

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ДЛЯ ВУЗЛІВ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджуються алгоритмічні компроміси при перетворенні сигналів з частотних сенсорів у вузлах безпроводних сенсорних мереж. Проведено аналітичне порівняння методів прямого та зворотнього рахунку частоти, а також розглянуто застосування методів лінійної регресії для зменшення впливу фазового джитеру. Запропоновано підхід до вибору параметрів вимірювання, який забезпечує оптимальний баланс між похибкою квантування, затримкою обробки та загальним енергоспоживанням мікроконтролерного вузла.

Ключові слова: безпроводна сенсорна мережа, частотний сенсор, прямий рахунок, зворотній рахунок, лінійна регресія, похибка квантування, енергоефективність.

Abstract

The study investigates algorithmic compromises in converting signals from frequency sensors in wireless sensor network nodes. An analytical comparison of direct and inverse frequency calculation methods is performed, and the application of linear regression methods to reduce the influence of phase jitter is considered. An approach to selecting measurement parameters is proposed that provides an optimal balance between quantization error, processing delay, and the overall energy consumption of the microcontroller node.

Keywords: wireless sensor network, frequency sensor, forward count, reverse count, linear regression, quantization error, energy efficiency.

Вступ

Використання частоти як інформативного параметра дозволяє створювати дешеві та енергоефективні сенсорні вузли, оскільки частотний сигнал є стійким до амплітудних спотворень і може оброблятися вбудованими таймерами мікроконтролерів без використання енергоємних АЦП. Проте в умовах безпроводних сенсорних мереж (БСМ), особливо при використанні високочутливих сенсорів на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором [1], вибір методу оцінки частоти визначає не лише точність вимірювання, але й затримку системи, шпаруватість роботи процесора та, як наслідок, загальне енергоспоживання вузла.

Метою роботи є проведення математичного та алгоритмічного порівняння методів цифрового вимірювання частоти (прямого рахунку, зворотнього рахунку та регресійної оцінки) для визначення оптимального підходу, що забезпечує мінімізацію похибки квантування та енергоспоживання у вузлах безпроводних сенсорних мереж.

Базові методи вимірювання частоти

Для фіксованого часу стробування T_{gate} , оцінка частоти методом прямого рахунку [2] становить $f_{direct} = \frac{N_x}{T_{gate}}$, де N_x — кількість імпульсів сенсора. Враховуючи невизначеність квантування ± 1 імпульс, відносна похибка становить:

$$\delta_{direct} \approx \frac{1}{f_x \cdot T_{gate}}$$

Отже, для досягнення прийнятної похибки на низьких частотах f_x , метод вимагає значного збільшення часу T_{gate} , що критично збільшує затримку вимірювання та час активної роботи мікроконтролера.

Метод зворотнього рахунку (вимірювання періоду) фіксує час проходження N_x періодів вхідного сигналу за допомогою високочастотного опорного генератора f_{ref} . Тоді вимірний час $T_{meas} = N_{ref}/f_{ref}$, а частота $f_{rec} = \frac{N_x \cdot f_{ref}}{N_{ref}}$. Відносна похибка залежить від опорної частоти:

$$\delta_{rec} \approx \frac{1}{f_{ref} \cdot T_{meas}}$$

Оскільки f_{ref} є високою та стабільною (наприклад, 10 МГц для типових MCU), похибка δ_{rec} є майже незалежною від вимірюваної частоти f_x . Як показано в таблиці 1, зворотній рахунок забезпечує стабільну роздільну здатність у всьому частотному діапазоні.

Таблиця 1 – Орієнтовна відносна похибка квантування (при $T_{gate}, T_{meas} = 1$ с, $f_{ref} = 10$ МГц)

Частота сенсора (f_x)	Прямий рахунок (δ_{direct})	Зворотній рахунок (δ_{rec})
10 Гц	10^{-1}	10^{-7}
1 кГц	10^{-3}	10^{-7}
1 МГц	10^{-6}	10^{-7}

Вплив шумів та регресійна оцінка

Реальні сигнали містять шуми, що призводять до випадкової часової похибки при перетині нульового рівня (фазовий джитер) [3]. Якщо апаратні таймери фіксують множинні часові мітки фронтів t_i , частоту можна оцінити шляхом апроксимації цих міток лінійною функцією [4]:

$$t_i \approx a \cdot i + b$$

де i — порядковий номер імпульсу, b — початкове зміщення у часі, a — оцінений період сигналу, а шукана частота $f = \frac{1}{a}$. Лінійна регресія ефективно пригнічує некорельований часовий шум, зменшуючи похибку пропорційно до $\frac{1}{\sqrt{N}}$, де N — кількість вибірок.

Зв'язок точності, затримки та енергоспоживання

Час вимірювання впливає як на похибку оцінки, так і на активність вузла. Нехай E_{meas} — енергія, витрачена на одне вікно вимірювання, а E_{tx} — енергія на передачу даних по радіоканалу. Якщо відправка відбувається після кожного вимірювання, середня потужність вузла становить:

$$P_{rec} \approx \frac{E_{meas} + E_{tx}}{T_{meas}}$$

Метод прямого рахунку змушує збільшувати T_{gate} , що штучно обмежує частоту відправки даних та порушує вимоги систем реального часу. Натомість метод зворотнього рахунку з регресією досягає цільової точності за значно коротший час T_{meas} для низьких f_x . Це дозволяє мікроконтролеру швидко виконати вимірювання, агрегувати дані та перейти в режим глибокого сну.

Висновки

Метод прямого рахунку є доцільним лише для високочастотних сигналів. Метод зворотнього рахунку забезпечує стабільно високу точність у всьому робочому діапазоні сенсорів, а застосування алгоритмів лінійної регресії нівелює вплив фазового джитера. Запропонована модель зв'язку похибки з енергією надає практичний інструментарій для вибору оптимальних параметрів обробки в умовах жорстких обмежень затримки та енергобюджету вузлів БСМ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Osadchuk A. V., Osadchuk I. O., Semenov A. O. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2021. Т. 13, № 4. С. 04001–1–04001–6. URL: [https://doi.org/10.21272/jnep.13\(4\).04001](https://doi.org/10.21272/jnep.13(4).04001) (дата звернення: 28.02.2026).
2. Sondkar S. Y., Dudhane S., Abhyankar H. K. Frequency Measurement Methods by Signal Processing Techniques. *Procedia Engineering*. 2012. Т. 38. С. 2590–2594. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.304> (дата звернення: 28.02.2026).
3. Lee W.-C. The Study on Sag Detecting Scheme around Zero Crossing Voltage for Single-Phase Inverter System. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*. 2014. Т. 28, № 1. С. 96–104. URL: <https://doi.org/10.5207/jieie.2014.28.1.096> (дата звернення: 28.02.2026).
4. Increasing Frequency Counter Precision with Linear Regression. *Electronics etc...* URL: <https://tomverbeure.github.io/2023/06/16/Frequency-Counting-with-Linear-Regression.html> (дата звернення: 28.02.2026).

Завальнюк Максим Євгенович — аспірант кафедри Інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: mezgoodle@gmail.com.

Науковий керівник: **Осадчук Олександр Володимирович** — д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: osadchuk.o.v@vntu.edu.ua

Zavalniuk Maksym Yev. — postgraduate student at the department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mezgoodle@gmail.com.

Supervisor: **Osadchuk Oleksandr Volodymyrovych** — doctor of technical sciences, professor, head of the department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.o.v@vntu.edu.ua