

**Спосіб вимірювання та обробки сигналів для пеленгаторів
інфрачервоного спектра частот на основі магнітооптичного
перетворювача**

Значне місце у вирішенні актуальних завдань радіомоніторингу займає проблема розробки нових методів і пристроїв, що дозволяють здійснювати операції спектрального перетворення сигналів, множення частоти, амплітуди сигналу, зсуву фази сигналу та вимірювання різниці фаз за допомогою магнітооптичного перетворювача на основі ефекту Фарадея та закону Малюса.

Останнім часом все більше з'являється наукових публікацій у яких розглядаються методи і моделі перспективних систем з комплексною обробкою сигналів щодо виявлення повітряних цілей, розпізнавання об'єктів, визначення дальності, параметрів руху та кутових координат. Для визначення цих параметрів використовують різні методи в умовах дії пасивних і активних шумових завад, що забезпечують можливість розпізнавання цих об'єктів на фоні існуючих перешкод. Більшість публікацій останнім часом пов'язані з виявленням, розпізнаванням і вимірюванням координат безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з використанням радіолокаційних, акустичних, оптичних та інфрачервоних методів та створення систем на їх основі [1, 2].

Більшу перевагу віддають пасивним методам, що базуються на застосуванні теплових пеленгаторів денного та нічного бачення і працюють у видимій та ближній області інфрачервоного спектра частот [7]. Для виявлення повітряних об'єктів такі системи характеризуються високою точністю в режимах вимірювань, що обумовлює їх успішну інтеграцію з радіоелектронними комплексами різного призначення. Крім того, такі системи здатні забезпечувати скритність своєї роботи та бути стійкими до подавлення сигналів засобами РЕБ. Ефективність роботи систем, що створені на основі методів використання видимого та інфрачервоного випромінювання, залежить від метеоумов навколишнього середовища. Цей недолік обмежує їх використання, як основних засобів пеленгації на відміну від добре відомих радіолокаційних методів.

За останні десятиріччя значно розширилися можливості в автоматизації та комплексній комп'ютерній обробці сигналів, стрімко розвивалася й елементна база, що призвела до мінімізації радіоелементів, а на їх основі, створення конструктивно-функціональних модулів. Прогрес в технологіях також сприяв створенню різного роду нових ефективних сенсорів, в тому числі матричних фоточутливих сенсорів для видимого та інфрачервоного діапазонів спектра частот [3]. Одним із найбільш широким застосуванням в якості фотоселементів знайшли кремнієві прилади із зарядним зв'язком (ПЗЗ матриці), що на відміну від інших фотоселементів є більш чутливими і володіють значно меншим рівнем шуму при вимірюванні [1, 4].

Слід відмітити, що завдяки досягненням в області технологій, перспективними стають саме інтегральні з радіоелектронними комплексами оптоелектронні системи пеленгації видимого та інфрачервоного діапазонів спектра частот, забезпечують повну автоматизацію прийняття рішення та дозволяють автоматизувати процеси виявлення і визначення параметрів.

Радіолокаційне спостереження є широко використовуваним засобом для виявлення повітряних цілей, але не менш значимим залишається визначення дальності до об'єкту спостереження, параметрів руху та кутових координат. Для вирішення цих задач використовуються різні методи: далекомірний, заснований на вимірі дальностей від двох різних точок (лінії положення – кола); кутомірний (пеленгаційний), коли пеленгатори розташовані в різних точках, визначають напрям (лінії положення – прямі); різницево-daleкомірний, коли вимірюється різниця відстаней від двох точок (лінії положення – гіперболи) та ін.

Фазові методи є більш точні при визначенні дальності до об'єкту, але потребують високої точності вимірюванні різниці фаз випромінюваного та відбитого від об'єкту сигналів, що напряму пов'язана з інструментальною похибкою фазометра. Крім того, фазові далекоміри вимірюють дальність тільки до одного об'єкту.

Частотні методи мають можливості вимірювання дальності декількох об'єктів одночасно. Для цього в частотному радіодалекомірі замість вимірювача частоти биття використовують аналізатор спектра з багатоканальним фільтрами обробки сигналів. Це робить систему більш складною, але розширює її можливості виявлення та визначення параметрів об'єктів.

Дослідження спектральних методів пеленгування, що використовуються в системах та комплексах радіомоніторингу мають низку недоліків, пов'язаних з великим часом обробки сигналів, необхідністю точної інформації про кількість прийнятих у суміші випромінювань, виявлення сигналу при низьких вхідних відношеннях сигнал/шум, визначення точності амплітудних, фазових та частотних характеристик прийнятого сигналу, обмеження або відсутність можливості їх використання в сучасних цифрових пеленгаторах. Отже, застосування спектральних методів пеленгування, що визначається відношенням швидкодія/точність є недостатня [5].

Проблема, яка пов'язана з ефективністю вимірювання та обробки сигналів у вузлах радіолокаційних систем, а саме: перетворення спектра сигналів, множення частоти, вимірювання амплітуди, фази та різниці фаз, в яких реалізовані способи на основі нелінійних елементів та їх характеристик, не є достатньо дослідженими. Актуальним на наш погляд є розвиток методу, який дозволяє здійснювати вимірювання та обробку сигналу, шляхом реалізації таких операцій за допомогою магнітооптичного перетворювача (МОП) на ефекті Фарадея та закону Малюса.

На основі МОП нами пропонуються рішення щодо вимірювання та обробки сигналів для вузлів радіолокаційних систем, що працюють в інфрачервоному діапазоні спектра частот або в низьких частотах з метою підвищення ефективності їх роботи.

Розглянемо принцип реалізації таких вузлів більш детально. Вхідний сигнал $u_{\text{вх}} = u_0 \sin \omega t$ подається на синхронізуючий пристрій, який виробляє імпульси запуску для генератора пилоподібних (або трикутноподібних) імпульсів. Потім пилоподібні (трикутноподібні) сигнали подаються на котушку підмагнічування МОП 3. На виході помножувача частоти вихідний сигнал дорівнює $u_{\text{вих}} = u_0 \sin N \omega t$ [6].

Максимум пилоподібного або трикутноподібного сигналу повинен співпадати з максимумом вихідного сигналу з тим, щоб вихідний сигнал був гармонійним без розривів. Якщо на МОП подавати не пилоподібний сигнал, а гармонійний синусоїдальний, то вихідний сигнал перетвориться в цілий спектр сигналів, аж до 60-ї гармоніки. На рис. 1. наведена спрощена конструкція вузла МОП спектра сигналу.

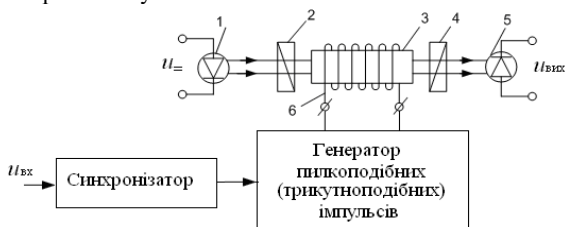


Рис. 1. Конструкція вузла МОП спектра сигналу

Світловий промінь від фотодіода 1, що проходить через поляризатор 2, магнітооптичний кристал ($Y_3Fe_5O_{12}$) 3, аналізатор 4 і перетворюється фотоприймачем 5 у вихідну напругу $u_{\text{вих}}$. Вхідна напруга $u_{\text{вх}}$ подається на підмагнічувальну котушку 6, що створює магнітне поле, яке керує намагніченістю зразка, а, отже, і кутом повороту площини поляризації світла.

Інтенсивність світла I на виході МОП перетворюється фотоприймачем у вихідну напругу $u_{\text{вих}}$. Функція перетворення (апаратна функція) такого пристрою в загальному вигляді дорівнює:

$$u_{\text{вих}} = u_0 \cos^2[\Theta_0 + \Theta(u_{\text{вх}})].$$

Спосіб зсуву фази сигналу може бути реалізований за структурною схемою наведеною на рис. 2.

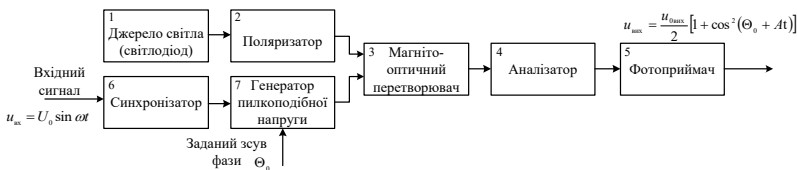


Рис. 2. Структурна схема для реалізації зсуву фази сигналу

При азимутальній орієнтації площини найбільшого пропускання світла відносно аналізатора ($\Theta_0 = \pi/2$) апаратна функція МОП має властивість перемноження сигналів.

На рис. 3 наведена структурна схема фазометра. Магнітооптичний фазометр містить генератор сигналу заповнення 1, магнітооптичні оптрони 2 і 6, вимірник вимірюваного сигналу 3, лічильник кратних періодів сигналу 4, суматор 5, вимірник опорного сигналу 7, генератор опорного сигналу 8, фазообертач 9. Блоки 3, 4, 5, 7 є складовими частинами мікропроцесора 10. Вихід суматора 5 є виходом пристрою. Фазометр працює таким чином. Сигнал u_{ω} з вимірюваною початковою фазою подається на магнітооптичний оптрон 1, на який також подається сигнал заповнення u_{Ω} від генератора сигналу заповнення 1. Сигнал заповнення u_{Ω} також подається на магнітооптичний оптрон 2 разом з опорним сигналом u_{on} від генератора опорного сигналу 8 через керований фазообертач 9. Початкова фаза опорного сигналу фазообертачем 9 зсувається так, щоб на виході оптрона був сигнал, що відповідає нульовій різниці фаз опорного сигналу і сигналу заповнення.

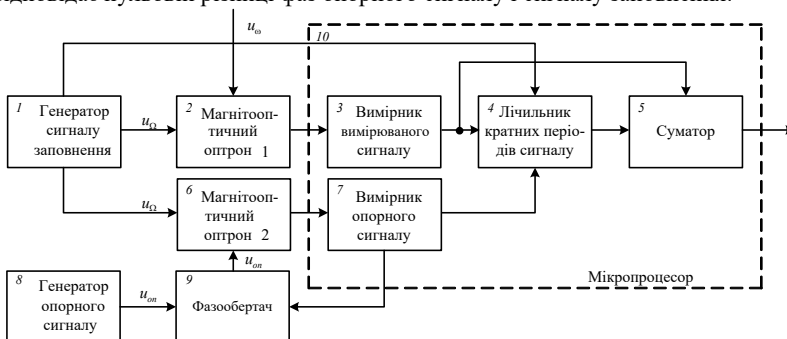


Рис. 3. Структурна схема магнітооптичного фазометра

У цей момент вимірювач опорного сигналу 7 відкриває лічильник вимірювання кількості дискретних кроків фази 4. Вимірник вимірюваного сигналу 3 аналізує через магнітооптичний оптрон 1 вимірюваний сигнал, ресерструючи момент закінчення дискретних кроків, і подає сигнал для закриття лічильника кратних періодів сигналу 4 від сигналу заповнення. Крім того, вимірювач опорного сигналу 7 видає інформацію про величину додаткової фази ξ , що залишилася після дискретного рахунку. Суматор 5 рахує кількість дискретних порцій фази і, складаючи їх із значенням додаткової фази ξ , видає значення вимірюваної фази ϕ . Цей момент фіксується вимірювачем опорного сигналу 7. Для цього сигнал подається для керування фазовим зсувом опорного сигналу на фазообертач 9.

На основі цієї властивості запропоновано метод вимірювання початкової фази гармонійного радіосигналу та конструкцію фотополяриметричного фазометра [7]. Визначено похибку вимірювання фази запропонованим методом. Досліджено поведінку вихідного сигналу в точках вимірювання. Встановлено залежність амплітуди вихідного сигналу в момент вимірювання початкової фази. Проаналізована потенційна точність запропонованого нами методу.

Висновок

У роботі було розглянуто актуальну науково-прикладну задачу підвищення ефективності вимірювання та обробки сигналів у радіолокаційних системах на основі використання особливостей апаратної функції МОП та його вихідної нелінійної характеристики.

Запропонований спосіб для вузлів пеленгатора, що працюють в інфрачервоному спектрі частот на основі МОП, дозволяє значно розширити область застосування та розробити пристрої, зокрема для радіолокаційних систем, на його основі. Конструктивні рішення щодо побудови вузлів та їх окремих компонентів можуть бути вдосконалені та виконані в інтегральному вигляді разом з радіoeлектронними та цифровими модулями.

Застосування цього методу дозволить створити вимірювальні прилади дуже високої точності, зокрема, що працюють в інфра- та низькому радіочастотному діапазонах та створить передумови подальшого розвитку нових вузлів для створення амплітудних детекторів, далекомірів, пеленгаторів, фазообертачів, аналізаторів спектру тощо.

Список літератури

1. Andraši P., Radišić T., Muštra M., Ivošević J. Night-time Detection of UAVs using Thermal Infrared Camera // *Transportation Research Procedia*. 2017.Vol. 28. P. 183 – 190.
2. Карташов В.М., Коритцев І.В., Шейко С.О., Олейников В.Н., Зубков О.В., Бабкін С.І. Оптико-електронні методи виявлення повітряних об'єктів та визначення їхніх координат// *Радіотехніка: Всеукраїнський міжвідомчий наук.-техн. збірник*. 2020. Вип. 202. С. 153 – 159.
3. Samaras S., Diamantidou E., Ataloglou D. et al. Deep Learning on Multi Sensor Data for Counter UAV Applications-A Systematic Review // *Sensors*. Basel. 2019. Nov. 19 (22). P. 4837.
4. Kong W., Zhang D., Wang X., Xian Z., J. Zhang. Autonomous landing of an UAV with a ground-based actuated infrared stereo vision system // 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, 2013. P. 2963 – 2970.
5. Слободянюк П.В. Довідник з радіомоніторингу / П.В. Слободянюк, В.Г. Благодарний, В.С. Ступак; під. заг. ред. П.В. Слободянюка. – Ніжин : Аспект-Поліграф, 2008. – 588 с.
6. Слободян О. П. Магнітооптичний спосіб множення частоти сигналу низькочастотного діапазону / О. П. Слободян // *Наукоємні технології*. - 2018. - № 2. – С. 203-209.
7. Сібрук Л.В., Слободян О.П., Єнчев С.В. Спосіб і пристрій вимірювання початкової фази гармонічного радіосигналу на основі магнітооптичного перетворювача. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 34 (73) № 1, 2023. – С. 57-66. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/09>.