

СТРАТЕГІЇ РОЗВИТКУ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ ЗОНДУВАННЯ ТА ПЕРЕДАВАННЯ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

Досліджені радіолокаційні системи відіграють важливу роль у військовій сфері, забезпечуючи можливість виявлення об'єктів на великі відстані з меншою затримкою, ніж супутниковий зв'язок. Їхній великий радіус дії та здатність працювати в умовах обмеженої видимості або складних територіальних умов роблять їх незамінними для спостереження та контролю.

Результати досліджень вказують на можливість створення комбінованих радіолокаційно-комунікаційних систем, де радіолокаційні імпульси використовуються для передачі даних. Це може дозволити забезпечити інформаційний обмін в реальному часі на великі відстані з використанням тих самих радіолокаційних систем, які вже використовуються для виявлення та визначення положення об'єктів. Також визначена можливість використання адаптивних сигналів передачі від бортових радарів, встановлених на безпілотних літальних апаратах дозволяє одночасно виконувати завдання зондування навколишнього середовища та передачі даних для зв'язку, що підвищує ефективність та функціональність військових операцій.

Визначено, що комбіновані радіолокаційно-комунікаційні системи можуть бути дуже корисними в ситуаціях, коли необхідно забезпечити зв'язок між військовими частинами та одночасно виявляти та відстежувати потенційні загрози, де вони можуть бути ефективно використані на різних платформах, включаючи кораблі, літаки, бронетранспортери та наземне обладнання.

Ключові слова: радіолокаційно-комунікаційна система, мобільна мережа, радіолокаційний сигнал, БПЛА.

Abstract

The investigated radar systems play an important role in the military sphere, providing the ability to detect objects over long distances with less delay than satellite communications. Their long range and ability to operate in conditions of limited visibility or difficult territorial conditions make them indispensable for surveillance and control.

The research results indicate the possibility of creating combined radar and communication systems where radar pulses are used for data transmission. This may allow for real-time information exchange over long distances using the same radar systems that are already used to detect and determine the position of objects. The possibility of using adaptive transmission signals from on-board radars installed on unmanned aerial vehicles has also been determined to allow simultaneously performing environmental sensing and data transmission tasks for communication, which increases the efficiency and functionality of military operations.

It has been determined that combined radar and communication systems can be very useful in situations where it is necessary to provide communication between military units and simultaneously detect and track potential threats, where they can be effectively used on various platforms, including ships, aircraft, armored personnel carriers and ground equipment.

Keywords: radar and communication system, mobile network, radar signal, UAV.

Вступ

Актуальність інтегрованих систем передавання та зондування визначається декількома ключовими факторами. Інтегровані системи дозволяють оптимізувати використання радіочастотного спектру та апаратних ресурсів, що робить їх особливо привабливими для сучасних бездротових мереж та систем зв'язку. Інтегровані системи дозволяють поєднувати передавання даних та зондування в єдиному пристрої, що забезпечує більші можливості збільшення обсягу даних та різноманітних застосувань, таких як віддалене моніторинг, мережі Інтернету речей (IoT), безпека та навігація [1].

Інтеграція зондування та передавання даних дозволяє отримувати більш точні та надійні дані про

оточуюче середовище, що може бути критичним для застосувань у сфері безпеки, медицини, автомобільної промисловості та інших галузях. Інтегровані системи передавання та зондування відкривають нові можливості для розвитку нових застосувань, які комбінують в собі переваги обох функцій. Наприклад, використання таких систем у мобільних пристроях може дозволити виконувати навігацію та збір даних одночасно [2].

Отже, інтегровані системи передавання та зондування залишаються актуальними в сучасному технологічному середовищі, привертаючи увагу дослідників та розробників через свої переваги у забезпеченні ефективної та розширеної функціональності. Основні відмінності між традиційними комунікаційними і радіолокаційними сигналами полягають у їх призначенні та характеристиках [3].

Призначені для передачі інформації між відомими точками, такими як відправник і отримувач. Основна мета - передача даних або комунікація між користувачами. Використовуються для визначення місцезнаходження, віддаленості та інших характеристик об'єктів, що відбивають або реєструють ці сигнали. Основна мета - зондування оточуючого простору та виявлення об'єктів.

Комунікаційні сигнали мають високу інформаційну пропускну здатність та дозволяють передавати складні дані, такі як голос, відео або текст. Радіолокаційні сигнали мають високу потужність і короткий час тривалості, призначені для високоточного визначення відстані та місцезнаходження об'єктів.

Метою роботи є дослідження стратегій розвитку інтегрованих систем передавання та зондування для забезпечення можливості розробки та впровадження оптимальних підходів для поєднання передачі даних і зондування в єдиній телекомунікаційній системі. Вказані аспекти дослідження спрямовані на створення передових технологій, які дозволять використовувати інтегровані системи передавання та зондування для вирішення різноманітних завдань в сучасному світі.

Основна частина

Спочатку ми коротко обговоримо основні відмінності між традиційними комунікаційними і радіолокаційними сигналами, які є важливими для розуміння філософії проектування трьох категорій систем JCAS. Потім ми надамо короткий огляд останніх досягнень в кожній з категорій, посилаючись на класифікацію трьох категорій систем JCAS з точки зору їх технічної сфери застосування, як показано на рис. 1 [4].

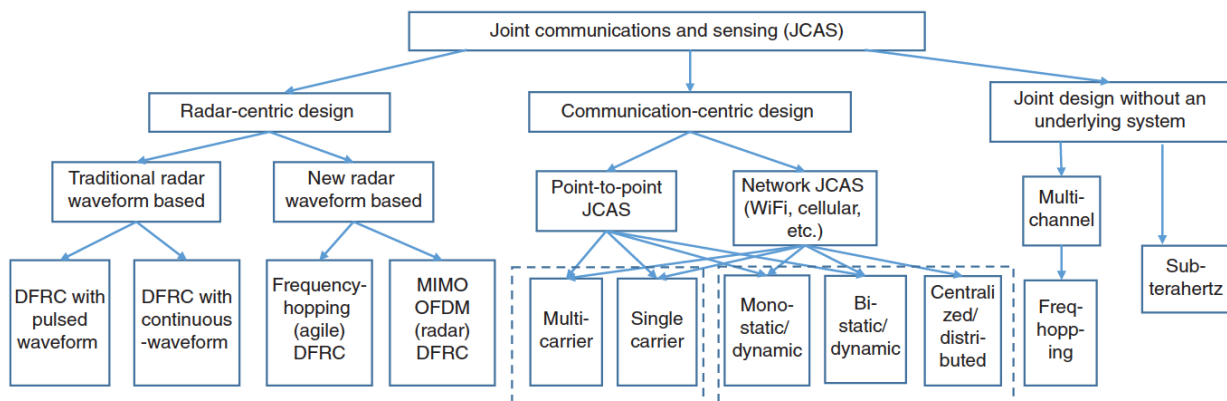


Рис. 1. Класифікація систем JCAS

Сигнали зв'язку і радіолокації спочатку призначені для різних цілей і, як правило, не можуть бути безпосередньо застосовані один до одного. Радіолокаційні сигнали, як правило, призначені для досягнення високої точності локалізації і відстеження, а також для простого оцінювання параметрів зондування. Бажаними властивостями радіолокаційних сигналів є: низьке відношення пікової до середньої потужності (PAPR) для забезпечення високоефективного підсилювача потужності і роботи на великих відстанях; і функція неоднозначності форми сигналу з крутими і вузькими основними пелюстками для високої роздільної здатності [5]. На протигагу цьому, комунікаційні сигнали розроблені для максимізації можливостей передачі інформації і, як правило, є модульованими та пакетними. Для підтримки різноманітних пристроїв і задоволення різних вимог до якості послуг, комунікаційні сиг-

нали можуть мати відповідну структуру, з розширеними модуляціями, що застосовуються в часовій, частотній і просторовій областях, і бути дискретними і фрагментованими в цих областях [6].

У системах JCR, орієнтованих на зв'язок, радіозондування інтегроване в існуючі системи зв'язку як другорядна функція. При цьому, може знадобитися перегляд і вдосконалення інфраструктури і систем зв'язку, але основні комунікаційні сигнали і протоколи в основному залишаються незмінними.

Дві фундаментальні проблеми інтеграції зондування в комунікації полягають у наступному: як реалізувати повнодуплексну роботу в моностатичному режимі, коли приймач і передавач зондування розташовані поруч, і як усунути вплив асинхронізації генератора в бістатичному або мультистатичному режимі, спричинений зазвичай несинхронізованим генератором між просторово розділеними передавачами і (зондувальними) приймачами. Повнодуплексний режим тут означає, що приймач і передавач працюють одночасно в одній і тій же смузі частот. У моночастотній РЛС повнодуплексного режиму роботи можна уникнути в імпульсній РЛС шляхом часового розділення часових інтервалів передачі і прийому, що призводить до появи "сліпих зон" у ближньому полі; у РЛС він реалізується шляхом використання сигналу, що передається, як вхідного сигналу для локального генератора для придушення сигналу витоку від передавача, що призводить до отримання на виході сигналу з малою кількістю інформації про сигнал, що передається [6]. Сучасні системи зв'язку переважно передають безперервну форму сигналу і мають немодульовані синусоїдальні сигнали на вході генератора.

Отже, обидва радіолокаційні методи не є практичними в системах зв'язку, якщо тільки в них не інтегровано спеціальне апаратне забезпечення приймача, подібне до FMCW-радарів. У довгостроковій перспективі повнодуплексні технології, які широко досліджуються для зв'язку, були б бажаним рішенням для моностатичного зондування. Проте ця технологія все ще значною мірою незріла для практичного застосування. Для бістатичних і мультистатичних радарів синхронізація генератора зазвичай реалізується за допомогою дротових з'єднань або прив'язки до сигналів GPS [7]. Ці методи придатні для деяких систем зв'язку, але їм не вистачає універсальності. За наявності тактової асинхронізації для її подолання також можна застосувати методи обробки сигналів, які розглянуті в [8].

З огляду на топологію мереж зв'язку, системи JCAS можна розділити на дві підкатегорії, а саме: ті, що реалізують зондування в системах зв'язку "точка-точка", зокрема, для застосування в автомобільних мережах, і ті, що реалізують зондування в таких мережах, як мобільні/стільникові мережі. Залежно від того, як просторово розподілені передавач і приймач зондування, з точки зору зондування, ці системи є аналогом традиційних моностатичних, бістатичних і мультистатичних радарів [9].

Здійснено багато досліджень про зондування в автомобільних мережах з використанням сигналів стандарту IEEE 802.11. В роботі [10] впроваджено функції активного радіолокаційного зондування в систему зв'язку з OFDM-сигналами для автомобільних застосувань.

Представлені функції радіолокаційного зондування включають алгоритми перетворення Фур'є, які оцінюють швидкість декількох відбиваючих об'єктів в системі JCAS на основі IEEE 802.11.p. У [11] функції автомобільного радіолокаційного зондування виконуються з використанням фізичного кадру з однією несучою (SC) стандарту IEEE 802.11ad в системі зв'язку між транспортними засобами (V2V) на міліметрових хвилях (mmWave) стандарту IEEE 802.11ad.

У [12] сигнали зв'язку OFDM, що відповідають стандартам IEEE 802.11a/g/p, використовуються для виконання функцій радара в автомобільних мережах. Зокрема, розроблено алгоритм оптимізації методом грубої сили на основі отриманої середньо-нормованої енергії каналів для оцінювання дальності дії РЛС. В роботі [13] показано обробку затримки та доплерівської інформації з OFDM-сигналом IEEE 802.11p в автомобільних мережах із застосуванням оцінки параметрів сигналу за допомогою методу обертальних інваріантних методів (ESPRIT).

З'являється все більше досліджень про застосування JCAS для сучасних мобільних мереж. В [4] повідомляється про деякі ранні роботи з використання OFDM-сигналів для зондування. В [6] вивчається оптимізація розріджених антенних решіток для систем MIMO JCAS.

В [9] досліджується проектування розрідженої передавальної решітки та синтез діаграми спрямованості для JCAS, де антени призначені для різних функцій.

Отже, стратегії розвитку у сфері мобільних мереж і систем зондування включає в себе дослідження різних форматів сигналів та їх використання в системах передавання та зондування. Наприклад, формати сигналів, такі як OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) та MIMO (Multiple Input Multiple Output), широко використовуються в мобільних мережах для підвищення швидкості передачі даних та покращення якості зв'язку.

Одним із важливих напрямків розвитку є інтеграція можливостей зв'язку і зондування у мобільних

мережах. Така інтеграція дозволяє створювати сприйнятливі мобільні мережі (PMN), які можуть одночасно виконувати функції передачі даних і зондування. Це дозволяє отримувати більш точні дані про навколишнє середовище та підвищує ефективність мережі в цілому. Додатково, дослідження розвитку зондування за допомогою сигналів Wi-Fi вказує на їхню ефективність, особливо внутрішніх приміщень. Оскільки сигнали Wi-Fi широко розповсюджені та доступні, їх можна використовувати для зондування навколишнього середовища. Проте, важливо враховувати відмінності між мобільними та Wi-Fi мережами з точки зору протоколів зв'язку та топології мережі, оскільки це може впливати на функції системи зондування JCAS [10]. Отже, дослідження та розвиток у цій сфері спрямовані на розробку та впровадження нових технологій, які забезпечують підвищену швидкість передачі даних, покращену якість зв'язку та точність зондування навколишнього середовища в мобільних мережах.

Висновки

Радіолокаційні системи відіграють важливу роль у військовій сфері, оскільки вони забезпечують можливість виявлення об'єктів на великій відстані з меншою затримкою порівняно з супутниковим зв'язком. Їхній великий радіус дії та здатність працювати в умовах обмеженої видимості чи в складних територіальних умовах роблять їх незамінними засобами спостереження та контролю. Однак, одним з обмежень радіолокаційних систем є обмежена швидкість передачі даних через характеристики радіолокаційних сигналів. Це робить їх менш ефективними для передачі великих обсягів інформації, яка може бути потрібна в сучасних військових операціях.

Результати дослідження вказують на можливість створення комбінованих радіолокаційно-комунікаційних систем, де радіолокаційні імпульси використовуються для передачі даних. Це може дозволити забезпечити інформаційну обмін у реальному часі на великі відстані з використанням тих самих радіолокаційних систем, які вже використовуються для виявлення та визначення положення об'єктів. Також вказується на можливість використання адаптивних сигналів передачі від бортових радарів, встановлених на безпілотних літальних апаратах. Це дозволяє одночасно виконувати завдання зондування навколишнього середовища та передачі даних для зв'язку, що підвищує ефективність та функціональність військових операцій.

Досліджені системи можуть бути дуже корисними в ситуаціях, коли важливо забезпечити зв'язок між військовими частинами та одночасно виявляти та відстежувати потенційні загрози. Вони можуть бути встановлені на різних платформах, включаючи кораблі, літаки, бронетранспортери та наземне обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. F. Liu, C. Masouros, A. P. Petropulu, H. Griffiths, and L. Hanzo. Joint radar and communication design: Applications, state-of-the-art, and the road ahead. *IEEE Transactions on Communications*, 68(6):3834–3862, 2020. doi: 10.1109/TCOMM.2020.2973976.
2. J. A. Zhang, Md. L. Rahman, K. Wu, X. Huang, Y. J. Guo, S. Chen, and J. Yuan. Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks—a survey. *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, 24(1):306–345, 2022. doi: 10.1109/COMST.2021.3122519.
3. Z. Feng, Z. Fang, Z. Wei, X. Chen, Z. Quan, and D. Ji. Joint radar and communication: A survey. *China Communications*, 17(1):1–27, 2020. doi: 10.23919/JCC.2020.01.001.
4. P. Kumari, S. A. Vorobyov, and R. W. Heath. Adaptive virtual waveform design for millimeter-wave joint communication-radar. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 68:715–730, 2020. doi: 10.1109/TSP.2019.2956689.
5. D. Ma, N. Shlezinger, T. Huang, Y. Liu, and Y. C. Eldar. Joint radar-communication strategies for autonomous vehicles: Combining two key automotive technologies. *IEEE Signal Processing Magazine*, 37(4):85–97, 2020. doi: 10.1109/MSP.2020.2983832.
6. N. C. Luong, X. Lu, D. T. Hoang, D. Niyato, and D. I. Kim. Radio resource management in joint radar and communication: A comprehensive survey. *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, 23(2):780–814, 2021. doi: 10.1109/COMST.2021.3070399.
7. M. L. Rahman, J. A. Zhang, X. Huang, Y. J. Guo, and R. W. Heath Jr. Framework for a perceptive mobile network using joint communication and radar sensing. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 56(3):1926–1941, 2020.
8. T. Huang, N. Shlezinger, X. Xu, Y. Liu, and Y. C. Eldar. MAJoRCom: A dual-function radar communication system using index modulation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 68:3423–3438, 2020. doi: 10.1109/TSP.2020.2994394.
9. K. Wu, J. A. Zhang, X. Huang, Y. Jay Guo, and R. W. Heath. Waveform design and accurate channel estimation for frequency-hopping MIMO radar-based communications. *IEEE Transactions on Communications*, 1, 2020. doi: 10.1109/TCOMM.2020.3034357.
10. S. D. Tusha, A. Tusha, E. Basar, and H. Arslan. Multidimensional index modulation for 5G and beyond wireless networks. *Proceedings of the IEEE*, 109(2):170–199, 2021. doi: 10.1109/JPROC.2020.3040589.
11. A. M. Elbir, K. V. Mishra, and S. Chatzinotas. Terahertz-band joint ultra-massive MIMO radar-communications: Model-based and model-free hybrid beamforming, 2021. arXiv: 2103.00328.

12. J. Wei, J. Li, Z. Cao, Q. Chen, C. Song, and Z. Xu. A passive radar prototype based on multi-channel joint detection and its test results. In 2020 IEEE 11th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), pages 1–5, 2020. doi: 10.1109/SAM48682.2020.9104263.

13. J. A. Zhang, Md. L. Rahman, K. Wu, X. Huang, Y. J. Guo, S. Chen, and J. Yuan. Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks -a survey. IEEE Communication Surveys and Tutorials, 1, 2021. doi: 10.1109/COMST.2021.3122519.

Васильківський Микола Володимирович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Прикмета Андрій Володимирович — аспірант групи 172-22а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: botan.mua@gmail.com

Олійник Андрій Олегович — аспірант групи 172-22а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: w0lfend00@gmail.com

Грицаюк Дмитро Юрійович — студент групи ТКС-22м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Vasykivskyi Mykola V. — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Prykmeta Andrii V. — graduate student of group 172-22a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: botan.mua@gmail.com

Oliinyk Andrii O. — graduate student of group 172-22a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: w0lfend00@gmail.com

Hrytsaiuk Dmytro Y. - student of group TCS-22m, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com