

**ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО  
ПРИЛАДОБУДУВАННЯ**

DOI : 10.20535/1970.67(1).2024.306719

УДК 621.37, 535.8

**ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ МІКРОХВИЛЬОВИХ ФОТОННИХ РАДАРІВ**<sup>1</sup>Аврутов В. В., <sup>1</sup>Рупіч С. С., <sup>2</sup>Цисарж В. В.<sup>1</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна,

<sup>2</sup>Державне підприємство Науково-дослідний інститут  
радіолокаційних систем "Квант-радіолокація", Київ, УкраїнаE-mail: [v.avrutov@kpi.ua](mailto:v.avrutov@kpi.ua)

На сьогодні провідні країни світу інтенсивно працюють над розробкою радіолокаційних станцій нового покоління - радіофотонних радарів, які дозволяють значно зменшити масогабаритні характеристики радіолокаційних станцій, збільшити інформативність та дальність виявлення цілей внаслідок зменшення втрат в довгих комунікаційних лініях при використанні оптичного волокна, забезпечити високу перешкодозахищеність завдяки значно меншій чутливості оптико-електронної апаратури та волоконно-оптичних ліній зв'язку до зовнішніх електромагнітних впливів. Мікрохвильова фотоніка забезпечує широку смугу пропускання, плоску характеристику, передачу з низькими втратами, багатовимірне мультиплексування, надшвидку обробку аналогового сигналу та стійкість до електромагнітних перешкод. Реалізація радара в оптичній області може забезпечити кращу роздільну здатність, покриття та швидкодію, що було б важко реалізувати за допомогою традиційної електроніки. В оглядовій статті розглянуто стан розвитку та системні архітектури таких фотонних радарів, як оптоелектронні гібридні радары, повністю оптичні радары, багатофункціональні мікрохвильові фотонні радарні системи, розподілені мікрохвильові фотонні радары, програмно-визначені радары та когнітивні радары. Обговорюються нові технології в цій галузі та можливі майбутні напрямки досліджень. В якості прикладу, розглянуто ширококутовий мікрохвильовий фотонний радар, відтворений на основі мікросхеми. Генератор ширококутового сигналу та приймач вбудовані в кремнієвий кристал на ізоляторі. Отримано високоточне вимірювання дальності з роздільною здатністю 2,7 см і похибкою менше 2,75 мм та реалізовано візуалізацію кількох цілей зі складними профілями. Але продуктивність більшості інтегрованих мікрохвильових фотонних мікросхем ще не є задовільною для практичних радарних застосувань. Монолітна інтеграція ключових мікрохвильових фотонних підсистем є також недостатньо зрілою для практичного застосування, тому гібридна інтеграція пристроїв, виготовлених на їхніх оптимальних інтеграційних платформах, становить практичний інтерес. На сучасному етапі фосфід індію, нітрид кремнію та кремній на ізоляторі є трьома провідними платформами для фотонної інтеграції.

**Ключові слова:** радар; мікрохвильова фотоніка; роздільна здатність; пропускна здатність.

**Вступ**

Мабуть, радар або радіолокаційна станція (РЛС) є єдиним засобом всепогодного, цілодобового, далекого виявлення місцезнаходження та розпізнавання цілей [1]. RADAR - це скорочення від RAdio Detection And Ranging. Випромінюючи радіочастотні (РЧ) сигнали у вільний простір за допомогою передавача та збираючи відлуння за допомогою приймача, можна отримати таку інформацію про ціль, як відстань, висота, зображення, напрямок і швидкість [1]. Використання суто електронних технологій у традиційних радарях призводить до обмеженої смуги пропускання, незначної кількості функцій, низької швидкості передачі та низької роздільної здатності [2, 3]. Це ускладнює

виявлення та ідентифікацію низько розташованих, малошвидкісних і невеликих цілей для цивільних застосувань, а також у складних електромагнітних середовищах. Щоб вирішити ці проблеми, в радари були впроваджені технології на основі фотоніки. Характерними ознаками сучасної фотоніки є широка смуга пропускання, плавний відгук, передача з низькими втратами, багатовимірне мультиплексування, швидка обробка аналогових сигналів і стійкість до електромагнітних перешкод [4]. Сучасні досягнення в мікрохвильовій фотоніці дозволили розробити мікрохвильові фотонні підсистеми, такі як оптоелектронні осцилятори (optoelectronic oscillators - ОЕО), ширококутові генератори сигналів, оптичні мережі формування променя

(optical beamforming networks OBFN), мікрохвильові фотонні змішувачі, системи перетворення Фур'є в реальному часі (real-time Fourier transform RTFT) і фотонні аналого-цифрові перетворювачі [5]. Крім того, завдяки застосуванню фотоніки були запропоновані різні мікрохвильові фотонні радарні архітектури, які продемонстрували виняткову конфігурованість, численні функції та можливості зображення з високою роздільною здатністю.

Мікрохвильові фотонні підсистеми можуть бути інтегровані для реалізації радіолокаційного приймача. На рис. 1 показано загальну блок-схему мікрохвильового фотонного радара [2], який включає модулі передачі/приймання (transmit/receive T/R), оптичні модулі та модулі цифрової обробки сигналів (digital signal processing DSP). Відповідно до архітектури оптичних модулів мікрохвильові фотонні радары можна розділити на шість категорій: оптикоелектронні гібридні радары, повністю оптичні радары, багатофункціональні мікрохвильові фотонні радарні системи, розподілені мікрохвильові фотонні радары, програмно-визначені радары та когнітивні радары.

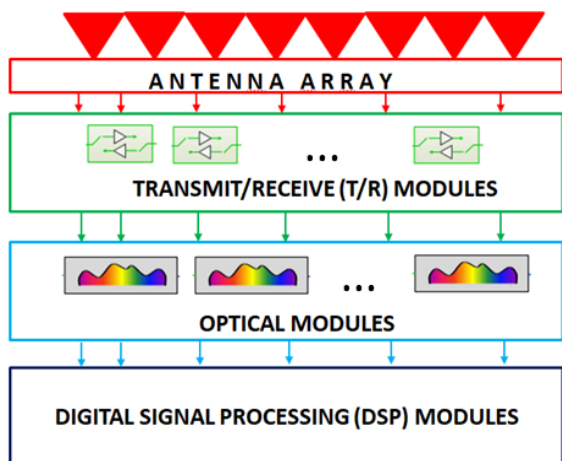


Рис. 1. Блок-схема мікрохвильового фотонного радара

### Оптикоелектронний гібридний радар

Архітектура оптико-електронного гібридного радара [2] являє собою традиційний електронний радар з однією або кількома підсистемами, реалізованими в оптичній області (рис. 2).

Кілька оптико-електричних (ОЕ) і електрично-оптичних (ЕО) перетворень потрібні, якщо в системі є два або більше оптичних модулів. Кілька пар перетворень ОЕ та ЕО призводять до значних втрат, шуму та нелінійних компонентів і, отже, значно погіршують продуктивність радара. Крім того, інші електронні компоненти в системі компенсують переваги, отримані мікрохвильовими фотонними технологіями. Ширококутовий характер оптико-електронного гібридного радара

використовується для створення радіолокаційних зображень із надвисокою роздільною здатністю. Зазвичай радіолокаційне зображення можна створити за допомогою радара із синтезованою апертурою (Synthetic Aperture Radar SAR) або радара зі зворотною синтетичною апертурою (Inverse Synthetic Aperture Radar ISAR).

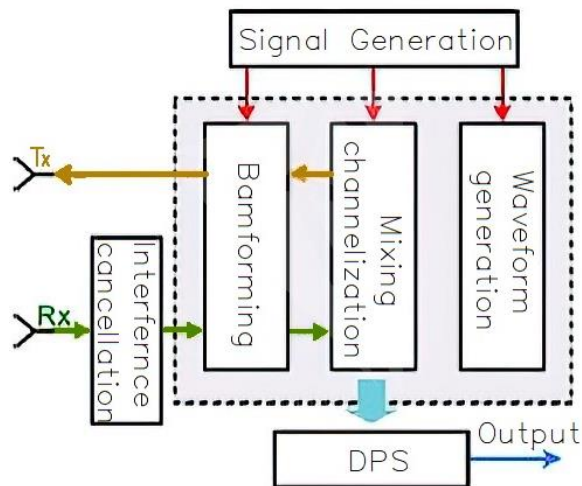


Рис. 2. Архітектура оптико-електронного гібридного радара

Використання руху антени радара або цілі дозволяє створити синтетичну апертуру з більш точним просторовим дозволом, ніж звичайні радары зі скануванням променя. Роздільна здатність за дальністю визначається смугою радіолокації за допомогою формули, яка не залежить від відстані

$$L_R = \frac{c}{2B}, \quad (1)$$

де  $c$  – швидкість світла у вакуумі,  $B$  – ширина смуги випромінюваного сигналу, а роздільна здатність за перехресною дальністю пов'язана з кутом огляду  $\theta$  і несучою частотою  $f_c$  радіолокаційного сигналу

$$L_c = \frac{c}{2\theta f_c}. \quad (2)$$

Оскільки високої роздільної здатності можна досягти збільшенням кута огляду, ключем до покращення роздільної здатності 2D є збільшення смуги радіолокації. Більшість зареєстрованих на даний момент оптико-електронних гібридних радара для отримання зображень з високою роздільною здатністю реалізовано за допомогою обробки деципування, в якій лінійно-частотно-модульований (linearly frequency-modulated LFM) сигнал використовується, як сигнал радара [6,7]. Створено інтерферометричний радар із синтетичною апертурою з оптичним генератором сигналів довільної форми в передавачі та фотонним мікрохвильовим змішуванням у приймачі [8]. Система використовує різницю фаз між двома складними двовимірними зображеннями, щоб оцінити висоту кожної точки. Цільовий радар необхідний для по-

дальшого покращення продуктивності 3D-зображення, особливо для вимірювання висоти, еквівалентної 2D-апертури, яка є вертикальною до лінії візування.

### Повністю оптична архітектура радарів

На відміну від оптоелектронного гібридного радара, повністю оптичний радар (рис. 3) реалізує всю генерацію, передачу та обробку радіочастотних сигналів за допомогою фотоніки, яка зазвичай базується на лазері з синхронізованим режимом (mode-locked laser MLL) [2].

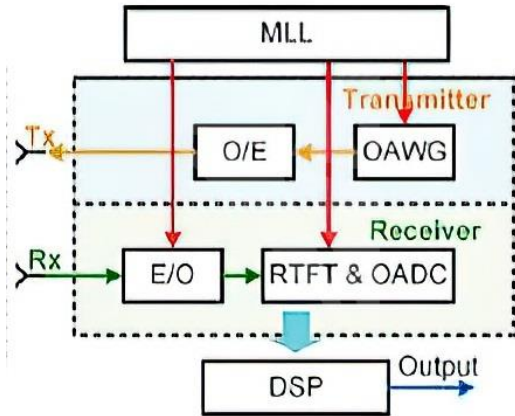


Рис. 3. Архітектура повністю оптичного радара

У передавачі MLL забезпечується висококогерентними оптичними несучими або ультракороткими імпульсами для формування широкосмужових радіолокаційних сигналів, а в приймачі відлу-

ння обробляється аналоговою обробкою сигналу. Опорні сигнали для всієї радіолокаційної системи також забезпечуються MLL. Переваги повністю оптичного радара включають значно зменшену кількість перетворень OE та EO, а також деякі надзвичайні характеристики, що забезпечуються висококогерентним джерелом імпульсів. На поточному етапі більшість модулів обробки сигналів на основі ультракоротких імпульсів не мають достатньої готовності до практичного застосування. MLL – це серце повністю оптичної радіолокаційної системи, яка передає серію імпульсів із надстабільною частотою повторення, надкороткою шириною імпульсу та великою кількістю спектральних ліній.

Як приклад, розглянемо принципову схему (рис. 4) першої повністю оптичної радіолокаційної системи, продемонстрованої на польових випробуваннях [9]. Передавач використовує два оптичні смужові фільтри (optical band-pass filters OBPF) для вибору двох гребінчастих ліній з MLL. Одна гребінчаста лінія модулюється сигналом основної смуги, а друга – зрушеною по частоті. Дві довжини хвилі потім переповнюються в PD для генерації радіолокаційного сигналу в потрібному діапазоні частот.

Практичні випадки часто потребують перенастроювання згенерованого радіолокаційного сигналу, що реалізується зміною основної смуги сигналу. Крім того, ви можете переключити центральну частоту, вибравши дві гребінчасті лінії з різним інтервалом частот.

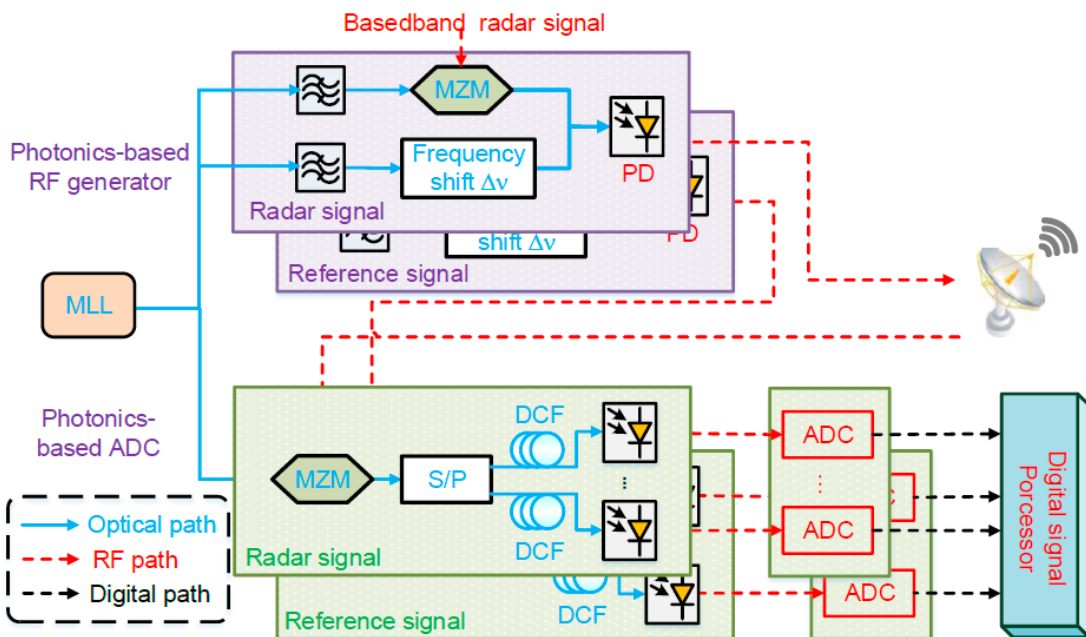


Рис. 4. Принципова схема повністю оптичної радіолокаційної системи

В результаті радар генерує сигнали з центральною частотою від 400 МГц до 40 ГГц і смужою пропус-

кання 200 МГц. Смуга пропускання згенерованого сигналу обмежена частотою повторення MLL, яка

в демонстрації становила 400 МГц. У приймачі отримані відлуння-сигнали дискретизуються ультракороткими оптичними імпульсами від того ж MLL. Потім дискретизований сигнал перетворюється на низькошвидкісні сигнали за допомогою оптичного послідовно-паралельного перетворення та розтягування часу. Це дозволяє використовувати низькошвидкісний електричний АЦП для достатньої оцифровки сигналу в кожному каналі. На схемі позначено DCF: dispersion compensation fiber – дисперсійне компенсаційне волокно.

Натурний експеримент продемонстрував можливість створення повністю оптичного радара. При радіолокаційному сигналі з 13-бітним кодом Баркера роздільна здатність РЛС становила близько 23 м, а дальність виявлення – близько 30 км. Роздільна здатність діапазону може бути додатково покращена, якщо використовувати сигнал ПЧ із вищою смугою пропускання.

### **Багатофункціональна мікрохвильова фотонна радарна система**

Завдяки широкій смузі пропускання та різноманітним методам мультиплексування, які забезпечуються фотонними технологіями, у трансивері можна одночасно маніпулювати декількома сигналами, що дозволяє створювати багатофункціональні радари з меншими апаратними засобами та з меншими витратами. Деякі нові мікрохвильові фотонні радіолокаційні приймачі мають вбудовані додаткові функціональні модулі для генерації або обробки сигналів для зв'язку або радіоелектронної боротьби. Наприклад, приймач на основі фотоніки одночасно перетворює радіолокаційні відлуння та сигнали зв'язку з різними смугами частот, у цьому експериментальні результати підтвердили бездоганний прийом радіолокаційних відлунь S-діапазону та 54 Гбіт/с 64-QAM ортогонального частотного мультиплексування (OFDM). Сигнал S-діапазону OFDM. Подібним чином, оптоелектронний гібридний радіолокаційний передавач у [9] також може діяти як передавач зв'язку внаслідок кодування сигналу AMSK у сигнал радара. Одночасно було досягнуто значення роздільної здатності зображення до  $\sim 1,8 \text{ см} \times 2 \text{ см}$  і швидкості зв'язку 100 Мбіт/с. Електронна боротьба – це ще один вид функцій, які можна інтегрувати в мікрохвильові фотонні радари. Типова система такого типу, в якій швидке вимірювання частоти та радіолокаційне зображення високої роздільної здатності можуть бути реалізовані одночасно. Вимірювання частоти в діапазоні Ка з роздільною здатністю 40 МГц і частотою оновлення 100 кГц може бути досягнуто разом із зображенням ISAR у діапазоні Ку. Лідари також можна інтегрувати з мікрохвильовими фотонними радарними. Для вимірювання швидкості може бути запропонована когерентна радарно-лідарна система, заснована на спіль-

ному MLL, у якій різні гребінчасті лінії розподіляються для лідара та радара відповідно.

### **Розподілені мікрохвильові фотонні радари**

Завдяки низьким втратам при передачі, легкій вазі, стійкості до електромагнітних перешкод і можливості двонаправленої передачі оптичне волокно вважається найкращим середовищем передачі сигналів між декількома базовими станціями в розподіленій радіолокаційній мережі. Таким чином, розподілені радіолокаційні мережі з використанням фотоніки привернули велику увагу [10]. У [11] повідомляється про широкосмугову когерентну апертурну розподілену радіолокаційну систему, що складається з центральної системи керування, кількох дистанційно розподілених приймачів-передавачів і волоконно-оптичної мережі синхронізації часу. Центральна система керування виконує генерацію та обробку багатоканальних ортогональних сигналів LFM, мережа синхронізації часу забезпечує синхронізацію часу між різними віддаленими трансиверами, а віддалені трансивери виконують перетворення ОЕ/ЕО та передають і приймають радіочастотні сигнали. Проведено експериментальне випробування двоелементної повністю оптичної радіолокаційної системи X-діапазону із смугою пропускання 3 ГГц. Приріст системного відношення сигнал/шум (signal-to-noise ratio SNR) може досягати 8,33 дБ, якщо досягнуто повної когерентності. Це узгоджується з теоретичним прогнозом щодо можливостей точності відстані, який можна покращити в 2,6 рази. Крім того, раніше були запропоновані волоконно-розподілені радіолокаційні мережі з використанням надширокопосмугових [12] і хаотичних [13] сигналів на основі структури мультиплексування з поділом хвиль (wavelength-division multiplexing WDM), що дозволило досягти високоточного позиціонування цілі.

### **Програмно-визначені радари**

Програмно-визначений радар є зростаючою тенденцією [14], де мікрохвильові фотонні архітектури поєднуються з передовими алгоритмами обробки сигналів і програмно-визначеними радіотехнічними методами. Цей підхід забезпечує динамічну реконфігурацію та оптимізацію функцій радара, що призводить до покращення адаптивності, гнучкості та продуктивності.

Програмно-визначений радар – це радіолокаційна система загального призначення, в якій більша частина обробки, наприклад генерування сигналу, фільтрація, перетворення вгору та вниз тощо, виконується програмним забезпеченням. Це програмне забезпечення можна легко адаптувати, що надає програмним радарам багато переваг, таких як [14, 15]:

- можливість створення багатоцільової РЛС;

- можливість повторного використання того самого обладнання;
- більш проста реалізація передових алгоритмів обробки сигналів;
- можливість швидкої модернізації за нижчими цінами.

У програмно-визначеному радарі компоненти, які зазвичай реалізуються в апаратному забезпеченні (такі як змішувачі, фільтри, модулятори, демодулятори, детектори тощо), реалізуються в програмному забезпеченні на комп'ютері чи іншому програмованому пристрої, здебільшого програмованій вентиляційній матриці (field-programmable gate array FPGA).

У даний час впровадження програмно-визначених радарів стало можливим завдяки величезному прогресу комп'ютерних технологій. Існує два варіанти конструкції програмно-визначеного радара:

- більша частина обробки відбувається на FPGA, а комп'ютер лише керує радаром і відображає результати;
- більша частина обробки відбувається на комп'ютері, а FPGA виконує лише деякі основні операції (наприклад, децимацію).

FPGA – це інтегральна схема, яка розроблена для налаштування після виготовлення, і тому є «програмованою на місці». Конфігурація FPGA зазвичай визначається за допомогою мови опису обладнання (hardware description language HDL), такої як VHDL і Verilog. FPGA містять програмовані логічні компоненти, які називаються «логічними блоками». Ієрархія реконфігурованих з'єднань дозволяє з'єднувати блоки. У більшості FPGA логічні блоки також містять елементи пам'яті. Таким чином, реалізація радіолокаційного алгоритму на одній FPGA зазвичай обмежена кількістю логічних блоків і елементів пам'яті, доступних на FPGA. Якщо алгоритм реалізації складніший, радар потребуватиме кількох FPGA, що ускладнить конструкцію радара та зменшить можливість його повторного використання.

У випадку комп'ютерної реалізації більша частина обробки відбувається на комп'ютері, тоді як лише деякі основні операції (такі як децимація) виконуються на FPGA. Це дуже гнучке рішення, яке значно спрощує реалізацію дуже складних алгоритмів. Єдиним обмеженням зазвичай є швидкість обробки комп'ютера. Прикладом може служити програмно реконфігурований пасивний радар. Це пасивний радар, що використовує FM радіовипромінювачі. Він складається з восьми всепрямованих антен і цифрового формування променя (digital beamforming DBF) для формування опорних променів у напрямку FM-радіовипромінювачів і спостережних променів до цілей. Повний алгоритм працює на ПК, оснащеному процесором Intel Core 2 Quad. Обчислювальна потужність цього типу ПК обмежує систему обробкою

в реальному часі лише одного випромінювача та одного спостережного променя. Деякі, зазвичай експериментальні, програмно визначені радари засновані на проекті GNU Radio. GNU – це рекурсивна аббревіатура, яка означає «GNU не Unix». Проект GNU об'єднав волонтерів, початковою метою яких була розробка повністю вільної операційної системи, яка тепер відома як "Linux". Проект GNU на даний момент включає багато проектів вільного програмного забезпечення, включаючи проект GNU Radio.

### **Когнітивний радар**

Програмно-визначений радар дозволить реалізувати когнітивний радар [14]. Когнітивний радар виконує три операції: інтелектуальну обробку сигналу, зворотний зв'язок приймач-передавач і виявлення шляхом відстеження.

У разі інтелектуальної обробки сигналу когнітивний радар використовує попередні знання для досягнення найкращих результатів.

Обробка сигналу можлива за допомогою двох типів інформації:

- Інформацію про навколишнє середовище спочатку отримує сам радар. Зазвичай це називається адаптивною обробкою.
- Інформація, надана зовнішніми джерелами знань, відома як обробка на основі знань. Такими джерелами знань можуть бути зовнішні бази даних, інші радари чи інші датчики. Останнє відрізняється від об'єднання даних, оскільки інформація, передана іншими датчиками, використовується для адаптації внутрішньої обробки сигналу радара. У разі об'єднання даних інформація з інших датчиків лише «змішується» з виходом радара, не впливаючи на його поведінку.

І якщо, нарешті, когнітивний радар виконує виявлення завдяки відстеженню, це означає, що:

- 1) Для заданої області пошуку радіолокаційні дані збираються протягом певного періоду;
- 2) Для кожної комірки роздільної здатності за дальністю та азимуту розраховується ймовірність того, що комірка містить ціль;
- 3) Зі зміною розподілу ймовірностей цілі рекурсивні обчислення на етапі 2 виявляють траєкторії цілі з часом і згодом приймають відповідні жорсткі рішення щодо можливих цілей.

### **Висновки та майбутні напрямки розвитку**

Добре відомі переваги мікрохвильової фотоніки стимулювали застосування технологій на основі фотоніки до радарів. Це застосування технологій мікрохвильової фотоніки призвело до двох типових архітектур мікрохвильових фотонних радарів, тобто оптоелектронної гібридної структури та повністю оптичної структури. Випробування прототипів РЛС в обох категоріях підтвердили наступні переваги фотоніки: широка смуга пропускання та великий частотний діапазон дозволяють

отримувати двовимірні або тривимірні зображення високої роздільної здатності та точно ідентифікувати ціль; низький фазовий шум фотонного гетеродинного генератора значно підвищує ефективність виявлення слабких сигналів з доплерівським зсувом в умовах сильних перешкод; виняткова реконфігурація фотонних методів дозволяє генерувати та обробляти різноманітні та складні сигнали для адаптивних радарів або когнітивних радарів; оптична обробка аналогового сигналу зменшує обсяг даних для DSP, що значно прискорює відгук радарів; висока когерентність імпульсного лазера та стабільна радіочастотна передача покращують SNR радарних систем, особливо розподілених радарів і радарів MIMO.

Немає сумніву, що мікрохвильовий фотонний радар і відповідні технології досягли певної досконалості, однак є значний простір для вдосконалення. Кілька очікуваних майбутніх подій обговорюються нижче. Інтеграція фотонів є основною проблемою для дослідників у галузі мікрохвильових фотонних радарів. Більшість мікрохвильових фотонних радарних систем засновані на дискретних оптичних компонентах. Це призводить до громіздкої системи з низькою надійністю. Інтеграція з високою щільністю є критичною для багатоврівневих радарних систем і мініатюрних платформ, таких як безпілотні літальні апарати (БПЛА), автономні транспортні засоби або навіть мобільні пристрої. Відомі досягнення в області фотонних інтегральних схем для можливого застосування в радарях [16]. Зокрема, було продемонстровано різноманітні інтегровані оптичні формувачі пучка на основі оптичних кільцевих резонаторів, інтерферометрів із затримкою Маха-Цендера [17] та хвилеводних матриць [18]. Також повідомлялося про інтегровані ОЕО, хоча характеристики фазового шуму й досі потребують покращення [19]. Крім того, було продемонстровано деякі багатofункціональні будівельні блоки, такі як відбивний мікрокільцевий резонатор [20] і програмована двовимірна сітчаста мережа [21], які можуть бути корисними для реконфігурованого або програмно визначеного мікрохвильового фотонного радара. Нещодавно було продемонстровано широкосмуговий мікрохвильовий фотонний радар на основі мікросхеми (рис. 5), що покриває весь Кудіапазон [20]. Як генератор широкосмугового сигналу, так і приймач дечірту, вбудовані в кремнієвий кристал на ізоляторі 1,45 мм × 2,5 мм. Отримано високоточне вимірювання дальності з роздільною здатністю 2,7 см і похибкою менше 2,75 мм. Також було реалізовано візуалізацію ISAR кількох цілей зі складними профілями. Незважаючи на це, ми повинні сказати, що продуктивність більшості інтегрованих мікрохвильових фотонних мікросхем не є задовільною для практичних радарних застосувань.

Розвиток у цій галузі наразі ще знаходиться в зародковому стані, і напрямком створення мікрох-

вильово-фотонних радарів на основі мікросхем є перспективним.

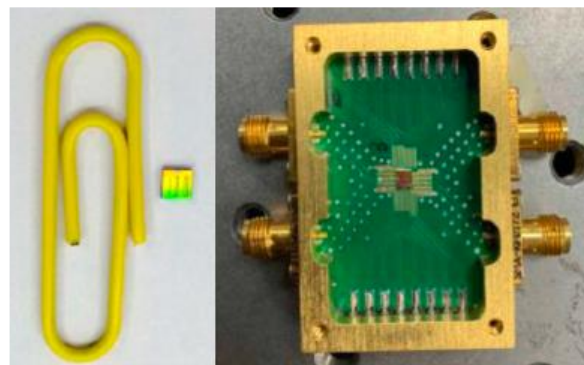


Рис. 5. Мікрохвильовий фотонний радар на основі мікросхеми

Оскільки монолітна інтеграція ключових мікрохвильових фотонних підсистем недостатньо зріла для практичного застосування, спільна упаковка або гібридна інтеграція пристроїв, виготовлених на їхніх оптимальних інтеграційних платформах, становить великий інтерес. На сучасному етапі фосфід індію, нітрид кремнію та кремній на ізоляторі є трьома провідними платформами для фотонної інтеграції [16].

Загалом, ці тенденції в архітектурі мікрохвильових фотонних радарів спрямовані на розширення можливостей радарів, покращення продуктивності системи та зменшення розміру, ваги та енергоспоживання радарних систем. Ці досягнення мають потенціал для революції в різних сферах застосування, включаючи оборону, безпеку, аерокосмічні та автономні системи [21-30].

#### Література

- [1] M. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. USA: McGraw-Hill, 2008.
- [2] S. Pan, and Y. Zhang, "Microwave photonics radars", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, is. 19, pp. 5450 - 5484, Oct.1, 1 2020.
- [3] S. Panda, et al., "Recent Advances and Future Directions of Microwave Photonic Radars: A Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 19, pp. 21144-21158, 1 Oct.1, 2021.
- [4] J. Yao, "Microwave Photonic Systems," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 20, pp. 6595-6607, 15 Oct.15, 2022
- [5] Kumar, R., Raghuwanshi, S.K. "Polarization controlled dispersion tunable optoelectronic oscillator and frequency octupling without bandpass filter", *Opt Quant Electron*, 55, 2023.
- [6] Q. Guo, et al., "Photonics-Based Broadband Radar With Coherent Receiving for High-Resolution Detection," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 35, no. 14, pp. 745-748, 15 July15, 2023.
- [7] Sharma, A., Malhotra, J., Khichar, S. *et al.* "Highly efficient frequency modulated continuous wave based photonic radar by incorporating electronic

- equalization scheme”, *Opt Quant Electron*, 55, 797, 2023.
- [8] J. Dong, and W. Li, "Photonics-enabled distributed MIMO radar for high-resolution 3D imaging," *Photon. Res.* 10, pp. 1679-1688, 2022.
- [9] H. Nie, et al., "Photonics-based integrated communication and radar system," in *2019 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*, Ottawa, Canada, 2019, pp. 1-4.
- [10] J. Shi, et al., "Photonics-Based Broadband Microwave Instantaneous Frequency Measurement by Frequency-to-Phase-Slope Mapping," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 2, pp. 544-552, Feb. 2019.
- [11] Xiao, Xuedi, et al. "Microwave photonic wideband distributed coherent aperture radar with high robustness to time synchronization error." *Journal of Lightwave Technology* 39.2, pp. 347-356, 2020.
- [12] Q. Sun, et al. "Scalable distributed microwave photonic MIMO radar based on a bidirectional ring network", *Optics Express*, 29. pp. 31508-31519, 2021.
- [13] C. Ma, et al. "Distributed Microwave Photonic MIMO Radar with Accurate Target Position Estimation." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 71.4, pp. 1711-1719, 2022.
- [14] T. Debatty, "Software defined RADAR a state of the art," *2010 2nd International Workshop on Cognitive Information Processing*, Elba, Italy, 2010, pp. 253-257.
- [15] M. Fogle. *Software defined radio (SDR) with applications in radar systems*. The University of Alabama in Huntsville, 2023.
- [16] D. Marpaung, J. Yao, and J. Capmany, "Integrated microwave photonics," *Nature Photon.*, vol. 13, no. 2, pp. 80-90, Feb. 2019.
- [17] V. Duarte, et al., "Modular and smooth introduction of photonics in high-throughput communication satellites-perspective of project BEACON," in *International Conf. on Space Optics -ICSO 2018*, Chania, Greece, 2018, pp. 1118079.
- [18] G. Hu, et al., "Optical Beamformer Based on Diffraction Order Multi-plexing (DOM) of an Arrayed Waveguide Grating," *J. Lightw. Technol.*, vol. 37, no. 13, pp. 2898-2904, Jul. 2019.
- [19] J. Tang, et al., "Integrated optoelectronic oscillator," *Opt. Express*, vol. 26, no. 9, pp. 12257-12265, Apr. 2018.
- [20] S. Pan, Z. Tang, M. Huang, and S. Li, "Reflective-Type microring resonator for on-chip reconfigurable microwave photonic systems," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 26, no. 5, pp. 1-12, Sept.-Oct. 2020
- [21] L. Zhuang, C. Roeloffzen, M. Hoekman, K. Boller, and A. Lowery, "Programmable photonic signal processor chip for radiofrequency applications," *Optica*, vol. 2, no. 5, pp. 854-859, Oct. 2015.
- [22] L. Rinaldi, et al., "Towards system-on-chip integration of photonic-based coherent distributed Synthetic Aperture Radar," *2023 IEEE Photonics Conference (IPC)*, Orlando, FL, USA, 2023, pp. 1-2.
- [23] M. Reza, et al. "Multi-Static Multi-Band Synthetic Aperture Radar (SAR) Constellation Based on Integrated Photonic Circuits". *Electronics*, 11(24):4151, 2022.
- [24] F. Scotti, et al., "In field demonstration of a Photonic Integrated Circuit for SAR Imaging," in *2023 24th International Radar Symposium (IRS)*, Berlin, Germany, 2023, pp. 1-7.
- [25] W. Ahmad, et al., "Design, Fabrication, and Characterization of a Hybrid Integrated Photonic Module for a Synthetic Aperture Radar Receiver," *J. Lightwave Technol.* 42, 760-770, 2024.
- [26] P. Ghelfi, et al., "Towards an Integrated Photonics-Based Radar," *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Bari, Italy, 2020, pp. 1-4.
- [27] T. Otto et al., "Microwave Photonics Beamformer for Spaceborne SAR," *EUSAR 2022; 14th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Leipzig, Germany, 2022, pp. 1-3.
- [28] F. Falconi et al., "A Combined Radar & Lidar System Based on Integrated Photonics in Silicon-on-Insulator," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 1, pp. 17-23, 1 Jan.1, 2021.
- [29] S. Melo, et al., "A Silicon Integrated Photonics-based Radar Operating in Multiple Bands," *2020 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*, Matsue, Japan, 2020, pp. 47-49.
- [30] A. Renga, A. Gigantino and M. D. Graziano, "Multiplatform Image Synthesis for Distributed Synthetic Aperture Radar in Long Baseline Bistatic Configurations," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 59, no. 6, pp. 9267-9284, Dec. 2023.

UDC 621.37, 535.8

**V. Avrutov, S. Rupich, V. Tsisarzh**

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine  
State Enterprise Scientific Research Institute of Radar Systems 'Kvant-Radiolokatsija', Kyiv, Ukraine*

#### TRENDS OF THE MICROWAVE PHOTONIC RADARS

Today, the world's leading countries are intensively working on the development of new generation radars - microwave photonic radars. Microwave photonic radars make it possible to significantly reduce the mass and size characteristics of radar stations, to increase the information capability and range of target detection due to the reduction of losses in long communication lines when using optical fiber, to ensure high immunity due to the significantly lower sensitivity of op-

tical-electronic equipment and fiber-optic lines of communication connection to external electromagnetic influences. Microwave photonics provides wide bandwidth, flat response, low loss transmission, multi-dimensional multiplexing, ultra-fast analog signal processing and immunity to electromagnetic interference.

Radar implementation in the optical domain can provide better resolution, coverage, and speed performance, which would be difficult to implement with traditional electronics. The review article examines the state of development and system architectures of such photonic radars as optoelectronic hybrid radars, all-optical radars, multifunctional microwave photonic radar systems, distributed microwave photonic radars, software-defined radars, and cognitive radars. New technologies in this field and possible future directions of research are discussed. As an example, a broadband microwave photon radar reproduced on the basis of a microcircuit is considered. The broadband signal generator and receiver are built into the silicon crystal on the insulator.

A high-precision distance measurement with a resolution of 2.7 cm and an error of less than 2.75 mm was obtained. Visualization of multiple targets with complex profiles has been implemented. But the performance of most integrated microwave photonic chips is not yet satisfactory for practical radar applications. Monolithic integration of key microwave photonic subsystems is also not mature enough for practical applications, so hybrid integration of devices fabricated on their optimal integration platforms is of practical interest.

At present, indium phosphide, silicon nitride and silicon on insulator are the three leading platforms for photonic integration.

**Keywords:** radar; microwave photonics; resolution; bandwidth.

*Надійшла до редакції  
18 березня 2024 року*

*Рецензовано  
17 квітня 2024 року*



© 2024 Copyright for this paper by its authors.  
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).