

ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ТА ЗОНДУВАННЯ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

Досліджено особливості розвитку універсальних систем радіозондування, які можуть використовувати широкий спектр радіосигналів для отримання інформації про навколишнє середовище. Це дає можливість використовувати не лише спеціально розроблені радіолокаційні сигнали, але й інші радіосигнали, які вже присутні в оточуючому середовищі, такі як телевізійні, Wi-Fi або мобільні сигнали. Розглянута інтеграція зв'язку і зондування в одну систему JCAS має потенціал забезпечити ефективне використання ресурсів та подолання обмежень у пасивному зондуванні. Це може відкрити нові можливості для розробки більш ефективних та універсальних систем радіозондування. Результати дослідження систем радіозондування та їх різноманітного застосування відображають тенденцію до пошуку інноваційних підходів у бездротових технологіях, що може мати значний вплив на розвиток різних сфер, включаючи технології зв'язку, безпеки та моніторингу.

Здійснена класифікація сучасних систем JCAS на основі пріоритетів проектування і форматів сигналів надає цінний огляд різних підходів до інтеграції зв'язку і зондування. Ці класифікації допомагають уявити різні підходи до проектування систем JCAS залежно від їх використання та функціональних вимог.

Ключові слова: радіозондування, мобільний сигнал, бездротова технологія, радіозв'язок.

Abstract

The article investigates the peculiarities of the development of universal radio sensing systems that can use a wide range of radio signals to obtain information about the environment. This makes it possible to use not only specially designed radar signals, but also other radio signals that are already present in the environment, such as television, Wi-Fi, or mobile signals. The considered integration of communication and sensing into one JCAS system has the potential to ensure efficient use of resources and overcome the limitations of passive sensing. This may open up new opportunities for the development of more efficient and versatile radio sensing systems. The results of the study of radio sensing systems and their various applications reflect the tendency to search for innovative approaches in wireless technologies, which can have a significant impact on the development of various fields, including communication, security and monitoring technologies.

The classification of modern JCAS systems based on design priorities and signal formats provides a valuable overview of different approaches to integrating communication and sensing. These classifications help to present different approaches to the design of JCAS systems depending on their use and functional requirements.

Keywords: radio sensing, mobile signal, wireless technology, radio communication.

Вступ

Бездротовий зв'язок і радіолокаційне зондування розвивалися паралельно протягом десятиліть. Розроблено численні нові системні архітектури та алгоритми, які отримали назву систем бездротового зв'язку нового покоління та сучасної радіолокації, відповідно. Однак, незважаючи на те, що вони мають багато спільного з точки зору алгоритмів обробки сигналів, пристроїв і, до певної міри, системної архітектури, існує дуже мало взаємозв'язку між розробками і розгортанням цих двох систем. Останнім часом ми спостерігаємо стрімке зростання інтересу до співіснування, співпраці і, що найважливіше, спільного проектування цих двох систем, що мотивується, головним чином, розподілом спектру і витрат, а також економією енергії [1-5].

Співіснування систем зв'язку і радіолокації не є чимось новим, і це питання інтенсивно вивчалось протягом останнього десятиліття. Основна увага була зосереджена на розробці ефективних методів управління завадами для того, щоб дві окремо розгорнуті системи могли працювати одночасно, не

створюючи перешкод одна одній [6]. У цьому випадку радіолокаційна система і система зв'язку можуть бути суміщеними або просторово розділеними, і вони можуть передавати два різні сигнали, що перекриваються в часі і/або частотній області. Вони можуть працювати одночасно, спільно використовуючи одні й ті ж ресурси з метою мінімізації перешкод одна одній. Багато зусиль було докладено для взаємного придушення інтерференції в цьому випадку, використовуючи, наприклад, технологію формування променя, кооперативне використання спектра, багатократне використання спектра і динамічне співіснування [7].

Однак ефективне придушення завад зазвичай має жорсткі вимоги до мобільності вузлів і обміну інформацією між ними. Таким чином, покращення спектральної ефективності в таких схемах є обмеженим.

Метою роботи є дослідження інтегрованих систем радіозв'язку та зондування для визначення можливостей та переваг такого поєднання для покращення ефективності та функціональності радіолокаційних та зв'язкових систем, які можуть забезпечити високу ефективність, надійність та функціональність у різноманітних сценаріях використання.

Основна частина

Оскільки завади в системах, що співіснують, спричиняються передачею двох сигналів з різною частотою, природно визначити, чи можна використовувати один сигнал, що передається, як для зв'язку, так і для радіолокаційного зондування. Радіолокаційні системи зазвичай використовують спеціально розроблені форми сигналів, такі як короткі імпульси і чіпування, які забезпечують високу потужність випромінювання і просту обробку приймачем. Однак ці форми хвиль не обов'язково потрібні для радіолокаційного зондування. Пасивна радіолокація або пасивне зондування є гарним прикладом дослідження різноманітних радіосигналів для зондування [7, 8]. В принципі, об'єкти, що підлягають зондуванню або виявленню, можуть бути підсвітлені будь-якими радіосигналами достатньої потужності, такими як телевізійні сигнали, сигнали Wi-Fi та мобільні (стільникові) сигнали. Це пов'язано з тим, що на поширення радіосигналів завжди впливають статичні та динамічні фактори навколишнього середовища, такі як рух трансивера, рух і зміна профілю навколишніх об'єктів і навіть погодні зміни [9]. Таким чином, інформація про навколишнє середовище міститься в отриманих радіосигналах і може бути вилучена за допомогою пасивних радіолокаційних методів. Однак у пасивного зондування є два основних обмеження. По-перше, при пасивному зондуванні фази синхронізації між передавачем і приймачем не синхронізовані, і завжди існують невідомі і, можливо, мінливі в часі часові, частотні і фазові зсуви між переданими і прийнятими сигналами. Це призводить до неоднозначності результатів зондування в часі, а отже, і в діапазоні, а також створює труднощі в об'єднанні декількох вимірювань для спільної обробки. По-друге, приймач зондування може не знати структуру сигналу. Як наслідок, пасивне зондування не має можливості придушення завад і не може розділити багатокористувацькі сигнали від різних передавачів. Слід визнати, що радіосигнали зазвичай ніяк не оптимізовані для зондування [10].

Остання тенденція полягає в тому, що радіолокаційні системи еволюціонують у бік більш загального радіозондування. Ми надаємо перевагу терміну "радіозондування" перед терміном "радар" через його загальність і всеосяжність. Під радіозондуванням тут мається на увазі отримання інформації з отриманих радіосигналів; це на відміну від вилучення інформації з комунікаційних даних, модульованих в сигнал на передавачі. Це може бути досягнуто шляхом вимірювання параметрів зондування, пов'язаних з місцезнаходженням і рухом, таких як часова затримка, кут прибуття (AoA), кут відправлення (AoD), частота Доплера і величина багатопроменевих сигналів, а також параметрів фізичних характеристик [11]. У даному дослідженні два відповідні види обробки називаються оцінюванням параметрів зондування і розпізнаванням образів. У цьому сенсі радіозондування відноситься більше до загальних методів зондування і застосувань з використанням радіосигналів, так само, як відеозондування з використанням відеосигналів.

Радіозондування має широкий спектр застосувань, таких як розпізнавання об'єктів, активності та подій в мережах Інтернету речей (IoT), Wi-Fi і 5G. Ці радіосигнали передаються існуючою інфраструктурою і не є спеціально розробленими для цілей зондування. Дослідження численних застосувань Wi-Fi зондування показали, що сигнали Wi-Fi використовувалися для розпізнавання людей і поведінки в приміщеннях. Разом з тим радіосигнали, такі як радіочастотна ідентифікація (RFID) і ZigBee, також можуть бути використані для розпізнавання активності. Такі дослідження демонстру-

ють потужний потенціал використання низькочастотних сигналів зв'язку для радіозондування [12].

Спільний зв'язок і радіолокаційне/радіотехнічне зондування (JCAS) [13] стає привабливим рішенням для інтеграції зв'язку і зондування в одну систему. Вона також відома під іншими термінами, такими як радіолокаційний зв'язок (RadCom) [1], спільний радіолокаційний зв'язок (JRC) [2-4], спільний зв'язок і радіолокація (JCR) [5], двофункціональний радіолокаційний зв'язок (DFRC) [6, 7], а останнім часом - інтегроване зондування і зв'язок (ISAC). В системі JCAS єдиний сигнал, що передається для зв'язку і зондування, розробляється і використовується спільно. Мета JCAS полягає в тому, щоб більшість передавальних модулів можна було використовувати спільно для зв'язку і зондування. У такій системі більшість апаратного забезпечення приймача також може бути спільною, але деякі функції обробки сигналу базової смуги приймача будуть відрізнятися для зв'язку і зондування.

Завдяки спільній конструкції, система JCAS також потенційно може подолати багато обмежень у пасивному зондуванні. Ці властивості роблять технологію JCAS значно відмінною від існуючих концепцій спільного використання спектру, таких як когнітивне радіо, вищезгадані співіснуючі комунікаційно-радарні системи і "інтегровані" системи, що використовують розділені форми сигналів [8], де сигнали зв'язку і зондування розділені за такими ресурсами, як час, частота і код, незважаючи на те, що ці дві функції можуть бути фізично об'єднані в одній системі.

Залежно від пріоритету проектування і форматів сигналів, що лежать в основі, сучасні системи JCAS можна класифікувати на три категорії [9]. Функціонал системи, орієнтований на зв'язок: У цьому класі радіозондування є доповненням до системи зв'язку, де пріоритетом проектування є зв'язок. Метою такого проектування є використання форми сигналу зв'язку для вилучення сенсорної інформації через ехосигнали цілей. Для підтримки радіозондування необхідне вдосконалення апаратного забезпечення та алгоритмів. Можливі вдосконалення стандартів зв'язку можуть бути впроваджені для кращого повторного використання форми сигналу зв'язку для радіозондування. У такій реалізації телекомунікаційної системи продуктивність зв'язку може бути практично не порушена, але продуктивність зондування може залежати від сценарію і бути важко оптимізованою. Функціонал системи, орієнтований на радар: І навпаки, такі підходи спрямовані на модуляцію або введення інформаційного сигналу у відомі форми радіолокаційних сигналів. Оскільки радіолокаційний сигнал залишається в основному незмінним, можна досягти майже оптимальних характеристик радара. Основним недоліком таких підходів є обмеженість досяжних швидкостей передачі даних. Якщо радіолокаційна система може змиритися з деякою втратою продуктивності, то можна отримати кращу швидкість передачі даних. Враховуючи високу потужність передачі типових радіолокаційних систем, загалом можна досягти дуже великої дальності зв'язку.

Спільне проектування і оптимізація: Цей варіант функціоналу охоплює системи, які з самого початку розробляються спільно, щоб запропонувати компроміс між продуктивністю зв'язку і зондування, що налаштовується. Такі системи можуть не обмежуватися жодним з існуючих стандартів зв'язку або радіолокації і можуть бути оптимізовані шляхом спільного і справедливого розгляду вимог як до зв'язку, так і до зондування [10].

Через значні відмінності між традиційними системами зв'язку і зондування, проблеми проектування в цих трьох категоріях досить сильно відрізняються. У перших двох категоріях проектування і дослідження, як правило, зосереджені на тому, як реалізувати іншу функцію на основі форматів сигналів первинної системи, з принципом не впливати суттєво на первинну систему, хоча незначні модифікації і оптимізації можуть бути застосовані до системи і сигналів. Остання категорія розглядає проектування та оптимізацію форми сигналу, системної та мережевої архітектури, без упередження до зв'язку або зондування, з метою виконання лише бажаних застосувань.

Висновки

Досліджено інтеграцію зв'язку в радіолокаційні системи з новими формами радіолокаційних сигналів, такими як радіолокатор MIMO-OFDM і радіолокатор з частотною маневреністю. Ці формати сигналів близькі до сучасних систем зв'язку і, отже, потенційно краще інтегруються для передачі інформації. Індексна модуляція є одним із методів вбудовування комунікаційної інформації у форму радарного сигналу. Цей метод вбудовує інформацію у різні комбінації або перестановки параметрів сигналу в просторі, часі, частоті і кодовій області. Одним з прикладів є використання індексів піднесених і передавальних антен для передачі інформації. Основною перевагою використання індексної модуляції в радіолокаційних системах JCAS є те, що вона не змінює основну форму сигналу і струк-

туру сигналу, а також має незначний вплив на роботу радару.

Побудова інтегрованих систем радіозв'язку та зондування вимагає використання різноманітних технологій з обох цих областей, а також їхньої інтеграції. Ці технології можуть бути використані окремо або у поєднанні для створення ефективних інтегрованих систем радіозв'язку та зондування, які відповідають потребам конкретного застосування.

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: wolfend00@gmail.com

Грabcак Назарій Віталійович — аспірант групи 172-23а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: nazarii.hrabchak@gmail.com

Vasylkivskyi 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

Prkmeta 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: wolfend00@gmail.com

Hrabchak Nazarii V. - graduate student of group 172-23a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: nazarii.hrabchak@gmail.com