

УДК 531.7.08

Дуднік Андрій Сергійович

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри мережі та інтернет технологій

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Дудник Андрей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры сетевых и интернет технологий

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

Andrey Dudnik

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor of the Department of Network and Internet Technologies

Taras Shevchenko National University of Kyiv

**МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ В
СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ЦИФРОВОГО
ЧАСТОТОМІРА СЕРЕДНІХ ЗНАЧЕНЬ**

**МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ОБЪЕКТАМИ В
СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО
ЧАСТОТОМЕРА СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ**

**METHODS OF MEASURING DISTANCES BETWEEN OBJECTS IN
SENSOR NETWORKS USING DIGITAL FREQUENCY MEAN VALUES**

Анотація. Актуальність теми дослідження. На даний момент безпроводні сенсорні мережі є важливим інструментом для дослідження фізичного світу. Їх важливість пов'язана з новими можливостями використання, завдяки таким характеристикам, як відсутність необхідності в кабельній інфраструктурі, мініатюрних вузлах, низькому енергоспоживанні, вбудованому радіо інтерфейсі, досить високій

потужності передачі, відносно низькій вартості. Тому існує проблема створення нових засобів, що покращили б ефективність їх використання, що б дало змогу розширити сфери застосування.

Постановка проблеми. У процесі розроблення таких систем розробникам доводиться вирішувати суперечність між зниження точності вимірювання відстані, зі зростанням дальності розташування об'єктів, обмеженою потужністю передавачів і дорогою вартістю спеціальних вузлів, що отримують точні координати з супутника. Наявність цих обмежень підвищує імовірність похибок при локалізації об'єктів у безпроводних сенсорних мережах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, включаючи існуючі алгоритми вимірювання відстані та задачі енергоефективності передавачів.

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми. Підвищення точності вимірювання відстані засобів, що використовують існуючі алгоритми вимірювання відстані.

Постановка завдання. Удосконалення методу вимірювання відстані пристроями безпроводних сенсорних мереж, шляхом застосування цифрових вимірювачів частоти.

Виклад основного матеріалу. Локалізація об'єктів відбувається за допомогою методу TDOA (Time Difference of Arrival). Дані, що були одержані після використання цього методу, надсилаються до цифрового частотоміра, який визначає період між фазами сигналу, що є пропорційною величиною до відстані між об'єктами.

Висновки відповідно до статті. Запропонований метод дозволяє покращити точність процесу локалізації об'єктів у безпроводних сенсорних мережах.

Ключові слова: *бездротова сенсорна мережа, локалізація, відстань, мікропроцесорний фазометр, похибка.*

Аннотация. Актуальность темы исследования. На данный момент беспроводные сенсорные сети являются важным инструментом для исследования физического мира. Их важность связана с новыми возможностями использования, благодаря таким характеристикам, как отсутствие необходимости в кабельной инфраструктуре, миниатюрных узлах, низком энергопотреблении, встроенному радио интерфейсу, достаточно высокой мощности передачи, относительно низкой стоимости. Поэтому существует проблема создания новых средств, которые улучшили бы эффективность их использования, что дало бы возможность расширить сферы их применения.

Постановка проблемы. В процессе разработки таких систем разработчикам приходится решать противоречие между снижением точности измерения расстояния, с ростом дальности расположения объектов, ограниченной мощностью передатчиков и дорогой стоимостью специальных узлов, которые получают точные координаты со спутника. Наличие этих ограничений повышает вероятность ошибок при локализации объектов в беспроводных сенсорных сетях.

Анализ последних исследований и публикаций. Были рассмотрены последние публикации в открытом доступе, включая существующие алгоритмы измерения расстояния и задачи энергоэффективности передатчиков.

Выделение неисследованных ранее частей общей проблемы. Повышение точности измерения расстояния средств, использующих существующие алгоритмы измерения расстояния.

Постановка задачи. Совершенствование метода измерения расстояния устройствами беспроводных сенсорных сетей, путем применения микропроцессорных частотомеров.

Изложение основного материала Локализация объектов происходит с помощью метода TDOA (Time Difference of Arrival). Данные, полученные

после использования этого метода, направляются в микропроцессорный частотомер, который определяет период между фазами сигнала, пропорциональный величине к расстоянию между объектами.

Выводы в соответствии со статьей Предложенный метод позволяет улучшить точность процесса локализации объектов в беспроводных сенсорных сетях.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, локализация, расстояние, микропроцессорный фазометр, погрешность.

Summary. *Relevance of the research topic. At the moment, wireless sensor networks are an important tool for exploring the physical world. Their importance is related to new uses, thanks to such characteristics as the lack of the need for cable infrastructure, miniature nodes, low power consumption, built-in radio interface, sufficiently high transmission power, relatively low cost. Therefore, there is a problem of creating new tools that would improve the effectiveness of their use, which would give an opportunity to expand the scope of their application.*

Formulation of the problem. In the process of developing such systems, developers have to solve the contradiction between the decrease in the accuracy of the distance measurement, the increasing range of the objects, the limited power of the transmitters, and the cost of special nodes that receive the exact coordinates from the satellite. The presence of these restrictions increases the probability of errors when localizing objects in wireless sensor networks.

Analysis of recent research and publications. The latest publications were publicly available, including existing distance measurement algorithms and energy efficiency problems for transmitters.

Isolation of previously unexplored parts of a common problem. Increase the accuracy of measuring the distance of means using existing distance measurement algorithms.

Formulation of the problem. Improving the method of distance measurement by devices of wireless sensor networks, by using microprocessor frequency meters.

Statement of the main material Localization of objects occurs using the TDOA (Time Difference of Arrival) method. The data obtained after using this method is sent to the microprocessor frequency meter, which determines the period between the phases of the signal, proportional to the value to the distance between objects.

Conclusions in accordance with the article The proposed method makes it possible to improve the accuracy of the process of localizing objects in wireless sensor networks.

Key words: wireless sensor network, localization, distance, microprocessor phase meter, error.

Актуальність теми дослідження. На даний момент безпроводні сенсорні мережі є важливим інструментом для дослідження фізичного світу. Їх важливість пов'язана з новими можливостями використання, завдяки таким характеристикам, як відсутність необхідності в кабельній інфраструктурі, мініатюрних вузлах, низькому енергоспоживанні, вбудованому радіо інтерфейсі, досить високій потужності передачі, відносно низькій вартості. Тому існує проблема створення нових засобів, що покращили б ефективність їх використання, що б дало змогу розширити сфери застосування.

Постановка проблеми. Проблема локалізації була досліджена в минулому, оскільки в багатьох програмах важливою є інформація про розташування об'єктів або людей, і для їх вирішення розроблено велику кількість систем. Найбільш відомим з них є система глобального позиціонування (*GPS*).

Проте підхід *GPS* не може застосовуватися до безпроводних сенсорних мереж, у зв'язку з його вимогами, щодо наявності великої кількості додаткової інфраструктури (наприклад, супутників).

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 (зокрема відстані між об'єктами), присвячено роботи сучасних вчених, серед яких:

- роботи [1–3], які присвячені вимірюванню відстані засобами вимірювальної техніки;
- роботи [4–8], які присвячені вимірюванню відстані засобами безпроводних сенсорних мереж;
- роботи [9–13], які, крім вимірювання відстані, також присвячені аналізу характеристик самих сенсорних мереж.

У роботі [1], пропонується використовувати Інтернет для управління вимірювальною головкою, але в аналізі та корегуванні результатів вимірювання, Інтернет участі не бере. Зміст роботи [2] присвячений розробці аналогових інтерфейсів інформаційних вимірювальних систем, але в ній не розглядаються засоби збільшення їх продуктивності. В роботі [3], йдеться про корекцію похибок вимірювання через інформаційно-вимірювальну систему, але пропонується використовувати кабельний зв'язок. В роботі [4] проводиться загальний огляд існуючих технологій сенсорних мереж та лише аналізуються їх недоліки. В роботах [5, 6] розглядаються алгоритми локалізації, що можуть покращити процес вимірювання відстані між об'єктами. В роботах [7, 8] розглядаються існуючі проблеми об'єднання сенсорних мереж та шляхи їх вирішення. В роботах [9–13] йдеться про методи локалізації, що застосовують супутникові навігаційні системи, зокрема в роботі [13] також йдеться про енергозберігаючі технології для сенсорних мереж.

В даній роботі пропонується розглянути рекомендації щодо покращення технічних характеристик безпроводних сенсорних мереж, шляхом додаткового застосування в пристроях мережі цифрових частотомірів. З метою покращення точності вимірювання.

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми. Підвищення точності вимірювання відстані засобів, що використовують існуючі алгоритми локалізації, шляхом уведення додаткових засобів вимірювальної техніки.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз принципу роботи цифрового частотоміра, побудова його математичної моделі та розробка структурної схеми.

Метод *Time Difference of Arrival*. Метод *TDoA* 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 підходящому для БСМ, 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 ($\approx 340 \text{ м/c}$). На рис. 1 наведений приклад методу *TDoA* який використовується для обчислення координат БСМ, де ультразвуковий імпульс передається одночасно з радіосигналом.

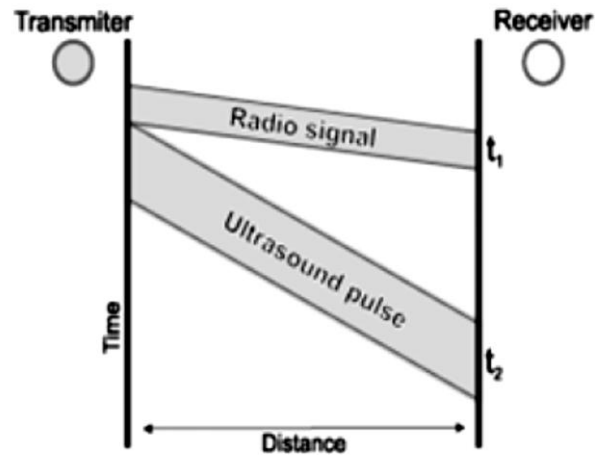


Рис. 1. Визначення відстаней за допомогою методу TDOA (Time Difference of Arrival)

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, і t_1 і t_2 – час прибуття радіо та ультразвукових сигналів, відповідно.

Оцінка похибки на відстані, отримані TDOA, вимірюються в сантиметрах. Експерименти з ультразвуком, показують похибки приблизно два або три сантиметри, що є меншим самого вузла. Незважаючи на більш низькі похибки, у цих методах є певні недоліки. Перший – потреба у додаткових апаратних засобах, щоб надсилати другий сигнал, який збільшує вартість вузла. Другий – діапазон другого сигналу, який зазвичай менший ніж 3 м. і 10 м. з більш потужними передавачами.

Цифровий частотомір. Частота f періодичного сигналу (між t_1 і t_2) – це фізична величина, значення якої визначають кількістю коливань в одиницю часу. Принцип дії цифрового частотоміра середніх значень засновано на підрахунку кількості імпульсів невідомої частоти f_x за зразковий часовий інтервал t_o , який формується зразковою мірою часу. Структурну схему цифрового частотоміра середніх значень наведено на рис.2, а часові діаграми його роботи – на рис. 3.

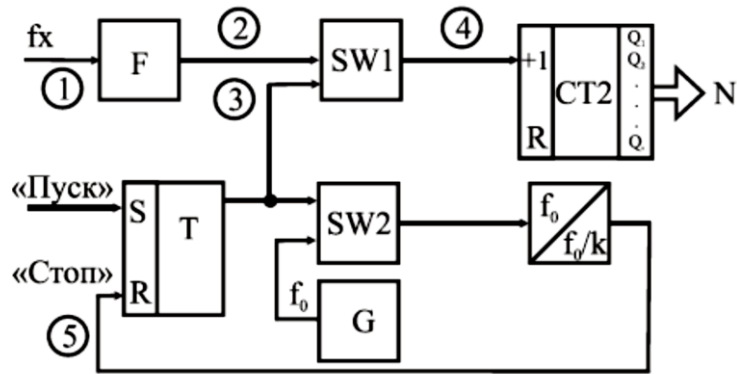


Рис. 2. Цифровий частотомір: Т - RS - тригер, SW2 - схема збігу, G – генератор зразкової частоти, ПЧ - подільник частоти, що формує зразковий часовий інтервал t_0

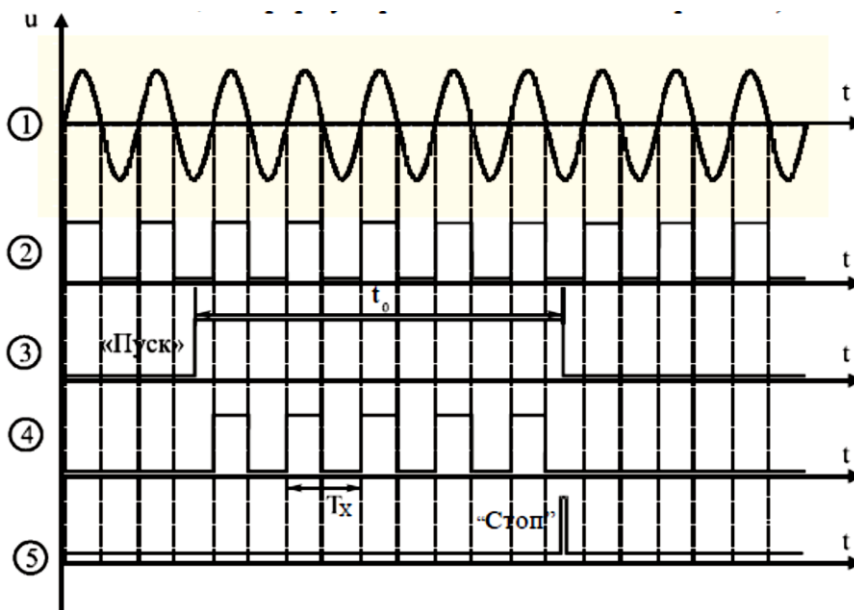


Рис. 3. Часова діаграма роботи цифрового частотоміра

А також вона містить двійковий лічильник $CT2$, який підраховує кількість імпульсів невідомої частоти f_x за зразковий інтервал часу t_0 , схема збігу $SW1$, де здійснюється квантування зразкового часового інтервалу імпульсами невідомої частоти, формувач імпульсів F , який із вхідних синусоїдних сигналів формує прямокутні імпульси, калібровані за амплітудою і тривалістю.

За командою "Пуск" тригер T приймає стан логічної одиниці і таким чином відкриває схеми збігу $SW1$ і $SW2$. Імпульси, які проходять із частотою f_x через формувач F і відкриту схему $SW1$, надходять на вхід

двійкового лічильника $CT2$, який здійснює їх підрахунок. В цей самий момент часу через відкриту схему $SW2$ імпульси f_0 із виходу генератора G зразкової частоти надходять на вхід подільника частоти, коефіцієнт ділення якого розраховують з урахуванням забезпечення потрібного часового інтервалу t_0 . Після закінчення зразкового часового інтервалу заднім фронтом імпульсу t_0 тригер T встановлюється у стан логічного нуля, схеми збігу $SW1$ і $SW2$ закриваються і в лічильнику $CT2$ фіксується код N . Кількість імпульсів невідомої частоти, які підраховує двійковий лічильник за час t_0 , визначається так:

$$N_i = \int_{t_1}^{t_2} T_x dt = \frac{t_0}{T_x} = t_0 f_x$$

де t_1, t_2 – моменти часу початку та закінчення зразкового часового інтервалу.

Зразковий часовий інтервал формується в подільнику частоти і визначається як

$$t_0 = kT_0,$$

де k - коефіцієнт ділення подільника частоти; T_0 - період імпульсів зразкової частоти f_0 .

Тоді остаточне рівняння перетворення цифрового частотоміра середніх значень матиме вигляд:

$$N_F = k T_0 f_x = \frac{k f_x}{f_0}.$$

Подане співвідношення є рівнянням перетворювання частотоміра, оскільки воно характеризує, яким чином пов'язані між собою вихідна NF і вхідна f_x величини. Статична характеристика цифрового частотоміра середніх значень лінійна (рис. 4).

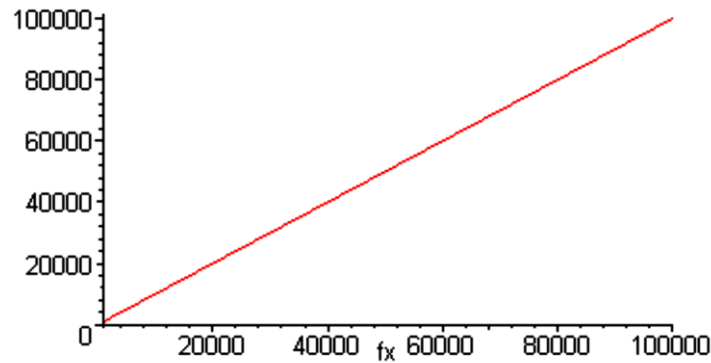


Рис. 4. Статична характеристика цифрового частотоміра середніх значень

У цифровому вимірювальному приладі за умови постійної абсолютної похибки в діапазоні зміни вимірюваної величини межа допуску основної похибки нормується у вигляді максимальної зведеної похибки

$$\delta = \frac{\Delta}{X_H} 100\% = \frac{1}{N} 100\%.$$

З урахуванням цього, рівняння похибки квантування цифрового частотоміра середніх значень подаємо у вигляді

$$\delta_{kF} = \frac{1}{N_F} 100\% = \frac{f_0}{k f_x} 100\%.$$

Аналіз наведеного рівняння показує, що похибка квантування суттєво залежить від вимірюваної величини (рис.5). Під час вимірювання низьких частот похибка велика, і тому область застосування таких частотомірів – вимірювання середніх частот (>1000 Гц). Крім того, похибка квантування залежить також від величини зразкового часового інтервалу, який визначається коефіцієнтом k подільника частоти. Похибка квантування зменшується при збільшенні зразкового часового інтервалу t_0 . Однак, збільшення t_0 приводить до зростання часу вимірювання, а, отже, до зниження швидкодії. Оскільки δ_k зменшується при збільшенні f_x , то такі частотоміри ефективні в області середніх і високих частот (від одиниць кілогерц до десятків мегагерц).

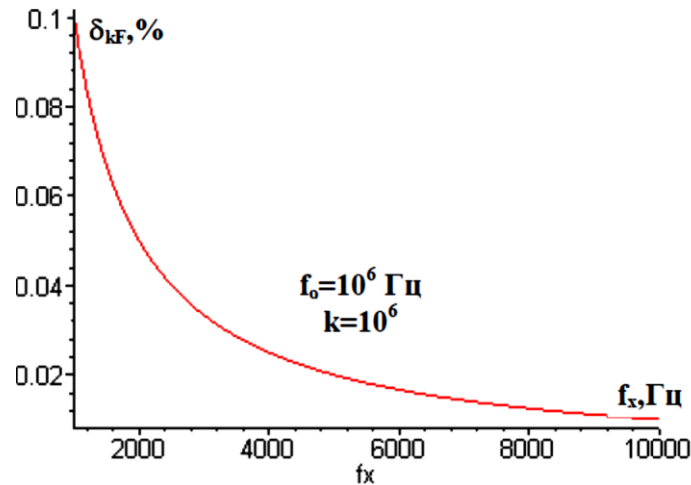


Рис. 5. Залежність похибки квантування від частоти

Визначимо нижню межу вимірювання $f_{x \min}$. Для цього задамося нормованим значенням похибки квантування $\delta_k = \delta_{кн}$:

$$\delta_{кн} = \frac{100\% f_0}{k f_{x \min}} \Rightarrow f_{x \min} = \frac{f_0}{k \delta_{кн}} 100\%.$$

Знайдемо верхню межу вимірювання частотоміра середніх значень. Ця характеристика обмежена ємністю двійкового лічильника:

$$N_{max} = 2n$$

де n розрядність двійкового лічильника.

Підставимо N_{max} в рівняння перетворення частотоміра і отримаємо рівняння для визначення верхньої межі вимірювання

$$f_{x \max} = \frac{2^n f_0}{k}.$$

Цифрові частотоміри цього типу вимірюють за час t_0 середнє значення частоти f_x . Тому їх називають частотомірами середніх значень.

В області низьких і інфранизьких частот більш ефективні частотоміри, які базуються на квантуванні вимірюваного періоду.

Висновки відповідно до статті. Запропоновано рекомендації щодо покращення технічних характеристик безпроводних сенсорних мереж, шляхом додаткового застосування в пристроях мережі цифрових частотомірів.

Проаналізовано принцип роботи цифрового частотоміра, та виявлено, що різницю часу між ультразвуковим та радіосигналом, яка використовується для визначення відстані між об'єктами, можна визначити, за різницею періодів цих сигналів.

Побудовано математичну модель роботи цифрового частотоміра.

Розроблено структурну схему цифрового частотоміра, з урахуванням математичної моделі.

References

1. Kvasnikov V. P., Khaein T. M. Kontsepsiya povirky koordynatno-vymiriuvalnykh mashyn cherez Internet / Metrolohiya ta prylady. 2013. - No. 6. - P. 48–53.
2. Sposoby pobudovy analogovykh interfeisiv informatsiynovymiriuvalnykh system mekhanichnykh velychyn / Kvasnikov V. P. et al. / Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. - 2013. - No. 1. - P. 164–169.
3. Ornatskyi D. P., Mykhalko M. V., Osmolovskyi O. I. Analog interface for remote measurements by differential-transformer inductive sensors / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2014. - Vol. 1. - No. 2 (67). - P. 52–57. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.21078>
4. Akyildiz I. F. Wireless sensor networks: A survey. Computer Networks / IEEE Communications Magazine. - 2008. - P. 250.
5. Towards an Integrated Solution for Node Localization and Data Routing in Sensor Networks / Boukerche A. et al. // 2007 IEEE Symposium on Computers and Communications. 2007. doi: <http://doi.org/10.1109/iscc.2007.4381550>
6. A Novel Location-Free Greedy Forward Algorithm for Wireless Sensor Networks / Boukerche A. et al. // 2008 IEEE International Conference on Communications. 2008. doi: <http://doi.org/10.1109/icc.2008.402>

7. Brooks R. R., Iyengar S. S. Multi-Sensor Fusion: Fundamentals and Applications. Prentice Hall, Englewood Cliffs. NJ. - 2009. - P. 120.
8. Hofmann-Wellenho B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice. 14th ed. Springer-Verlag, 2013.
9. Intanagonwiwat C., Govindan R., Estrin D. Directed diffusion / Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking – MobiCom '00. 2000. doi: <http://doi.org/10.1145/345910.345920>
10. Niculescu D., Nath B. Ad hoc positioning system (APS) using AOA / IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No.03CH37428). 2003. doi: <http://doi.org/10.1109/infcom.2003.1209196>
11. The cricket compass for context-aware mobile applications / Priyantha N. B. et al. / Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking –MobiCom '01. 2001. doi: <http://doi.org/10.1145/381677.381679>
12. Savvides A., Han C.-C., Strivastava M. B. Dynamic finegrained localization in Ad-Hoc networks of sensors / Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile Computing and networking – MobiCom '01. 2001. doi: <http://doi.org/10.1145/381677.381693>
13. Yu Y., Govindan R., Estrin D. Geographical and Energy Aware Routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/11ca/e1f847d741052bffba9af8d9fbd39973fd94.pdf?_ga=2.235051969.1371947614.1530007013-1007961932.1515747226