

9. Дмитриева Е. А., Браткевич В. В., Телюра Н. А. Модель соответствия законодательной базы Украины и Директив ЕС в области биоразнообразия // Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектури. 2016. № 132. С. 80–87. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/kgm\\_tech\\_2016\\_132\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/kgm_tech_2016_132_15)

10. Разработка методики имплементации директив Европейского Союза в законодательную базу Украины в области биоразнообразия / Браткевич В. В. и др. // ScienceRise. 2017. Т. 3, № 1. С. 43–51. doi: <http://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.95581>

Дата надходження рукопису 12.06.2018

**Дмитрієва Олена Олексіївна**, доктор економічних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», вул. Бакуліна, 6, м. Харків, Україна, 61166  
E-mail: [dmitrieva.olena@gmail.com](mailto:dmitrieva.olena@gmail.com)

**Телюра Наталія Олександрівна**, старший викладач, кафедра інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, Україна, 61002  
E-mail: [nata.teliura@ukr.net](mailto:nata.teliura@ukr.net)

**Хоренжая Ірина Віталіївна**, кандидат технічних наук, головний консультант секретаріату комітету, Комітет Верховної Ради України з питань екологічної політики, природокористування та ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи, вул. Грушевського, 5, м. Київ, Україна, 01008  
E-mail: [khorenzhaja@v.rada.gov.ua](mailto:khorenzhaja@v.rada.gov.ua)

УДК 531.7.08

DOI: 10.15587/2313-8416.2018.140057

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН

©А. С. Дуднік

*В даній статті досліджено похибки вимірювання механічних величин у безпроводних сенсорних мережах та мікропроцесорних частотомірах, що під'єднані до вузлів сенсорних мереж і разом являють собою інформаційну вимірювальну систему. Досліджується задача визначення похибки вимірювання відстані та часу проходження сигналу між прийомопередавачами. Розрахунок відстані здійснюється за допомогою часу поширення сигналу. Проведена оцінка похибки мікропроцесорного частотоміра, що вимірює частоту хаотичних радіоімпульсів у сенсорних вимірювальних мережах, як величини, що обернена до часу проходження сигналу*

**Ключові слова:** прийомопередавач, сенсор, радіоімпульс, час, відстань, похибка вимірювання, перешкоди, частотомір, квантування

### 1. Вступ

Зараз існують різні технологічні рішення для визначення положення об'єктів в просторі або на поверхні землі. Це пов'язано з тим, що неможливо реалізувати один універсальний спосіб, що підходить для всіх можливих випадків. Точніше кажучи, неможливо зробити пристрій, технічні характеристики якого відповідали б вимогам всіх поставлених задач. Тому, в даних умовах, задача визначення похибок вимірювання механічних величин, зокрема відстані і часу надходження сигналу, носить актуальний характер.

### 2. Літературний огляд

Існують технології позиціонування, такі як GPS, про які йдеться у роботі [1], Galileo, якому присвячена робота Федерації американських науковців [2], Глонасс, про яку йдеться у спільній роботі іспанських вчених про моніторинг навколишнього середо-

вища [3], застосовують Wi-Fi [4] або ультракороткі імпульси, про що йдеться у відповідному стандарті Інститут інженерів електротехніки та електроніки, або технології позиціонування стільникових телефонів GSM, якому присвячена робота [5] і т. д. У всіх цих технологій існують свої плюси і мінуси. Galileo, ГЛОНАСС, GPS наприклад, дозволяють орієнтуватися на поверхні землі, маючи при собі компактний пристрій з набором карт місцевості. Це дуже корисні технології для переміщення на відкритій місцевості. Точність положення таких пристроїв зараз досягає одиниць метрів. Однак вона може погіршитися в великих містах, в умовах складного рельєфу місцевості, або просто в закритому приміщенні, яким присвячена робота [6]. В останньому випадку застосування супутникового позиціонування неприйнятно. Єдиним виходом з цієї ситуації є розробка більш точних методів

аналізу похибки вимірювань, з метою врахування її при розрахунках показників.

**3. Мета та задачі дослідження**

Мета дослідження – побудова математичної моделі визначення часу прийняття сигналу, з метою визначення відстані між сенсорними прийомопередачами хаотичних радіоімпульсів.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

1. Визначити похибку вимірювання часу, з метою визначення відстані між об'єктами сенсорних мереж, з врахуванням перешкод;

2. Оцінити похибки вимірювання частоти, як величини оберненої до часу, за допомогою мікропроцесорного частотоміра.

**4. Оцінка похибки вимірювання часу, з метою визначення відстані між об'єктами сенсорних мереж, з врахуванням перешкод**

Оцінимо похибку у визначенні моменту часу приходу переднього фронту імпульсу, викликану тепловим шумом, а також ефектом неоднорідності розподілу енергії в часі протягом усього імпульсу. Скористаємося прикладом з [Ошибка! Источник ссылки не найден.] (рис. 1).

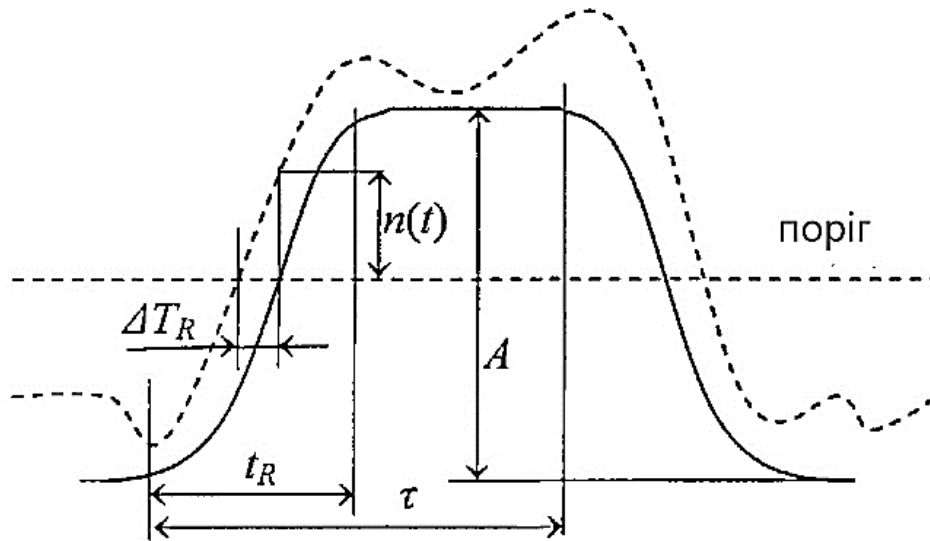


Рис. 1. Визначення часу приходу імпульсу по передньому фронту

В даному випадку, так як використовується огинаюча радіоімпульсу на виході приймача, то не має значення, який несучий сигнал мав радіоімпульс, а важлива тільки рівномірність розподілу енергії в часі, відповідно тривалості всього імпульсу [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. На малюнку суцільною лінією зображена огинаюча незашумленого імпульсу, пунктирною – імпульсу з шумом. Горизонтальною пунктирною лінією вказано поріг компаратора.

Нехай  $n(t)$  - зміщення імпульсу через шум за амплітудою,  $A$  - амплітуда прийнятого незашумленого імпульсу,  $\Delta T_R$  – похибка вимірювання часу приходу імпульсу,  $t_R$  – тривалість переднього фронту імпульсу,  $\tau$  – тривалість імпульсу при передачі. Тоді швидкість росту переднього фронту імпульсів [Ошибка! Источник ссылки не найден.] в незашумленому  $S_1$  і зашумленому  $S_2$  випадках буде відповідно [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

$$S_1 = \frac{A}{t_R}; \tag{1}$$

$$S_2 = \frac{n(t)}{\Delta T_R}. \tag{2}$$

При великих амплітудах імпульсів ці швидкості росту повинні бути рівні. Тобто  $S_1=S_2$ . Тоді з (1) і (2)

$$\Delta T_R = \frac{n(t)}{A/t_R}$$

або

$$\sqrt{(\Delta T_R)^2} = \delta T_R = \frac{t_R}{\sqrt{\frac{A^2}{n^2}}} = \frac{t_R}{\sqrt{\frac{2P}{N}}},$$

де  $\frac{A^2}{n^2}$  відношення сигнал/шум для протектованого відеоімпульсу. Тут  $P$  – потужність сигналу,  $N$  – потужність шуму в смузі фільтру низьких частот (ФНЧ). Якщо  $B$  – смуга ФНЧ то

$$t_R = \frac{1}{B}$$

Нехай

$$S = \frac{E}{\tau},$$

$$N=N_0B,$$

де  $E$  – енергія імпульсу, що приймається,  $N_0$  – спектральна густина потужності шуму.

Тоді

$$\delta T_R = \frac{\tau}{\sqrt{2B \frac{E}{N_0}}}$$

Через фіксовану тимчасову затримку передавач в Б випромінює одиночний імпульс або пачку імпульсів, а приймач в А їх приймає. Інтервал часу  $\Delta t$  між моментом випромінювання імпульсу передавачем в А і моментом його приходу в приймач в А, за вирахуванням затримки  $\tau$  в пристрої Б, поділений на швидкість світла  $c$ , визначає відстань  $l$  між передавачем і приймачем:

$$l = \frac{\Delta t - \tau}{2} c.$$

**Дослідження похибки мікропроцесорного частотоміра.** Далі пропонується здійснювати вимірювання частоти надходження сигналів  $f$ , як величину обернену до періоду між сигналами ( $\Delta t$ ).

При безпосередньому (прямому) вимірюванні частоти періодичного сигналу найвагомими є дві складові похибки – міри і порівняння. Похибка міри зумовлена нестабільністю частоти кварцового генератора. Ця складова похибки може бути відчутною при вимірюванні дуже високих частот. Похибка порівняння головним чином визначається похибкою квантування частоти  $\delta_k$ . При вимірюванні низьких частот похибка квантування є визначальною складовою похибки вимірювання. Наприклад, якщо вимірюється частота  $f_x=10$  Гц при  $t_0=1$  с, то максимальна похибка квантування

$$\delta_{kv} = \frac{100\%}{f_x t_0} = \frac{100\%}{10 \cdot 1} = 10\% ,$$

що неприпустимо.

Таким чином, через великі похибки квантування низькі частоти безпосередньо вимірюються цифровим частотоміром із невисокою точністю. Тому розв'язання завдання зменшення впливу похибки квантування на результати вимірювання завжди було одним із важливих напрямів розробки цифрової частотомірювальної техніки. Перед тим як розглядати мікропроцесорний частотомір, який радикально розв'язує вказане завдання, зупинимось на чотирьох способах зменшення похибки квантування при вимірюванні частоти:

1. Збільшення тривалості зразкового часового інтервалу  $t$ , тобто часу вимірювання. Але можливості такого способу обмежені, оскільки для одержання малої похибки квантування (наприклад,  $\delta_k=0,01\%$ ;  $f_x=10$  Гц) потрібний дуже великий час вимірювання:

$$t_0 = \frac{100\%}{\delta_{kv} f_x} = \frac{100\%}{0,01 \cdot 10} = 1000 \text{ с.}$$

2. Збільшення числа імпульсів, які квантують зразковий часовий інтервал  $t_0$ , що досягається множенням вимірюваної частоти  $f_x$ . Виконання даного способу поєднано із застосуванням додаткового блока помножувача частоти, що ускладнює і підвищує вартість апаратурної частини.

3. Врахування випадкової природи похибки квантування. Забезпечується проведення багаторазових вимірювань і усереднення їх результатів. Це ефективний шлях зменшення впливу випадкової похибки на результат вимірювання.

4. Безпосереднє вимірювання періоду досліджуваного сигналу з наступним обчисленням частоти  $f_x=1/T_x$ . Цей шлях дозволяє різко зменшити похибку квантування при вимірюванні низьких частот.

5. Щоб побачити ефект, який досягається, скористаємось наведеним раніше прикладом. Перейдемо до вимірювання періоду. Частота  $f_x=10$  Гц. Відповідний період  $T_x=0,1$  с. Сформуємо стробувальний імпульс тривалістю, що дорівнює періоду  $T_x$ , і проквантуємо його імпульсами, частота проходження яких  $f_0=10$  МГц (що звичайно має місце в цифрових частотомірах). У цьому разі похибка квантування

$$\delta_{kv} = \frac{100\%}{T_x f_0} = \frac{100\%}{0,1 \cdot 10^7} = 10^{-4}\%$$

Можна зробити висновок, що непряме вимірювання частоти  $f_x=1/T_x$  у даному випадку дозволило різко підвищити точність порівняно з прямим вимірюванням частоти: похибка квантування зменшилась у 100000 разів.

Однак при вимірюванні високих частот (наприклад,  $f_x=106$  Гц,  $t_0=1$  с,  $f_0=10$  Гц) похибка квантування цифрового частотоміра

$$\delta_{kv} = \frac{100\%}{t_0 f_x} = \frac{100\%}{1 \cdot 10^6} = 10^{-4}\% ,$$

а похибка квантування цифрового періодоміра надмірно зросте:

$$\delta_{kv} = \frac{100\% f_x}{f_0} = \frac{100\% \cdot 10^6}{10^7} = 10\% .$$

## 5. Результати досліджень та їх обговорення

Таким чином, при дослідженнях періодичних процесів у широкому діапазоні частот для досягнення заданої точності доцільно в діапазоні високих частот застосовувати цифровий частотомір, а в діапазоні низьких частот переходити до вимірювання періоду (рис. 2).

Таким чином, якщо, наприклад, полоса  $B=5 \times 10^7$  Гц,  $\tau=10^{-7}$  с,  $\frac{E}{N_0} = 20 \text{ dB} = 100$ , [Ошибка!

Источник ссылки не найден.] то  $\delta T_R \approx 3 \text{ нс.}$

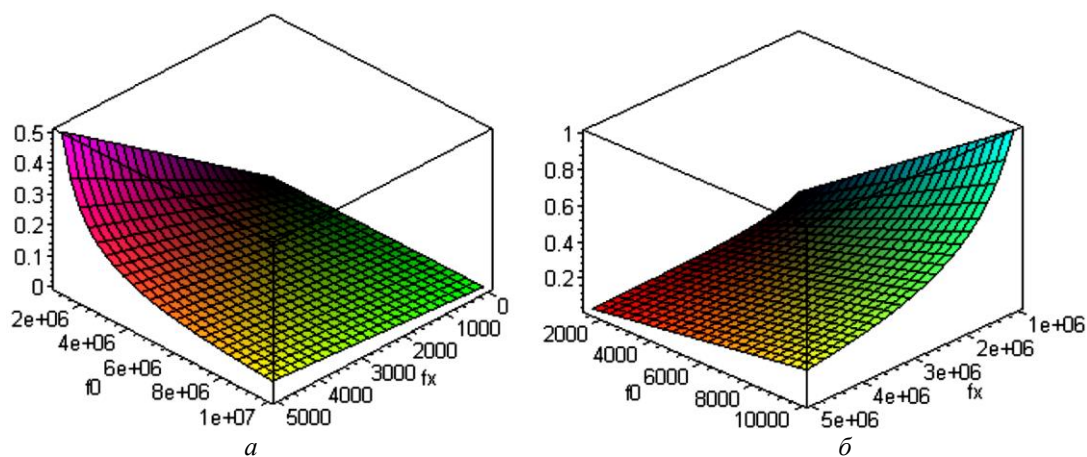


Рис. 2. Похибка квантування: *a* – вимірювача періоду; *б* – вимірювача частоти

## 6. Висновки

1. Побудовано математичну модель визначення часу прийняття сигналу. Модель складається з сенсорного вузла та мікропроцесорного частотоміра, що введений для покращення точності результатів вимірювання. Визначено похибку вимірювання часу, з метою визначення відстані між об'єктами сенсорних мереж, з врахуванням перешкод. Отримані результати показали, що вплив ефекту неоднорідності розподілу енергії в хаотичному

імпульсі за часом схожий з впливом білого гаусового шуму.

2. Проведено оцінку похибки вимірювання частоти, як величини оберненої до часу, за допомогою мікропроцесорного частотоміра. На основі отриманих результатів рекомендовано, оцінивши співвідношення «сигнал/шум», що викликане ефектом неоднорідності можна порівняти його з співвідношенням сигнал/шум, що викликане білим шумом, підставляти в розрахунки менше з цих двох відношень.

## Література

1. Sichitiu M., Ramadurai V. Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon // Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS 2014). Fort Lauderdale, 2014. P. 174–183. doi: <http://doi.org/10.1109/mahss.2004.1392104>
2. Sound Surveillance System (SOSUS). Federation of American Scientists. URL: <http://www.fas.org/irp/program/collect/sosus.htm>
3. SISVIA (Sistema de Seguimiento y Vigilancia Ambiental). Technology and environment. URL: <http://www.dimap.es/news.html>
4. IEEE Std. 802.15.4- 2015. IEEE Standard for Information Technology – telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). New York: IEEE Press. 2015. 250 p.
5. He T., Huang C., Blum B. Range-free localization schemes for large scale sensor networks // MobiCom '09: Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2016. P. 81–95.
6. Derivation of Friis Transmission Formula. The Friis Equation. URL: <http://www.antenna-theory.com/basics/friis.php>
7. Savvides A., Han C., Strivastava M. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors // 14th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. Rome, 2017. P. 166–179.
8. Hofmann-Wellenho B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice. Berlin: Springer-Verlag, 2014.
9. Elson J. Time synchronization in wireless sensor networks: PhD dissertation. University of California. Los Angeles, 2014. 203 p.
10. Whitehouse K. The design of calamari: An ad hoc localization system for sensor networks: M.S. thesis. University of California. Berkeley, 2015.
11. Priyantha N., Balakrishnan H., Teller S. The cricket compass for context aware mobile applications // 17th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. Rome, 2016. P. 325.

Дата надходження рукопису 29.05.2018

Дуднік Андрій Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра мережевих та інтернет технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 64/13, м. Київ, Україна, 01601  
E-mail: a.s.dudnik@gmail.com