DV-distance» [5]. Принцип його дії полягає в наступному. Спочатку всі опорні вузли розсилають ширококомвні повідомлення про себе іншим вузлам мережі. Повідомлення пересилаються іншими вузлами мережі крок за кроком, при цьому в повідомленні міститься інформація про виміряні в процесі переходів відстані між вузлами. Кожен вузол містить таблицю з інформацією про опорні вузли і визначає мінімальну відстань до кожного такого вузла. Таким чином, звичайний вузол зможе використовувати, наприклад, трилатерацію для оцінки свого положення при наявності відстаней до трьох опорних вузлів у разі розміщення вузлів на площині.

**Триангуляцією** називається процес розбиття полігональної області зі складною конфігурацією в набір трикутників. При аналізі або синтезі складних поверхонь їх апроксимують сіткою трикутників, і в наслідку оперують з найпростішими полігонами, тобто з кожним з трикутників. Використання триангуляції пояснюється наступними причинами:

- Трикутник є найпростішим полігоном, вершини якого однозначно задають грань;
- Будь-яку область можна гарантовано розбити на трикутники;
- Для трикутника легко визначити три його найближчих сусіда, що мають з ним спільні грані;
- Обчислювальна складність алгоритмів розбиття на трикутники істотно менше, ніж при використанні інших полігонів.

Для наочного подання триангуляції була змодельована математична модель за допомогою функції Делоне (рис. 1). Зображена на графіку складна полігональна область за допомогою триангуляції Делоне була розбита в набір трикутників. Існує велика кількість алгоритмів позиціонування, в основному їх підходи розрізняються методами триангуляції, які в свою чергу залежать від обладнання, що використовується.

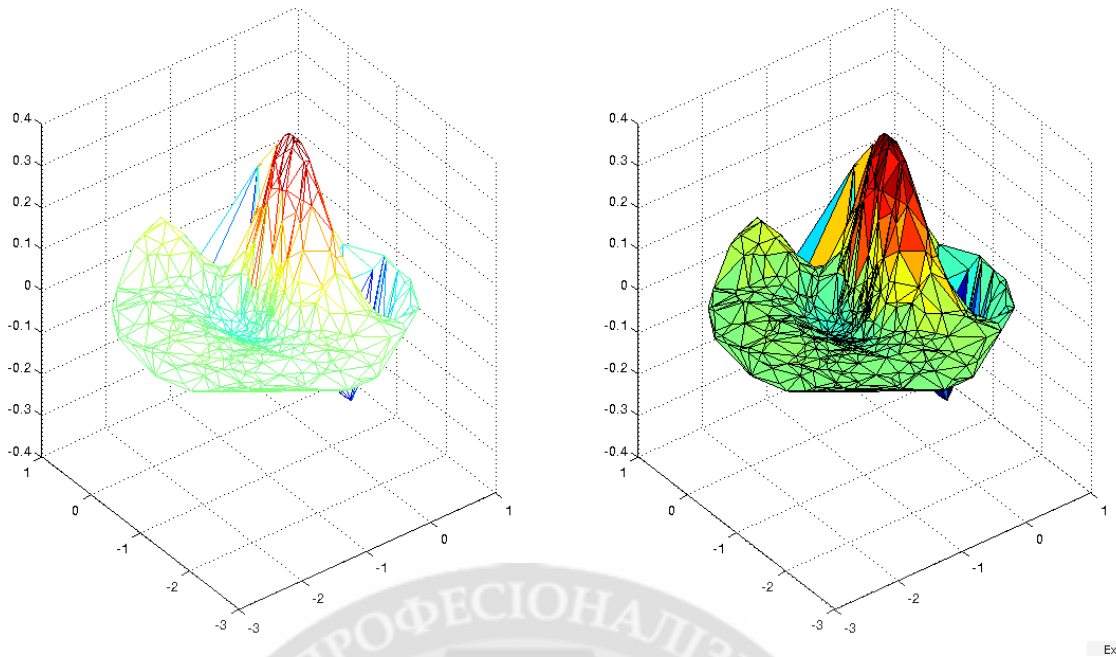


Рис. 1. Метод триангуляції Делоне

**TOA (Time of Arrival).** Даний алгоритм являє собою передачу тимчасових міток між об'єктом і давачем. Для позиціонування об'єкта необхідно мінімум 3 давача (рис. 2). Відстань від давача до об'єкта обчислюється пропорційно відмінності часової мітки, що прислали, і часу прийому сигналу давача. Мінусом цього підходу є необхідність точної синхронізації часу на об'єкті і давачі.



Рис. 2. Алгоритм позиціонування TOA 22

На основі цього алгоритму побудований також алгоритм обчислення положення за найближчим сусідом. Даний метод вимагає більше давачів, але менш потужних.

**Алгоритм RTT (Round Trip Time або Return Time of Arrival)** є модифікацією TOA, який підвищує точність результатів, але вимагає від давачів також уміння посилати сигнал на

об'єкт і навпаки, об'єкт приймати сигнал. Розраховує відстань до об'єкта на основі часу проходження сигналу до об'єкта і назад. Метод RTT не вимагає синхронізації часу на об'єкті і давачах.

**TDOA** (Time Difference of Arrival) - положення обчислюється на основі відмінності декількох TOA. Кожен TDOA давач видає гіперболоїд в просторі, на якому може знаходитись об'єкт (рис. 3). Двох TDOA давачів достатньо для визначення положення об'єкта. Даний алгоритм дає більш точні результати в обчисленнях.

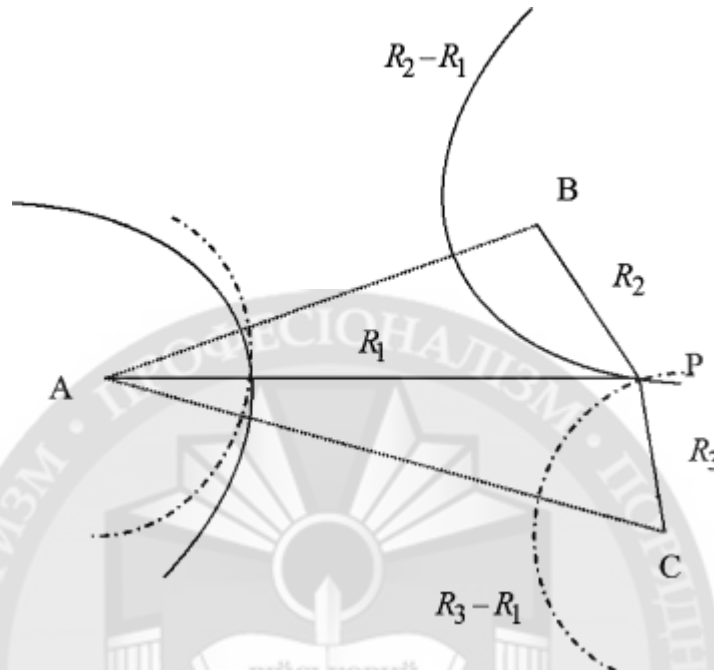


Рис. 3. Алгоритм позиціонування TDOA

Мінусами даного методу є висока вартість давачів TDOA і витрати на додаткові антени та обладнання.

Наступний метод - **мультилатерації** - розглянемо на прикладі однієї з його різновидів, елементарної мультилатерації (atomic multilateration). Суть даного алгоритму полягає в мінімізації похибок вимірювань відстаней з опорними вузлами. Нехай в  $R^2$  A - вузол, координати якого слід визначити. Позначимо координати вузла A через  $(x_0, y_0)$ .  $B_i$  - опорні вузли з координатами  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1..m$ . нехай  $\delta_{i0}$  - виміряна відстань між вузлами A і  $B_i$ . Кожному опорному вузлу можна зіставити функцію помилки виміряної відстані. Таким чином, маємо  $m$  рівнянь виду:

$$f_i(x_0, y_0) = \delta_{i0} - \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, i = 1..m. \quad (1)$$

Координати невідомого вузла A можна визначити, мінімізуючи методом найменших квадратів або іншими градієнтними методами наступний функціонал:

$$F(x_0, y_0) = \sum_i f_i^2(x_0, y_0) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Алгоритм елементарної мультилатерації дозволяє знайти положення вузла за умови його досяжності до трьох опорних вузлів (в  $R^2$ ). Однак, БСМ зазвичай розгортаються з досить обмеженою кількістю опорних вузлів і дана умова далеко не завжди виконується. Для подолання цієї проблеми використовуються різні удосконалення алгоритму (ітеративна мультилатерація, спільна мультилатерація).

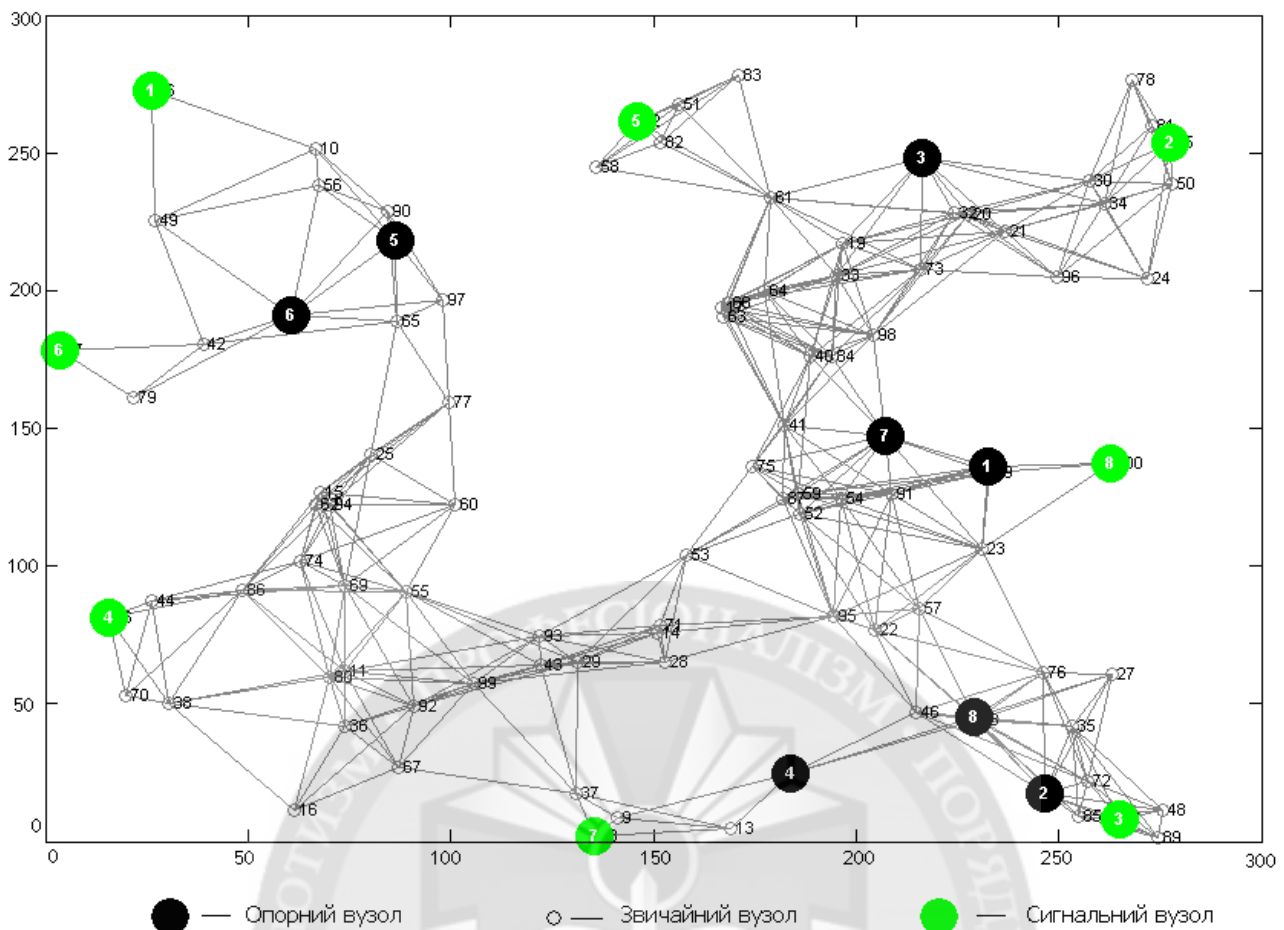


Рис. 4. Метод позиціонування на основі віртуальних координат: приклад топології мережі

**Метод позиціонування на основі віртуальних координат** характеризується тим, що на першому етапі алгоритму всім мобільним об'єктам мережі присвоюються так звані віртуальні координати щодо деякої кількості сигнальних вузлів. Далі багатовимірна система віртуальних координат перетворюється в двовимірну систему, яка відображає відносне розташування об'єктів на площині (топологію мережі), але не прив'язана до якоїсь глобальної системи позиціонування, тому є повністю автономною. Якщо потім для частини об'єктів мережі (опорні об'єкти) будуть задані географічні координати з абсолютною прив'язкою до місцевості, то на основі цієї інформації обчислюються абсолютні координати і для всіх інших об'єктів групи.

На рисунку 4 показаний приклад мережі, в якому позначені звичайні (з невідомими координатами), опорні (з відомими координатами) і сигнальні (координати невідомі, але використовуються для обчислення віртуальних координат) вузли.

При розгортанні БСМ за допомогою спеціального алгоритму автоматично вибирається деяке задане число  $n_v$  сигнальних вузлів, які повинні бути розподілені по топології мережі рівномірно або по периметру. Після того, як сигнальні вузли обрані, всі вузли мережі обчислюють свої віртуальні координати щодо них. На останньому етапі за допомогою опорних вузлів мережі здійснюється переведення віртуальних координат в абсолютні.

**Висновки.** При виборі найбільш перспективного методу локалізації, цікавого для подальшого вивчення, враховувався ряд критеріїв. По-перше, було визначено метод визначення відстані між вузлами, який необхідний для більшості алгоритмів власне локалізації. Методи, засновані на визначенні відстаней між вузлами по затримці поширення радіосигналу, стають все більш актуальними, оскільки стали доступними малопотужні інтегральні приймачі з апаратною функцією високоточного виміру тимчасових інтервалів



(наприклад, nanoLOC TRX від Nanotron і JN5148 від Jennic). По-друге, був зроблений акцент на універсальність визначення координат. Метод повинен в першу чергу обчислювати відносні координати вузлів (складати топологію мережі), а потім, у разі необхідності, зіставляти топологію з абсолютними координатами. По-третє, алгоритм повинен задовольняти умовам надійності (працювати в разі виходу з ладу будь-яких вузлів мережі), тобто бути розподіленим. По-четверте, алгоритму слід бути максимально незалежним від інфраструктури і відноситись до групи методів активної кооперативно-цільової локалізації (виявлення вузлами сигналів тільки один від одного і розподілене формування топології на основі отриманих даних).

Найбільш повно позначеним вимогам відповідає поєднання алгоритму позиціонування на основі віртуальних координат з методом визначення відстані між вузлами по затримці поширення радіосигналу. Одним з головних недоліків методу є його відносна обчислювальна складність, що є суттєвою перешкодою для його реалізації в зазвичай малопродуктивних сенсорних мережах. Подальша робота може бути спрямована на оптимізацію обчислювальних алгоритмів даного методу.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Priyantha N., Miu A., Balakrishnan H., Teller S. The cricket compass for contextaware mobile applications. In Proceedings of the 7th Annual ACM / IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). Rome, Italy: 2001. P. 1-14.
2. Ray S., Lai W., Paschalidis I. Deployment optimization of sensor net-based stochastic location-detection systems. IEEE INFOCOM 2005. 2005. P. 2279-2289.
3. Lee D. Localization using Multidimensional Scaling (LMDS): Ph.D. thesis / University Of California, Berkeley. 2005.
4. Mao G., Fidan B. Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks. New York: Hershey, 2009.
5. Niculescu D., Nath B. Ad-hoc positioning system. In IEEE, Proc. of Global Telecommunications Conference (Globecom). San Antonio, TX: 2001. P. 2926-2931.

**Рецензент:** к.т.н., доц. Джулій В.М., доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Хмельницького національного університету

к.т.н. Муляр І.В., Зеленская В.С.

### ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

*В статье рассмотрены аспекты локализации, основные составные задачи локализации, классификацию алгоритмов локализации.*

*Проведен анализ методов решения проблемы локализации.*

*В результате, учитывая ряд критериев, были определены наиболее перспективный метод локализации, его преимущества, недостатки, а также направления его дальнейшего изучения.*

*Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, мониторинг, узлы сети, локализация, алгоритм, координаты, сигнал, мультилатерация, триангуляция, трилатерация, позиционирование.*

Ph.D. Mulyar I.V., Zelenska V.S.

### LOCALIZATION OF OBJECTS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

*This paper considers aspects of localization, the main components of the task localization, classification algorithms for localization.*

*The analysis methods of solving the problem of localization.*

*As a result, taking into account a number frames of reference have been identified the most promising method of localization, its strengths, weaknesses and areas of further study.*

*Keywords: wireless sensor network, monitoring, network nodes localization algorithm, location, signal, multilateration, triangulation, trilateration positioning.*