

DOI: 10.35681/1560-9189.2025.27.3.354599

УДК 003.85

Ю. О. Бородін, Д. Е. Олійник, О. А. Цубін,
О. В. Пригун, А. С. Лапчук, О. І. Брицький
Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Обробка квадратурних сигналів інтерферометра за допомогою мікроконтролера Arduino

Проаналізовано перспективність застосування простих, компактних і дешевих мікросхем Arduino для обробки сигналу квадратурних інтерферометрів для визначення зміщення із субнанометровою точністю. Для обробки квадратурного сигналу розроблено простий і надзвичайно ефективний метод обчислення зміщення на основі алгоритму CORDIC, який реалізовано у вигляді програми для простої і дешевої мікросхеми Arduino для обробки сигналу на прикладі горизонтального сейсмометра типу SL220. Проведено експериментальні дослідження ефективності та точності методу, а також порівняння його з іншими більш складними методами, що вимагають більш потужних обчислювальних пристроїв, зокрема методу обробки із застосуванням програмного забезпечення LabView, реалізованого на окремому АЦП. Експериментальні результати показали, що система на платі Arduino із застосуванням алгоритму CORDIC не програє точності вимірювання зміщення, має значну перевагу на вищих частотах зміщень і в габаритах перед більш складними і дорогими системами визначення нанозміщень, такими як система на основі NI USB 6212 + LabView та АЦП AD7656 + Raspberry Pi 3.

Ключові слова: субнанометрові зміщення, квадратурний лазерний інтерферометр, мікроконтролер Arduino, аналогово-цифрова обробка, алгоритм CORDIC.

Вступ

У технологічних процесах, проведенні моніторингу чи наукових експериментів часто виникає необхідність високоточного субнанометрового вимірювання зміщень і вібрацій. З розвитком технології і науки вимірювання зміщень пройшли шлях від рудиментарних механічних інструментів до сучасних високоточних вимірювальних систем, що інтегрують оптику, електроніку та інші міждисциплінарні інновації. За цей час вимоги до точності вимірювань еволюціонували від мікрометрового масштабу до нанометрового, субнанометрового та навіть пікометрового рівнів [1–3].

© Ю. О. Бородін, Д. Е. Олійник, О. А. Цубін, О. В. Пригун, А. С. Лапчук, О. І. Брицький

Зміщення можна виміряти за допомогою низки перетворювачів, що перетворюють зміну відстані на електричний сигнал. Такими датчиками є смісні датчики, лінійні змінні диференціальні трансформатори та датчики вихрових струмів [4]. Хоча ці датчики базуються на дуже різних принципах роботи, вони принципово обмежені в роздільній здатності та динамічному діапазоні зміщення. Такі методи мають обмеження на роздільну здатність, яка не перевищує одиниці мікрон (максимальна чутливість досягається при суттєвому зменшенні діапазону вимірювань) і не є надійними в робочих середовищах з розсіяними магнітними полями. Ці обмеження перешкоджають їхньому використанню в багатьох сферах застосування, наприклад, таких як високоточні верстати, виробничі ланцюги або в надточних наукових приладах.

Сучасна оптична інтерферометрія забезпечує субнанометрову точність вимірювання зміщення до 10^{-5} м [5] в широкому спектрі частот і діапазоні зміщень. Тому оптична інтерферометрія знаходить широке застосування в багатьох сферах сучасного виробництва, в наукових дослідженнях, у будівництві і в системах моніторингу та захисту критичної інфраструктури [6–8]. Широке застосування інтерферометрів у різних сферах людської діяльності робить актуальним його серійне виробництво, зменшення габаритів і здешевлення виготовлення інтерферометрів [9, 10].

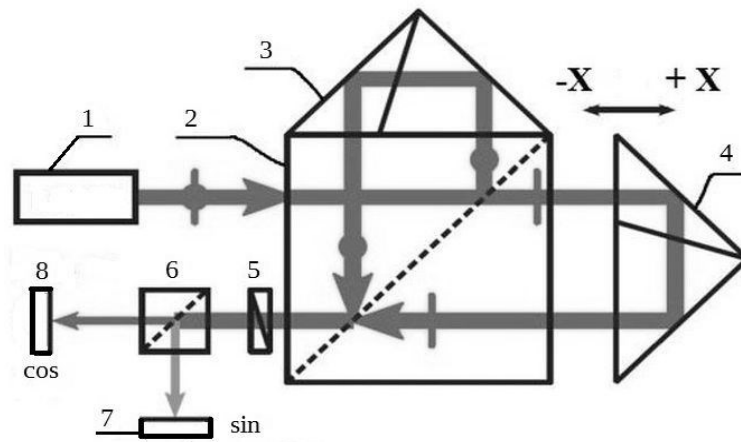


Рис. 1. Оптична схема вимірювання зміщення гомодинним квадратурним лазерним інтерферометром Майкельсона: 1 — лазер з коліматором; 2 — кубічний поляризаційний дільник променя; 3 — нерухомий кутовий відбивач для опорного сигналу; 4 — кутовий відбивач на поверхні об'єкта; 5 — фазова $\lambda/4$ пластина; 6 — кубічний поляризаційний дільник променя; 7 і 8 — фотодіоди

Одним із найбільш точних методів вимірювання зміщення, який використовується в даному дослідженні, є метод на основі квадратурного лазерного інтерферометра Майкельсона, показаного на рис. 1 [11]. Квадратурна оптична схема дає два гармонічних оптичних сигнали (зміни частини сигналів) отриманих на двох фотодіодах, зсунутих по фазі $\pi/2$, а саме $I_1 = A \cdot \sin(kx/2 + \phi_0)$, $I_2 = A \cdot \cos(kx/2 + \phi_0)$, де $k = 2\pi/\lambda$ — хвильове число, а ϕ_0 — початкова фаза, що залежить від початкових положень дзеркал. Квадратурний інтерферометр гарантує максимальну чутливість методу незалежно від величини зміщення і дає можливість однозначного визначення напрямку руху. Для обчислення зміщення необхідно зробити точну обробку

двох гармонічних сигналів квадратурного інтерферометра в реальному часі. Пряме обчислення вимагає значних ресурсів і не може бути реалізовано на простих мікросхемах. Приклад функціональної схеми обробки квадратурних сигналів інтерферометра за допомогою АЦП NI USB 6212 та програмного забезпечення LabView показано на рис 2.

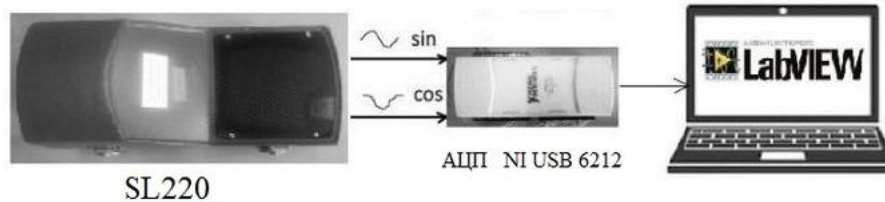


Рис. 2. Блок-схема обробки сигналів інтерферометра за допомогою АЦП та LabView

В модернізованому сейсмометрі SL220 встановлено лазерний інтерферометр з термостабілізованим лазерним діодом. Сигнали від двох фотодіодів потрапляють на блок АЦП NI USB 6212 (аналоговий цифровий перетворювач). Оцифрований сигнал з виходу АЦП потрапляє на комп'ютер, де програмне забезпечення LabView здійснює обробку сигналів \sin , \cos . Нарешті сигнал переміщення (тобто сейсмічний сигнал) у реальному режимі часу відображається на екрані монітора. Обробка двох гармонійних сигналів здійснюється за допомогою алгоритму lookup table (LUT), який детально розглянутий у [12].

З вищесказаного випливає, що обчислення зміщення звичайними методами вимагає значних обчислювальних потужностей, які можуть бути реалізовані на швидких великих мікросхемах. Отже, одним із методів здешевлення та зменшення габаритів установки точного визначення зміщень є застосування простих але ефективних методів обробки сигналу, які би дозволили застосовувати прості мікроконтролери для обчислення зміщення з оптичного сигналу інтерферометра [13, 14]. У даній роботі запропонований ефективний метод обробки оптичного сигналу інтерферометра і його реалізація на компактній простій мікросхемі Arduino, що дозволяє на порядок зменшити ціну електронних компонент інтерферометра.

Обробка сигналів інтерферометра за допомогою мікроконтролера Arduino

Існує два ефективних спрощених методи обробки квадратурних сигналів квадратурних інтерферометрів, а саме: Gray Code [15] і Coordinate Rotation Digital Computer (CORDIC) — Цифровий Комп'ютер для Обертання Координат [16]. Обробка сигналів з квадратурного інтерферометра за методом Gray Code має відносно малу точність вимірювання відстані, що не перевершує $\lambda/8$ і є не ефективним на малих частотах зміщення [15] $f < 10$ Гц. Було розроблено модифікований метод Gray Code, який дозволяє суттєво підвищити точність вимірювання [17], але його реалізація складніша і тому вимагає більш потужних мікроконтролерів. Тому в нашому дослідженні ми вибрали застосування алгоритму CORDIC як найбільш оптимального для точного визначення величини зміщення з максимальним діапазоном частот при використанні найпростіших мікросхем, з яких ми вибрали Arduino, як найбільш просту і одну з найменш коштовних.

Рис. 3 показує схему вимірювання зміщення квадратурного інтерферометра з обробкою сигналу мікроконтролером Arduino [3]. У цьому методі замість АЦП + Lab-View встановлено мікроконтролер Arduino, який виконує обробку квадратурних сигналів.

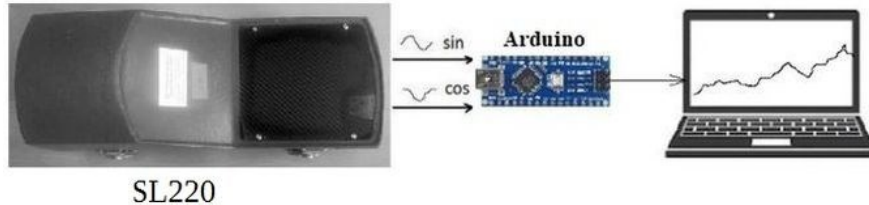


Рис. 3. Блок-схема вимірювання зміщення квадратурного інтерферометра з обробкою сигналу мікроконтролером Arduino

Arduino — це апаратна обчислювальна платформа для аматорського конструювання, основними компонентами якої є плата мікроконтролера з елементами вводу/виводу. Найбільш розповсюджені та використовувані моделі з відкритим кодом на базі мікроконтролера ATmega328, такі як Arduino Uno та Arduino Nano. Arduino Nano має розмір 44 мм на 18 мм

Квадратурні сигнали \sin та \cos з інтерферометра потрапляють на внутрішній АЦП Arduino. На основі отриманої часової послідовності сигналів \sin та \cos обчислюється зміщення об'єкта за допомогою алгоритму CORDIC. CORDIC — це простий і самий ефективний алгоритм для обчислення зміщення по \sin , \cos сигналу квадратурного інтерферометра [16], що вимагає мінімальної кількості найпростіших операцій додавання, віднімання, зсуву і мінімального об'єму електронної пам'яті.

Для визначення зсуву по сигналу інтерферометра потрібно визначити кут, що відповідає сигналу інтерферометра, а саме функцію atan2 . Пряме обчислення функції atan2 є громіздким і вимагає великого обсягу обчислень. Використання таблиць функції atan2 для точного визначення кута без прямого обчислення вимагає великого обсягу електронної пам'яті на мікросхемі, об'єм якої повинен зростати пропорційно до точності визначення кута, і до відповідного зростання об'єму обчислень. Тому для обчислення було вибрано спрощений метод CORDIC, який є найбільш простим і ефективним методом обчислення atan2 з довільною заданою точністю. Стисло ключову ідею алгоритму CORDIC показано на рис. 4. Сигнал інтерферометра в методі представляється точкою в декартовій системі координат, де по координатам x і y відкладаються відповідно значення функції $\cos(x)$ і $\sin(x)$ сигналу інтерферометра. Алгоритм CORDIC використовує систему спеціальних поворотів такої системи координат з експоненціально зменшуючими кутами, які приводять точку сигналу на вісь x для обчислення функції atan2 .

Перший поворот приводить сигнал у перший квадрант поворотом системи координат на кратний $\pi/2$ кут.

У подальшому система координат повертається на послідовність експоненційно зменшуючих кутів, кожен з яких наближає квадратурний початковий сигнал до осі x нової координатної системи. При $i + 1$ повороті ($i + 1$ ітерації) системи координат у новій системі координат координати квадратурного сигналу x_{i+1} , y_{i+1} запишуться через координати попередньої системи координат x_i , y_i як

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = \cos(\theta_i) \begin{bmatrix} 1 & \operatorname{tg}(\theta_i) \\ -\operatorname{tg}(\theta_i) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}. \quad (1)$$

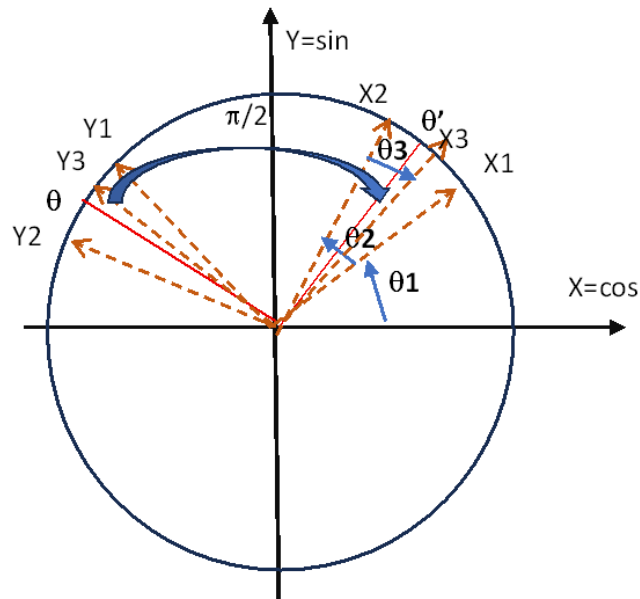


Рис. 4. Схема алгоритму CORDIC

Кути поворотів в ітераційному процесі вибираються так, щоби $\operatorname{tg}(\theta_i) = 1/2^{i-1}$. Перший тангенс відповідає куту $\pi/4$, а у кожній наступній ітерації кута повороту в такій послідовності поворотів зменшується приблизно в два рази. Алгоритм використовує суму кутів поворотів системи координат з урахуванням знаку, що приводить квадратурний сигнал на вісь X для обрахунку початкового кута квадратурного сигналу. Знак наступного повороту, і отже тангенса кута, визначається знаком координати y_i , отриманого на попередньому кроці ітерації. Він від'ємний при негативному значенні y_i і додатний при позитивному значенні y_i . Оскільки послідовність поворотів визначається тільки знаком y_i , і при поворотах системи сигнал завжди є або в першому, або в четвертому квадранті, де $\cos(\theta_i)$ завжди позитивний, то множник $\cos(\theta_i)$ не впливає на знак повороту кута системи координат, а отже і на обрахунок зміщення, і його можна опустити в рівнянні (1) при визначенні наступного повороту координатної системи. Таким чином, в алгоритмі поворотів залишаються операції додавання та віднімання, а також множення на $1/2^n$, що в двійковій системі числення зводиться до простого зміщення регістра. Кут сигналу визначається сумою кутів повороту при проведенні ітерацій з урахуванням знаку. Точність обчислення кута при глибині ітерацій N можна оцінити як $\pi/2^{N+1}$, тобто експоненційно зростає з кількістю ітерацій. Тому невелика кількість ітерацій забезпечують високу точність обрахунку кута

Схему поворотів системи координат у методі CORDIC продемонстровано на рис. 4, де показано переведення квадратурного сигналу з другого в перший квадрант $\theta \Rightarrow \theta'$, і три перші кроки ітераційного методу — повороти системи координат на кути $\theta_1 = \pi/4$, $\theta_2 = \pi/8$ і $\theta_3 = -\pi/16$. Оранжеві штрихові лінії показують нові положення осей X та Y після відповідних поворотів кожної ітерації. Синя жирна

стрілка показує зміщення з початкового квадранту (другий квадрант у випадку на рис. 4) у перший квадрант; сині тонкі стрілки показують повороти системи координат.

Кути поворотів в ітераційному процесі i задаються таблицею. Зміщення визначається через кут квадратурного сигналу θ за формулою

$$L = \theta * (\lambda / 4\pi). \quad (2)$$

На рис. 5 показано розташування чотирьох функціональних блоків алгоритму CORDIC для визначення кута квадратурного сигналу.



Рис. 5. Чотири етапи обробки квадратурного сигналу на основі алгоритму Cordic

Показані вище блоки CORDIC дозволяють перетворити квадратурі аналогові сигнали на сигнал переміщення в межах одного періоду сигналу, коли кут θ змінюється в межах від нуля до 360° . Очевидно, що повний сигнал переміщення в одному напрямку руху може бути значно більшим і складатися з декількох цілих періодів з частиною наступного періоду. Тому для повного розрахунку зміщення потрібен лічильник періодів. Загальний кут повороту сигналу в алгоритмі обчислюється як число повних періодів повороту та додаткового повороту в наступному періоді.

На рис. 6 представлено схему лінійного зміщення об'єкта з відповідним квадратурним сигналом і графіком обчисленого кута за алгоритмом CORDIC. Верхній графік показує зміщення об'єкта, яке змінює напрямок через кожні 4 повні періоди сигналу інтерферометра, нижні графіки показують квадратурні сигнали \sin , \cos , що відповідають зміщенню на верхньому графіку. Середній графік показує зміну кута квадратурного сигналу без лічильника періодів, обрахованого за алгоритмом CORDIC, в якому кут змінюється в межах від нуля до 2π . При кожному проходженні сигналу одного періоду потрібно до повного кута зміщення, отриманого за алгоритмом CORDIC, додати або відняти 2π , залежно від напрямку руху кута. Для лічильника періодів було використано алгоритм, який подібний до алгоритму, розробленого фірмою Texas Instruments [17].

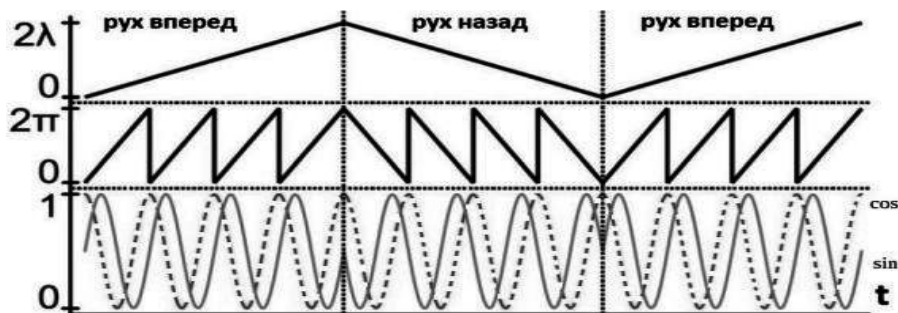


Рис. 6. Схема двонаправленого лінійного зміщення з графіком відповідних квадратурних сигналів і графіком обчисленого кута за алгоритмом CORDIC

На рис. 7 показано структурну блок-схему повної обробки квадратурних сигналів \sin , \cos та обчислення сигналу переміщення на базі мікроконтролера Arduino.

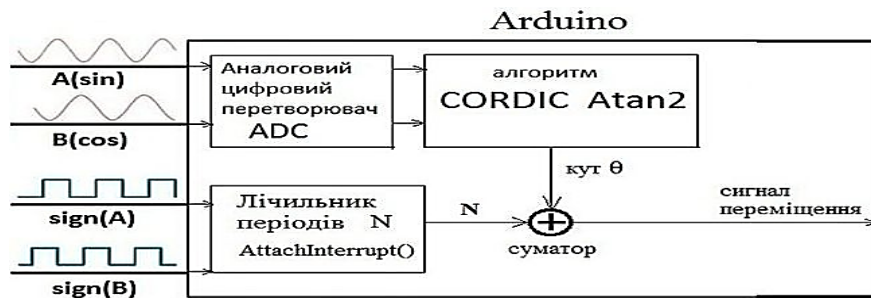


Рис. 7. Структурна блок-схема обробки квадратурних сигналів \sin , \cos на Arduino

Експериментальні результати вимірювання зміщення методом CORDIC на Arduino

За описаним вище алгоритмом обчислення зміщення методом CORDIC було написано програму розрахунку та запрограмовано мікросхему Arduino, яка використовується для експериментальних вимірювань зміщень шляхом обробки сигналу горизонтального квадратурного сейсмометра типу SL220 [12]. Як приклад роботи системи на рис. 8 показано графік зміщення на плотері, що отриманий нами в експерименті за допомогою розробленої експериментальної установки.

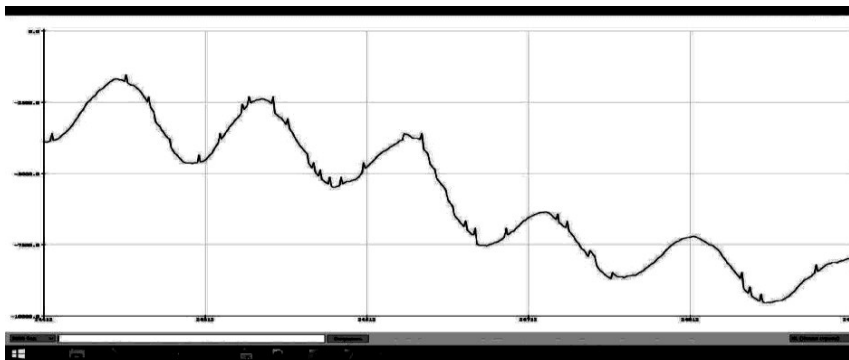
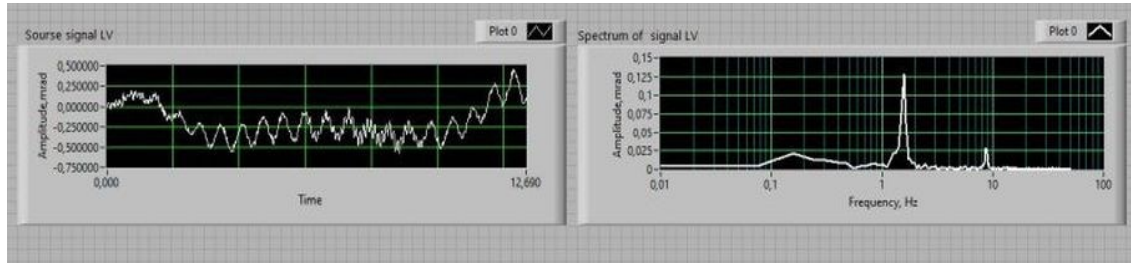


Рис. 8. Графік зміщення на плотері, що отриманий при обчисленні на мікросхемі Arduino за алгоритмом CORDIC квадратурного сигналу від горизонтального сейсмометра типу SL220

Для порівнювання ефективності розробленого алгоритму виконувалося синхронна обробка сигнал для отримання зміщення від сейсмометра SL220 за допомогою програмного комплексу LabView та Arduino із використанням алгоритму CORDIC. В експериментах проводився запис зміщення мембрани барометра. Аналіз результатів параметрів двох методів наведено в таблиці. На рис. 9 та 10 показано приклад отриманого зміщення двома методами. Порівняння графіків на рис. 9 та 10 показує, що обидва методи дають фактично ідентичні результати як при малих, так і високих частотах зміщення. Аналогічні результати було отримано кожен раз при порівнянні двох сигналів зміщення, отже методи мають аналогічні параметри в межах, де швидкості обробки

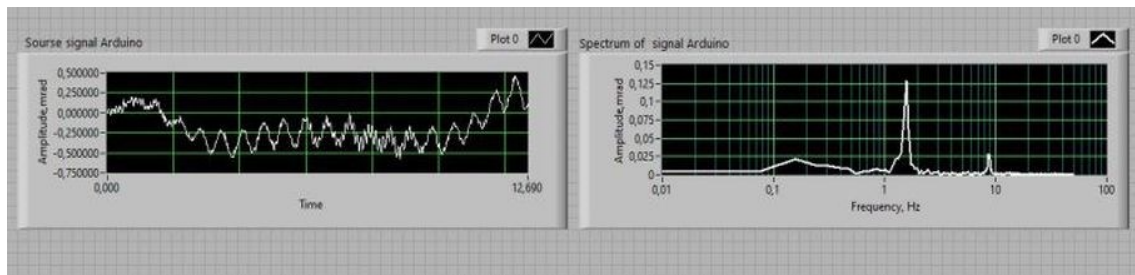
сигналів знаходяться в діапазоні частот обох методів. Проте експерименти показали, що алгоритм на базі CORDIC є набагато ефективніший і тому дозволяє обробляти сигнал на значно більших частотах зміщення.



а)

б)

Рис. 9. Запис сейсмічних сигналів у радіанах у середовищі LabView (а) та його частотна характеристика (б)



а)

б)

Рис. 10. Запис сейсмічних сигналів у радіанах у середовищі Arduino CORDIC (а) та його частотна характеристика (б)

Параметри відтворення сигналу зміщення трьома методами представлено в таблиці.

Технічні характеристики систем обробки квадратурних сигналів

Методи вимірювання зміщення	NI USB 6212 + LabView	АЦП AD7656 + Raspberry Pi 3	Arduino + CORDIC Atan2
Мобільний, реалізація	Не є мобільним	Мобільний	Мобільний
Складність алгоритму	Складний	Найбільш складний	Простий
Точність вимірювання	0,64 нм	0,64 нм	0,64 нм
Максимальна частота	0,2 кГц	0,86 кГц	2 кГц
Мінімальна частота	Майже 0 Гц	Майже 0 Гц	Майже 0 Гц
Вартість	500 \$	50 \$	5 \$

Із представлених у таблиці даних випливає, що система на основі Arduino з алгоритмом CORDIC не програє в точності вимірювання зміщення, має значну перевагу на вищих частотах зміщень і в габаритах перед більш складними та дорогими системами визначення зміщень, такими як системи на основі NI USB 6212 + LabView та АЦП AD7656 + Raspberry Pi 3.

Висновки

Проведений теоретичний аналіз і експерименти показали, що застосування методу CORDIC є найбільш ефективним методом для перетворення квадратурних сигналів інтерферометра на сигнал переміщення, найменш вибагливим до об'єму електронної пам'яті та простий у програмуванні. Тому обробка сигналу може проводитися на простих, компактних мікросхемах типу Arduino з ефективністю та точністю, яка досягається іншими методами тільки із застосуванням обробки сигналу на комп'ютері. Ефективність алгоритму дозволяє вимірювати механічні зміщення на високих частотах у реальному часі. Метод реалізовано у вигляді програми для простої і дешевої мікросхеми Arduino для обробки сигналу на прикладі горизонтального сейсмометра типу SL220. Теоретичний аналіз і експериментальні результати показали, що метод є перспективним для застосування у портативних малогабаритних приборах вимірювання зміщень із субнанометровою точністю та великим діапазоном частот.

1. Yuan J., Lyu B., Hang W., Deng Q. Review on the progress of ultra-precision machining technologies. *Front. Of Mech. Eng.* 2017. Vol. 12. P. 158–180.
2. Gao W. Precision Nanometrology: Sensors and Measuring Systems for Nanomanufacturing. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2010. 367 p.
3. Demarest F.C. High-resolution, high-speed, low data age uncertainty, heterodyne displacement measuring interferometer electronics. *Meas. Sci. Technol.* 1998. Vol. 9. p. 1024.
4. Wilson J.S. Sensor Technology Handbook. Newnes: London, UK, 2005. 94 p.
5. Abramovici A., Althouse W.E., Drever R.W.P., et al. LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. *Science*. 1992. Vol. 256(5055). P. 325–335.
6. Bingham Ph.R., Tobin K.W., Hanson G.R., and Simpson J.T. Spatial heterodyne interferometry techniques and applications in semiconductor wafer manufacturing. Proc. SPIE 5531, Interferometry XII: Techniques and Analysis, 2004.
7. Wu S., Zhang B., Ding X., Zhang L., Zhang Zh., Zhang Z. Radar Interferometry for Urban Infrastructure Stability Monitoring: From Techniques to Applications. *Sustainability*, 2023. Vol. 15, No. 19. p. 14654.
8. Edited by M. Bhowmick. Optical Interferometry — A Multidisciplinary Technique in Science and Engineering. IntechOpen Published: London, UK, 2022.
9. Watchi J., Cooper S., Ding B., Mow-Lowry C. M., Collette Ch. Contributed Review: A review of compact interferometers. *Rev. Sci. Instrum.* 2018. Vol. 89, No. 12. P. 121501.
10. Sorrentino F., Bongs K., Bouyer P., et al. A Compact Atom Interferometer for Future Space Missions. *Microgravity Sci. Technol.* 2010. Vol. 22. P. 551–561.
11. Field Guide to Displacement Measuring Interferometr. URL: <https://doi.org/10.1117/3.1002328>.
12. Britsky O., Gorbov I., Petrov V., Balagura I. A compact semiconductor digital interferometer and its applications. Proc. SPIE 9506. *Optical Sensors*. 2015. Vol. 9506. 7 p. doi:10.1117/12.2178476.
13. Wang Y., Zhao F., Luo L., Li X. A Review on Recent Advances in Signal Processing in Interferometry. *Sensors*. 2025. Vol. 25. P. 5013.
14. Carr J., Desmulliez M., Weston N., McKendrick D., Cunningham G., McFarland G., Meredith W., McKee A., Langton C. Miniaturised optical encoder for ultra precision metrology systems. *Precis. Eng.* 2009. Vol. 33. P. 263–267.
15. Quadrature encoder system integration. URL: <https://forum.digikey.com/t/quadrature-encoder-system-integration/39576>
16. Benammar M., Alassi A., Gastli A., Ben-Brahim L. New Fast Arctangent Approximation Algorithm for Generic Real-Time Embedded Applications. *Sensors*. 2019. Vol. 19, No. 23. P. 5148.
17. TIDA-00176. Interface to Sin/Cos Encoders with High-Resolution Position Interpolation Reference Design. URL: <https://www.ti.com/tool/TIDA-00176>

Надійшла до редакції 14.09.2025