

УДК 531.715.1; 531.719

І. В. Косяк

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Декодер квадратурних інтерференційних сигналів

Проведено аналіз і дослідження інтерференційних сигналів інтерферометричної системи по виміру надмалих лінійних переміщень. Розглянуто особливості побудови пристроїв реверсивного рахування числа інтерференційних смуг. Запропоновано реалізацію пристрою реверсивного рахування числа інтервалів приросту фази сигналу.

Ключові слова: інтерференційний сигнал, інтерферометр, фаза сигналу, реверсивний рахунок, інтерференційна смуга.

На сьогоднішній день дослідження в області оптичних технологій набули широкого поширення в самих різних областях людської діяльності. Особливе місце в колі наукових і практичних завдань відведено задачам метрологічного характеру. Використання засобів інтерферометрії дозволяє робити високоточні вимірювання численних розмірних і динамічних параметрів різних об'єктів. Вимірювання надмалих переміщень необхідно для проведення фундаментальних і прикладних робіт, що пов'язані зі створенням нового покоління засобів вимірювання, систем сканування й позиціонування в мікро- і нанодіапазонах.

Такі динамічні характеристики досліджуваних об'єктів, як вібрації, прискорення, напрямки руху, впевнено визначаються з точністю до сотих часток довжини хвилі використовуваного оптичного випромінювання [1].

Перспективними напрямками є розробки вимірювачів нанопереміщень [2, 3] і систем вимірювань коливань земної поверхні [4] із застосуванням високоточних методів і засобів вимірювання, основу яких становлять безконтактні оптичні методи лазерної інтерферометрії.

Методи лазерної інтерферометрії забезпечують високу чутливість у нанометровому діапазоні з гранично досяжним ступенем точності, забезпечують лінійність у широкому динамічному діапазоні, високу локальність, можливість автоматизації обробки виміряної інформації.

Аналіз досліджень і публікацій [1–8] свідчить про те, що висвітленню проблеми розробок високочутливих методів і засобів вимірювань нанопереміщень з використанням лазерних інтерферометрів приділяється велика увага. В останні роки всі частіше, як джерела когерентного випромінювання в складі інтерферометрів, застосовують напівпровідникові лазерні діоди.

© І. В. Косяк

В Інституті проблем реєстрації інформації НАН України створено лазерний інтерферометричний комплекс для вимірювань коливань земної поверхні. Актуальним завданням залишається удосконалення його роботи і дослідження нових принципів його побудови. Ця робота присвячена аналізу і дослідженню побудови окремих вузлів лазерного інтерферометричного комплексу.

Інтерференційний сигнал

Аналіз оптичних схем лазерних інтерферометрів переміщень показав, що в більшості випадків використовують двопроменеві інтерферометри Майкельсона [9]. Інтерферометричні методи вимірювань, як правило, зводяться до вимірів різниці ходу і, отже, різниці фаз, внесеної досліджуванним об'єктом. У загальному вигляді інтенсивність сумарної картини в довільній точці поля інтерференції, що утворене двома світловими хвилями, можна представити у вигляді

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos(\Delta\varphi(t)), \quad (1)$$

де I_1 і I_2 — інтенсивності інтерферуючих хвиль; $\Delta\varphi(t)$ — різниця фаз інтерферуючих коливань.

Різниця фаз пов'язана з різницею ходу ΔX співвідношенням

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot \Delta X}{\lambda}, \quad (2)$$

де λ — довжина хвилі когерентного джерела світла.

Усі параметри в (1) можна в першому наближенні вважати фіксованими. Тому сигнал інтерферометра пов'язаний, насамперед, зі зміною аргументу. Розглядати конкретну форму сигналу інтерферометра $I(t)$ можна тільки задавшись формою зміни аргументу $\Delta\varphi(t)$.

У випадку використання інтерферометра в складі інтерферометричного комплексу для вимірювань коливань земної поверхні зміну $\Delta\varphi(t)$ можна розглядати як сукупність модуляції неконтрольованими зовнішніми чинниками φ_0 (температура навколишнього середовища, зміна довжини хвилі лазера тощо) і вимірюваним впливом (модуляцією) $\varphi_M(t)$:

$$\Delta\varphi(t) = \varphi_0 + \varphi_M(t). \quad (3)$$

Як правило, вимірюваний вплив має гармонійну модуляцію аргументу інтерференційного сигналу

$$\begin{aligned} \varphi_M &= \varphi_m \cdot \sin(\omega_M t), \\ \Delta\varphi(t) &= \varphi_0 + \varphi_m \cdot \sin(\omega_M t), \end{aligned} \quad (4)$$

де φ_m — індекс модуляції; ω_M — кругова частота модуляції. Тоді форма сигналу двопробеневого інтерферометра при гармонійній модуляції аргументу задається виразом [1]

$$I(t) = A_0 \cdot [1 + V \cdot \cos(\varphi_0 + \varphi_m \cdot \sin(\omega_M t))], \quad (5)$$

де A_0 та V — постійна складова й контраст інтерференційного сигналу.

У створеному лазерному інтерферометричному комплексі використовується інтерферометр Майкельсона. Оптичні сигнали утворюються в інтерферометрі за рахунок режиму змішаних хвиль, тобто інтерференції променів, які відбиті від рухомого і нерухомого відбивачів. При переміщенні кутикового відбивача з фотоприймачів знімаються сигнали, близькі до синусоїдальних, які відрізняються один від одного за фазою на $\pi/2$, що необхідно для визначення напрямку переміщення.

Фотоприймачі, які поміщені на шляху сумарної хвилі, перетворюють інтенсивність вихідного сигналу інтерферометра в електричний сигнал:

$$U_1(t) = U_0 + U_M \cdot \sin(\varphi_0 + \varphi_m \cdot \sin(2\pi \cdot f_M t)), \quad (6)$$

$$U_2(t) = U_0 + U_M \cdot \cos(\varphi_0 + \varphi_m \cdot \sin(2\pi \cdot f_M t)), \quad (7)$$

де U_0 — постійна складова сигналу; U_M — амплітуда; f_M — частота модуляції.

Фаза $\Delta\varphi(t) = \varphi_0 + \varphi_m \cdot \sin(2\pi \cdot f_M t)$ пов'язана з миттєвим значенням вихідного сигналу фотоприймачів $U_1(t)$ і $U_2(t)$ через функцію $\arccos \Delta\varphi(t)$, яка однозначно визначена тільки на інтервалі $[0, 2\pi]$. У зв'язку з цим з (2) і (4) випливає, стосовно до двопробеневого інтерферометра Майкельсона, що переміщення яке вимірюється дорівнює [9]

$$\Delta X = \left(N + \frac{\Delta\varphi(t)}{2\pi} \right) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (8)$$

де N — ціле число інтервалів $[0, 2\pi]$ приростів фази сигналу фотоприймача при переміщенні відбивача інтерферометра в інтервалі ΔX і позначає цілі порядки інтерференції; $\Delta\varphi(t)$ — зміна фази в межах інтервалу $[0, 2\pi]$.

На рис. 1 показано приклад фрагментів реальних квадратурних інтерференційних сигналів, отриманих при дослідженні роботи лазерного інтерферометричного комплексу для вимірювань коливань земної поверхні. Відстань між максимумами дорівнює $\lambda/2$. Кутиковий відбивач інтерферометра розташований на корпусі маятника. Відновлений сигнал було отримано за допомогою обробки методом синус-косинусної демодуляції [10]. Аналіз обробленого сигналу показав, що відновлений сигнал є синусоїдальним із частотою коливань біля 2 Гц. Впливовою дією на механічні переміщення маятника при вимірюваннях, у даному випадку, були кроки людини.

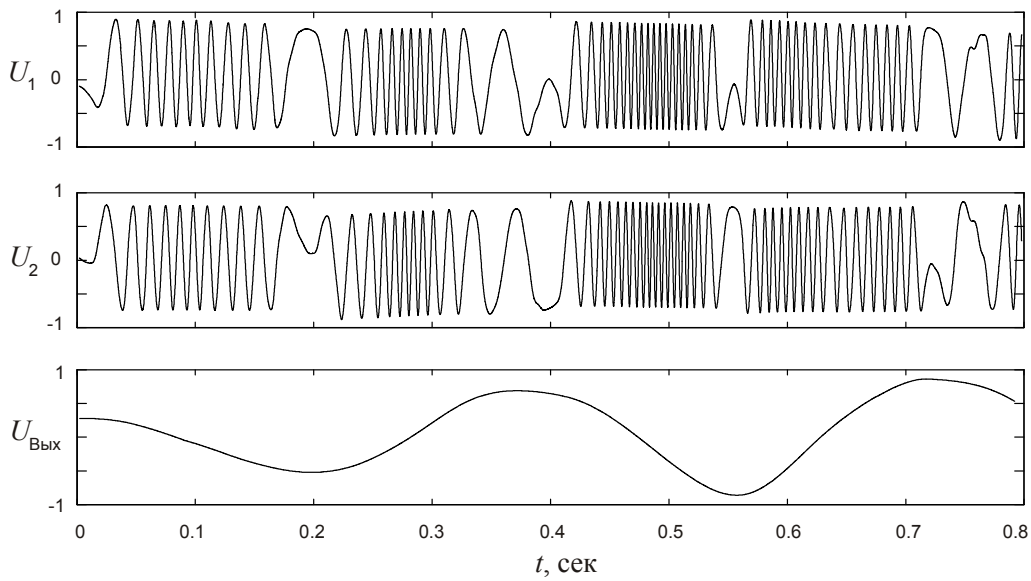


Рис 1. Приклад реальних інтерференційних сигналів, де U_1 та U_2 — квадратурні інтерференційні сигнали; $U_{\text{Вих}}$ — відновлений сигнал

На рис. 2 показано приклад фрагментів реальних квадратурних інтерференційних сигналів і відповідний їм відновлений сигнал за умови відсутності зовнішніх механічних коливань у даному приміщенні, тобто маятник коливається довільно. Такі інтерференційні сигнали з'являються, коли маятник знаходиться в стані умовного спокою.

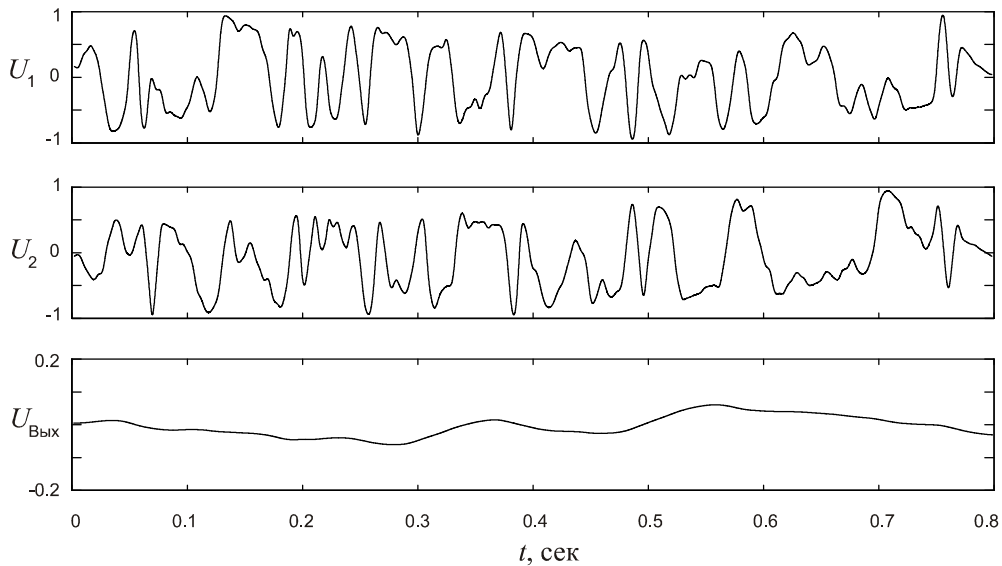


Рис. 2. Приклад реальних інтерференційних сигналів, де U_1 та U_2 — квадратурні інтерференційні сигнали; $U_{\text{Вих}}$ — відновлений сигнал

Інтерферограми на рис. 1 і 2 дозволяють побачити характерні зміни інтерференційного сигналу залежно від впливу зовнішніх механічних коливань.

При вимірюваннях довільних коливань виникає задача контролю абсолютно-го переміщення маятника. Для цього необхідно рахувати цілі числа інтервалів приростів фази сигналу N відповідно до виразу (8). Відомі різні методи й алгоритми реверсивного підрахунку N , або інтерференційних смуг. Але треба зазначити, що очевидною є проблема надійності підрахунку інтерференційних смуг, особливо відносно застосування підрахунку смуг у лазерному інтерферометричному комплексі для вимірювань коливань земної поверхні, або взагалі надмалих коливань.

Аналіз пристроїв рахування інтерференційних смуг

Для забезпечення реверсивного рахування числа смуг і можливості визначення напрямку переміщення інтерферометр повинен видавати два сигнали, які зміщені за просторовою фазою на $\pi/2$. Знак фазового зміщення між квадратурними сигналами $U_1(t)$ і $U_2(t)$ характеризує напрямок вимірюваного переміщення. За ширину інтерференційної смуги прийнято вважати відстань між двома сусідніми максимумами (рис. 1).

Із синусоїдальних квадратурних сигналів (6) і (7) формують за допомогою порогових пристроїв бінарні сигнали вигляду:

$$\hat{U}_1 = \text{sgn}\{U_1\}, \quad (9)$$

$$\hat{U}_2 = \text{sgn}\{U_2\}, \quad (10)$$

де $\text{sgn}\{\dots\}$ — знакова функція.

У результаті виміряне переміщення представляється послідовністю прямокутних імпульсів, які подаються далі для подальшої обробки та на реверсивний лічильник. На рис. 3 представлено вузол обробки інтерференційних сигналів, побудований на основі пристрою рахування інтерференційних смуг [11], який дозволяє одержувати один імпульс на кожен смугу. Умови появи сигналів управління реверсивним лічильником можна записати у вигляді рівнянь:

$$A = d\hat{U}_1 \wedge \hat{U}_2, \quad (11)$$

$$B = d\hat{U}_2 \wedge \hat{U}_1. \quad (12)$$

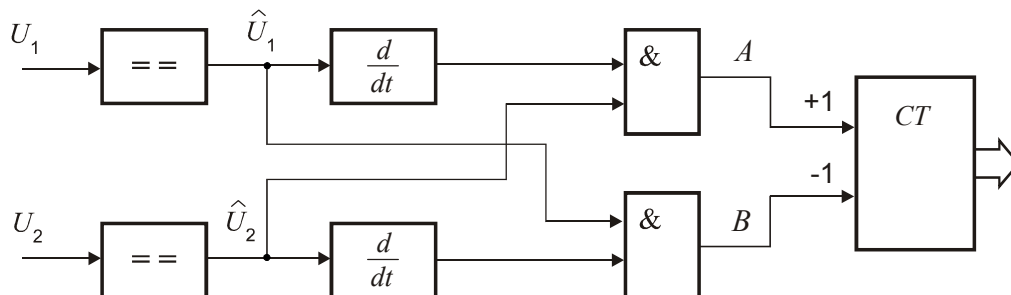


Рис. 3. Блок-схема пристрою рахування інтерференційних смуг

На рис. 4 представлено часові діаграми роботи схеми обробки сигналів інтерферометра на основі пристрою рахування інтерференційних смуг, який дозволяє одержувати один імпульс на кожен смугу.

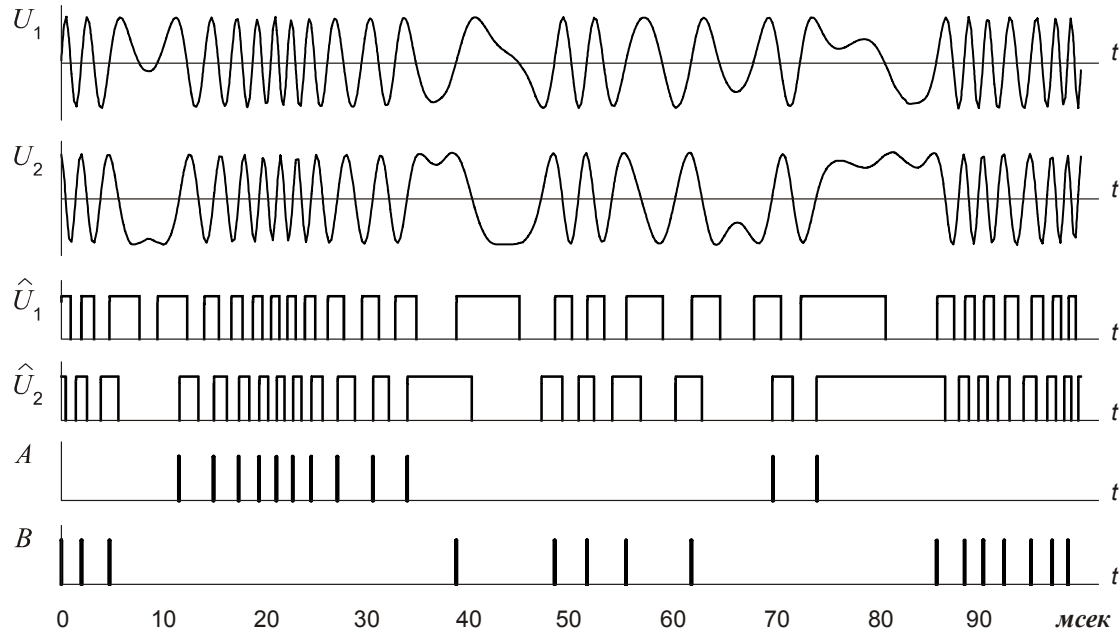


Рис. 4. Часові діаграми роботи пристрою рахування інтерференційних смуг

Суттєвим недоліком даного пристрою є наявність диференціаторів, при роботі яких можлива поява імпульсних перешкод, внаслідок чого лічильник буде рахувати помилкові відліки.

При вирішенні ряду завдань вимірів великих переміщень, вимірів при невеликих швидкостях змін інтерференційних сигналів, помилки визначення числа інтервалів проростів фази сигналу N накопичуються й впливають на кінцеву точність підрахунку. В роботі [12] проведено аналіз можливих похибок при обробці інтерференційних сигналів і причини їхнього виникнення. Серед причин похибок наявні наступні:

- похибки інтерферометра, до яких відносяться нестабільність частоти та потужності випромінювання лазера, оптична нелінійність;
- гістерезис порогових пристроїв (компараторів);
- шуми в інтерференційних сигналах;
- нестабільність напруги живлення;
- фазові збурення в інтерференційних сигналах;
- паразитні синусоїди;
- збурення руху системи інтерферометра;
- впливи зовнішнього середовища.

Для підвищення надійності підрахунку числа інтерференційних смуг і визначення абсолютної координати переміщення в роботі [13] запропоновано для зменшення впливу різних перешкод у пристрої використовувати модуль постійної

пам'яті *ROM*, в якому запрограмовано 12 адресних комбінацій вхідних сигналів і відповідні їм сигнали керування реверсивним лічильником. Принцип роботи даного пристрою пояснюється блок-схемою (рис. 5). Бінарні квадратурні сигнали \hat{U}_1 та \hat{U}_2 подаються на регістри *RG*, де вони накопичуються і зсуваються в часі на період, який встановлюється генератором тактових імпульсів і триває в межах $0,2-1$ від тривалості імпульсу бінарного сигналу. Таким чином, із 4-х сигналів $\hat{U}_1(t)$, $\hat{U}_2(t)$, $\hat{U}_1(t-1)$, $\hat{U}_2(t-1)$ формується адреса вибірки модуля пам'яті *ROM*, в якому записана таблиця відповідності сигналів. Зчитані логічні сигнали «0» або «1» подаються на реверсивний лічильник. Недоліком даного пристрою є наявність генератора тактових імпульсів, частота генерації якого знаходиться у вузьких межах відповідно до змін частоти інтерференційних сигналів.

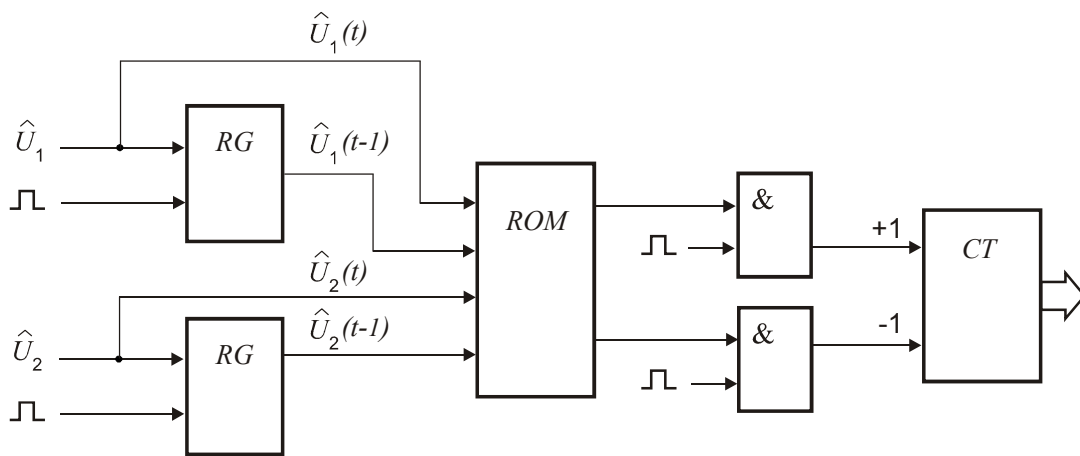


Рис. 5. Блок-схема пристрою рахування інтерференційних смуг з модулем пам'яті *ROM*

Реалізація пристрою реверсивного рахування числа інтервалів приросту фази інтерференційного сигналу

Для зменшення впливу різних перешкод, підвищення надійності підрахунку числа інтерференційних смуг N та визначення абсолютної координати переміщення запропоновано розробку пристрою реверсивного рахування числа інтервалів приросту фази інтерференційного сигналу.

Принцип роботи розробленого пристрою пояснюється блок-схемою, що зображена на рис. 6. Квадратурні інтерференційні сигнали U_1 та U_2 надходять на входи компараторів, де формуються бінарні квадратурні сигнали \hat{U}_1 та \hat{U}_2 . Для збільшення завадостійкості та зменшення зони невизначеності компаратори охоплені позитивним зворотним зв'язком. З виходів компараторів сигнали \hat{U}_1 та \hat{U}_2 надходять до логічного блоку, де перетворюються на чотири вихідні сигнали, умови появи яких записуються у вигляді рівнянь:

$$V_1 = \hat{U}_1 \wedge \overline{\hat{U}_2}; \quad V_2 = \overline{\hat{U}_1} \wedge \hat{U}_2; \quad V_3 = \overline{\hat{U}_1} \wedge \overline{\hat{U}_2}; \quad V_4 = \hat{U}_1 \wedge \hat{U}_2. \quad (13)$$

На виходах V_1, V_2, V_3, V_4 утворюються сигнали логічної «1» із зсувом в $1/4$ періоду проходження сигналів U_1 та U_2 . Виходи логічного блоку з'єднуються зі входами схеми відновлення, зібраної на RS-тригерах, яка усуває наявні в сигналах короточасні перешкоди. Цим досягається селекція перешкод, присутніх як в інтерференційних сигналах, так і на виходах компараторів, що зрештою, підвищує загальну завадостійкість системи. Подальша обробка сигналів відбувається в лічильній схемі DC , яка виробляє імпульс на виході C при проходженні циклічної послідовності сполучень $V_1 - V_2 - V_3 - V_4$ (рис. 6). При проходженні зворотної циклічної послідовності $V_4 - V_3 - V_2 - V_1$ виробляється імпульс по виходу D . Сформовані імпульсні сигнали C і D надходять відповідно на входи прямого та зворотного рахування реверсивного лічильника CT , виходи якого подаються на комп'ютер і на цифровий індикатор.

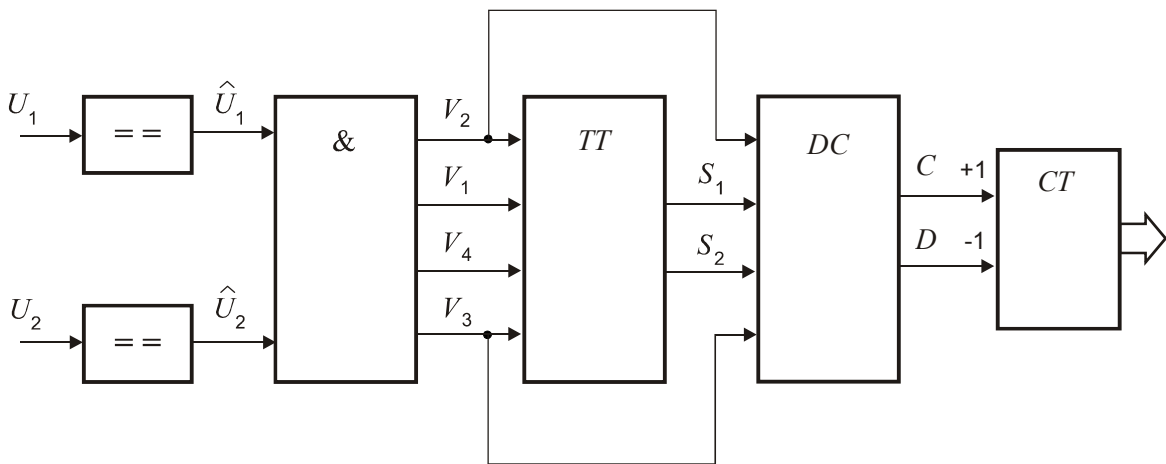


Рис. 6. Блок-схема розробленого пристрою реверсивного рахування числа інтервалів приросту фази інтерференційного сигналу

На рис. 7 представлено часові діаграми роботи схеми розробленого пристрою реверсивного рахування числа інтервалів приросту фази інтерференційного сигналу. Порівняльний аналіз часових діаграм пристрою рахування інтерференційних смуг (рис. 4) та розробленого пристрою показав, що в інтервалі часу 70–80 мс у розробленому пристрої присутній один імпульс на виході C , на відміну від пристрою рахування інтерференційних смуг (рис. 3), де на виході A присутні два імпульси. Сигнали A та C відповідають за прямий рахунок імпульсів реверсивного лічильника.

Алгоритм обробки сигналів у запропонованому пристрої на відміну від загальновідомого пристрою рахування інтерференційних смуг (рис. 3) і його модифікацій виключає можливість появи помилкових імпульсів у моменти часу, що відповідають зміні напрямку руху інтерференційних смуг. Це особливо важливо при застосуванні даного пристрою в лазерному інтерферометричному комплексі для вимірювань коливань земної поверхні та надмалих коливань і вібрацій взагалі, так як зміни інтерференційних сигналів відбуваються дуже повільно, коли маятник знаходиться в стані відносного спокою.

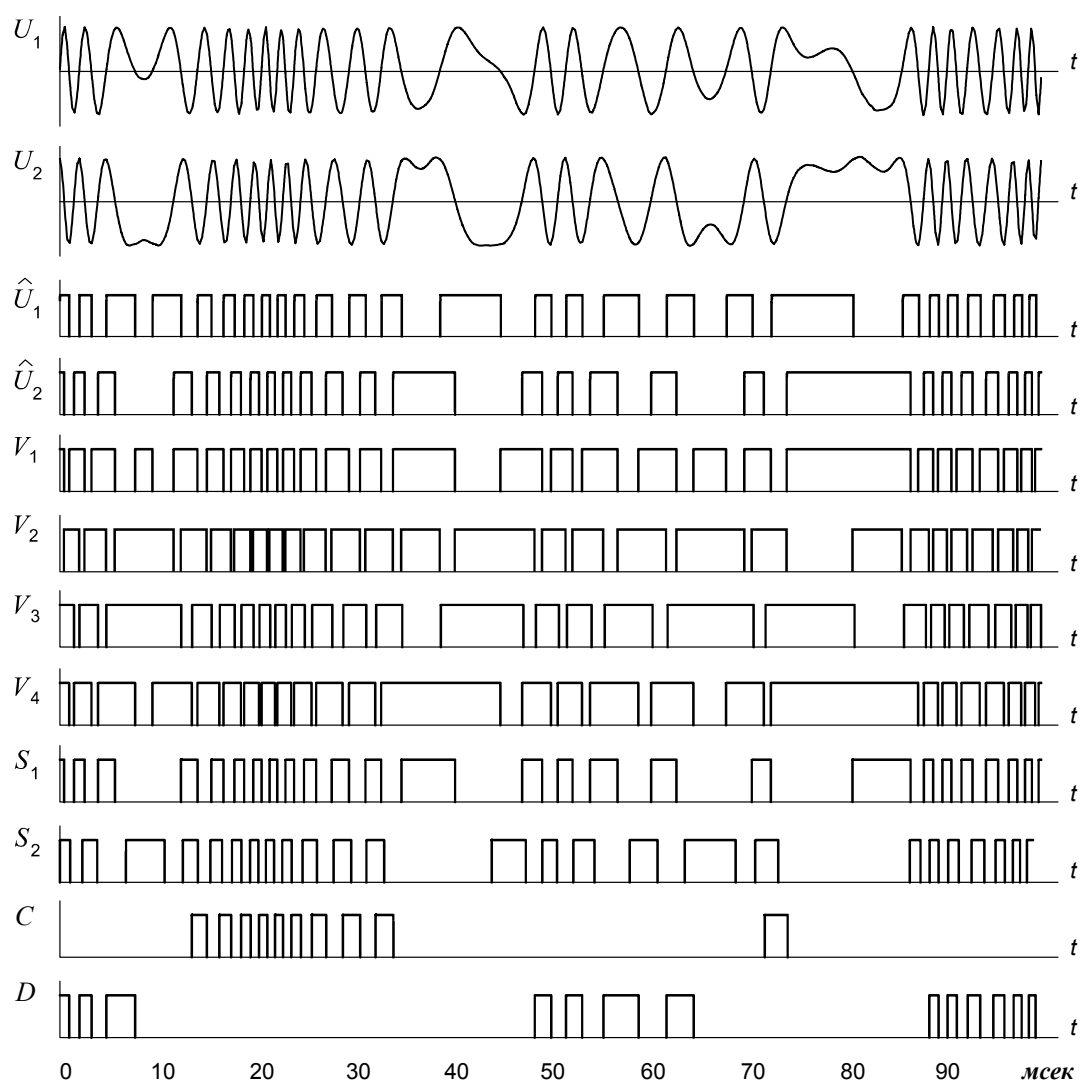


Рис. 7. Часові діаграми послідовності роботи схеми розробленого пристрою реверсивного рахування числа інтервалів приросту фази інтерференційного сигналу

Висновки

Проведено аналіз і дослідження пристроїв рахування інтерференційних смуг. Запропоновано реалізацію розробки пристрою рахування числа інтервалів приросту фази сигналу (рахування інтерференційних смуг). Показано, що запропонований пристрій підвищує загальну завадостійкість системи і виключає можливість появи помилкових імпульсів у моменти часу, що відповідають зміні напрямку руху інтерференційних смуг. Це дозволяє його використання в інтерферометричних комплексах по виміру надмалих коливань і переміщень взагалі.

1. *Когерентно-оптические методы в измерительной технике и биофотонике*: [под ред. В.П. Рябухо и В.В. Тучина]. — Саратов: Сателлит, 2009. — 127 с.

2. *Алехин В.* Лазерный интерферометр для измерения перемещений / В. Алехин, И. Мирошниченко, А. Серкин // Наноиндустрия. — 2010. — № 2. — С. 38–41.
3. *Даренек С.А.* Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений / С.А. Даренек, Ж. Желкобаев, В.В. Календин, Ю.А. Новиков // Труды Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. — 2006. — № 62. — С. 14–37.
4. *Пат.* 2012.0247213 США. МКІ G 01 V 1/52. Optical Seismometer; заявл. 2.04.2012; опубл. 4.10.2012.
5. *Traceable Vibration Amplitude Measurement With a Laser Interferometer* / F. Garoi1, D. Apostol1, V. Damian1, P. Schiopu // Rom. Journ. Phys. — 2010. — Vol. 55. — P. 369–375.
6. *Traceability of vibration and shock measurements by laser interferometry* / Н.-J. von Martens, A. Täubner, W. Wabinski [et al.] // Measurement. — 2000. — Vol. 28. — P. 3–20.
7. *Пат.* 66878 Україна, МКІ G 01 R 13/00. Високошвидкісний інтерферометр на основі запам'ятовуючого пристрою // Петров В.В., Брицький О.І, Бородин Ю.О.; заявл. 09.06.2011; опубл. 25.01.2012, Бюл. № 2.
8. *Britsky A.I.* A Compact Solid-State Digital Interferometer for Study of Physical and Chemical Properties of Materials / A.I. Britsky, O.A. Tsubin, L.B. Vereskun // Clusters And Nanostructured Materials (CNM-3). — Uzhhorod Vodohraj Ukraine, 14-17 October, 2012.
9. *Кирьянов В.П.* Лазерные интерферометры перемещений / В.П. Кирьянов, В.П. Коронкевич // Автометрия. — 1998. — № 6. — С. 65–84.
10. *Косяк И.В.* Применение синус–косинусной демодуляции в обработке интерферометрических сигналов при считывании звуковой информации с фонографических цилиндров // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2003. — Т. 5, № 4. — С. 33–42.
11. *Преснухин Л.Н.* Фотоэлектрические преобразователи информации / Л.Н. Преснухин. — М.: Машиностроение, 1974. — 376 с.
12. *Martens H.J.* Evaluation of Uncertainty in Interferometric Vibration Measurements / H.-J. von Martens // Proc. SPIE. In Fourth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques Advances and Applications. — 2000. — Vol. 4072. — P. 82–101.
13. *Пат.* 4079251 США. МКІ G 01 D 5/34. Incremental Optical Encoder System for Absolute Position Measurement; заявл. 12.08.1976; опубл. 14.03.1978.

Надійшла до редакції 20.05.2013