

УДК 621.396.96

РАДИОЛОКАЦИОННОЕ НАБЛЮДЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ (ОБЗОР)

В. П. РЯБУХА

*Научно-исследовательский институт радиолокационных систем «Квант-Радиолокация»,
Украина, Киев, 03150, ул. Деловая, 5*

Аннотация. Радиолокационное наблюдение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) — активно развивающаяся область научных исследований. В статье проводится обзор и анализ публикаций последних лет, посвященных описанию методов и систем радиолокационного обнаружения и распознавания классов и типов БПЛА. Отмечается, что наиболее сложными целями для радиолокационного обнаружения являются малоразмерные, малоскоростные малые БПЛА (дроны), летящие на малых и предельно малых высотах. Если большие и средние БПЛА могут обнаруживаться современными радиолокационными средствами, то для обнаружения малых БПЛА целесообразно создавать специализированные высокоэффективные, высокоподвижные, переносные недорогие активные РЛС обнаружения БПЛА. Определены технические требования к таким радиолокаторам и приведены рекомендации по их выполнению. Для защиты РЛС обнаружения БПЛА от активных шумовых и пассивных помех предлагаются высокоэффективные системы защиты на основе адаптивных решетчатых фильтров. Показано, что проведенные исследования по методам распознавания классов и типов БПЛА являются развитием существующей теории и техники радиолокационного распознавания воздушных целей.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; РЛС обнаружения БПЛА; технические требования; активная шумовая помеха; пассивная помеха; признаки распознавания; роторная модуляция

1. ВВЕДЕНИЕ

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) приобрели значительное распространение и применение во многих областях человеческой деятельности. Они выполняют много различных полезных функций, но при этом могут нести также значительную физическую или информационную угрозу в военной области, хозяйственной деятельности, частной жизни людей.

В мире наблюдается запрос на высокоэффективные средства обнаружения и классификации беспилотных летательных аппаратов, обусловленный следующим. Специфические качества комплексов БПЛА определяют их роль как высококомобильного и боеготового

компонента вооруженных сил, способного в короткий срок не только собирать достоверную разведывательную информацию о противнике на большой территории и на большой глубине, но и передавать целеуказания для высокоточного оружия, наносить удары по наиболее важным объектам противника, действовать гибко в условиях интенсивного противодействия противовоздушной обороны (ПВО).

Эти качества обеспечивают возрастание роли комплексов БПЛА, которые активно применяются почти во всех вооруженных конфликтах последнего времени и уже сейчас могут существенным образом повлиять на формы и методы войны. Эффективность их применения в 2020 году наглядно показала Турция в

DOI: [10.20535/S0021347020110011](https://doi.org/10.20535/S0021347020110011)
© В. П. Рябуха, 2020

REFERENCES

1. С. Д. Вишневський, Л. В. Бейліс, В. Й. Климченко, "Потенційні можливості РЛС РТВ з виявлення оперативного-тактичних та тактичних безпілотних літальних апаратів," *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, no. 2(27), pp. 92–98, 2017, doi: [10.30748/nitps.2017.27.18](https://doi.org/10.30748/nitps.2017.27.18).
2. Г. В. Еремін, А. Д. Гаврилов, И. И. Назарчук, "Малоразмерные беспилотники — новая проблема для ПВО," *Армейский вестник*, 2015, uri: <https://army-news.org/2015/02/malorazmernye-bespilotniki-no-va-ya-problema-dlya-pvo/>.
3. С. И. Макаренко, А. В. Тимошенко, А. С. Васильченко, "Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения," *Системы управления, связи и безопасности*, no. 1, pp. 109–146, 2020, doi: [10.24411/2410-9916-2020-10105](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10105).
4. А. Е. Ананенков, Д. В. Марин, В. М. Нуждин, В. В. Расторгуев, П. В. Соколов, "К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов," *Труды МАИ*, no. 91, pp. 1–18, 2016, uri: http://www.trudy.mai.ru/upload/iblock/592/ananenkov_marin_n_uzhdin_rastorguev_sokolov_rus.pdf.
5. A. Laucays *et al.*, "Investigation of detection possibility of UAVS using low cost marine radar," *Aviation*, vol. 23, no. 2, pp. 48–53, 2019, doi: [10.3846/aviation.2019.10320](https://doi.org/10.3846/aviation.2019.10320).
6. B. Taha, A. Shoufan, "Machine learning-based drone detection and classification: state-of-the-art in research," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 138669–138682, 2019, doi: [10.1109/ACCESS.2019.2942944](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2942944).
7. C. Clemente, A. Balleri, K. Woodbridge, J. J. Soraghan, "Developments in target micro-Doppler signatures analysis: radar imaging, ultrasound and through-the-wall radar," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2013, no. 1, p. 47, 2013, doi: [10.1186/1687-6180-2013-47](https://doi.org/10.1186/1687-6180-2013-47).
8. J. S. Patel, F. Fioranelli, D. Anderson, "Review of radar classification and RCS characterisation techniques for small UAVS or drones," *IET Radar, Sonar Navig.*, vol. 12, no. 9, pp. 911–919, 2018, doi: [10.1049/iet-rsn.2018.0020](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2018.0020).
9. S. A. Musa *et al.*, "A review of copter drone detection using radar systems," *Def. S&T Tech. Bull.*, vol. 12, no. 1, pp. 16–38, 2019, uri: <http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/80464/>.
10. А. И. Годунов, С. В. Шишков, Н. К. Юрков, "Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами," *Надежность и качество сложных систем*, no. 2, pp. 62–69, 2014, uri: <https://nikas.pnzgu.ru/page/20187>.
11. Г. В. Еремін, А. Д. Гаврилов, И. И. Назарчук, "Организация системы борьбы с малоразмерными БПЛА," *Арсенал Отечества*, no. 6, 2014, uri: <https://arsenal-otechestva.ru/article/389-antidrone>.
12. Е. Д. Филин, Р. В. Киричек, "Методы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе анализа электромагнитного спектра," *Информационные технологии и телекоммуникации*, vol. 6, no. 2, pp. 87–93, 2018, uri: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35269062>.
13. M. Jahangir, C. Baker, "Persistence surveillance of difficult to detect micro-drones with L-band 3-D holographic radar," in *2016 CIE International Conference on Radar (RADAR)*, 2016, pp. 1–5, doi: [10.1109/RADAR.2016.8059282](https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.8059282).
14. W. Zhang, C. Tong, Q. Zhang, Y. Zhang, X. Zhang, "Extraction of vibrating features with dual-channel fixed-receiver bistatic SAR," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 9, no. 3, pp. 507–511, 2012, doi: [10.1109/LGRS.2011.2172974](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2172974).
15. K. Kim, M. Uney, B. Mulgrew, "Estimation of drone micro-doppler signatures via track-before-detect in array radars," in *2019 International Radar Conference (RADAR)*, 2019, pp. 1–6, doi: [10.1109/RADAR41533.2019.171375](https://doi.org/10.1109/RADAR41533.2019.171375).
16. В. П. Рябуха, В. В. Цисарж, Е. А. Катюшин, В. И. Зарицкий, "Оценка потенциальной эффективности межпериодной обработки когерентной пачки радиоимпульсов на фоне пассивных помех в импульсно-доплеровских РЛС со средней частотой зондирования," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, vol. 61, no. 12, pp. 667–687, 2018, doi: [10.20535/S0021347018120014](https://doi.org/10.20535/S0021347018120014).
17. J. Farlik, M. Kratky, J. Casar, V. Stary, "Multispectral detection of commercial unmanned aerial vehicles," *Sensors*, vol. 19, no. 7, p. 1517, 2019, doi: [10.3390/s19071517](https://doi.org/10.3390/s19071517).
18. R. L. Sturdivant, E. K. P. Chong, "Systems engineering baseline concept of a multispectral drone detection solution for airports," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 7123–7138, 2017, doi: [10.1109/ACCESS.2017.2697979](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2697979).
19. G. J. Mendis, T. Randeny, J. Wei, A. Madanayake, "Deep learning based Doppler radar for micro UAS detection and classification," in *MILCOM 2016 - 2016 IEEE Military Communications Conference*, 2016, pp. 924–929, doi: [10.1109/MILCOM.2016.7795448](https://doi.org/10.1109/MILCOM.2016.7795448).
20. M. Jian, Z. Lu, V. C. Chen, "Drone detection and tracking based on phase-interferometric Doppler radar," in *2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18)*, 2018, pp. 1146–1149, doi: [10.1109/RADAR.2018.8378723](https://doi.org/10.1109/RADAR.2018.8378723).
21. G. Galati *et al.*, "Visibility trials of unmanned aerial vehicles (drones) by commercial X-band radar in sub-urban environment," in *2017 AEIT International Annual Conference*, 2017, pp. 1–6, doi: [10.23919/AEIT.2017.8240554](https://doi.org/10.23919/AEIT.2017.8240554).
22. J. Ochodnický, Z. Matousek, M. Babjak, J. Kurty, "Drone detection by Ku-band battlefield radar," in *2017 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, 2017, pp. 613–616, doi: [10.1109/MILTECHS.2017.7988830](https://doi.org/10.1109/MILTECHS.2017.7988830).
23. W. Zhang, G. Li, "Detection of multiple micro-drones via cadence velocity diagram analysis," *Electron. Lett.*, vol. 54, no. 7, pp. 441–443, 2018, doi: [10.1049/el.2017.4317](https://doi.org/10.1049/el.2017.4317).
24. P. Zhang, L. Yang, G. Chen, G. Li, "Classification of drones based on micro-doppler signatures with dual-band radar sensors," in *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS-FALL)*, 2017, pp. 638–643, doi: [10.1109/PIERS-FALL.2017.8293214](https://doi.org/10.1109/PIERS-FALL.2017.8293214).
25. C. J. Li, H. Ling, "An investigation on the radar signatures of small consumer drones," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 649–652, 2017, doi: [10.1109/LAWP.2016.2594766](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2594766).
26. L. Fuhrmann, O. Biallawons, J. Klare, R. Panhuber, R. Klenke, J. Ender, "Micro-Doppler analysis and classification of UAVS at Ka band," in *2017 18th International Radar Symposium (IRS)*, 2017, pp. 1–9, doi: [10.23919/IRS.2017.8008142](https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008142).
27. J. Drozdowicz *et al.*, "35 GHz FMCW drone detection system," in *2016 17th International Radar Symposium (IRS)*, 2016, pp. 1–4, doi: [10.1109/IRS.2016.7497351](https://doi.org/10.1109/IRS.2016.7497351).
28. V. Semkin *et al.*, "Analyzing radar cross section signatures of diverse drone models at mmwave frequencies," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 48958–48969, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.2979339](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979339).
29. S. Dogru, L. Marques, "Pursuing drones with drones using millimeter wave radar," *IEEE Robot. Autom. Lett.*,

- vol. 5, no. 3, pp. 4156–4163, 2020, doi: [10.1109/LRA.2020.2990605](https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2990605).
30. P. Hugler, M. Geiger, C. Waldschmidt, “77 GHz radar-based altimeter for unmanned aerial vehicles,” in *2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, 2018, pp. 129–132, doi: [10.1109/RWS.2018.8304965](https://doi.org/10.1109/RWS.2018.8304965).
31. A. D. de Quevedo, F. I. Urzaiz, J. G. Menoyo, A. A. Lopez, “Drone detection and radar-cross-section measurements by rad-dar,” *IET Radar, Sonar Navig.*, vol. 13, no. 9, pp. 1437–1447, 2019, doi: [10.1049/iet-rsn.2018.5646](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2018.5646).
32. Д. И. Леховицкий, Д. С. Рачков, А. В. Семеняка, В. П. Рябуха, Д. В. Атаманский, “Адаптивные решетчатые фильтры. Часть I. теория решетчатых структур,” *Прикладная радиоэлектроника*, vol. 10, no. 4, pp. 381–406, 2011, uri: <https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/4699/1/380-404.pdf>.
33. Д. И. Леховицкий, “Адаптивные решетчатые фильтры для систем пространственно-временной обработки нестационарных гауссовых процессов,” *Известия вузов. Радиоэлектроника*, vol. 61, no. 11, pp. 607–644, 2018, doi: [10.20535/S0021347018110018](https://doi.org/10.20535/S0021347018110018).
34. Д. И. Леховицкий, В. П. Рябуха, Г. А. Жуга, В. Н. Лаврентьев, “Экспериментальные исследования систем сдв на основе АРФ в импульсных РЛС с попачечной вобуляцией периодов зондирования,” *Прикладная радиоэлектроника*, vol. 7, no. 1, pp. 11–24, 2008, uri: https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/6228/1/MRF_T_1_Ch1_2008-rus-105-108.pdf.
35. В. П. Рябуха, А. В. Семеняка, Е. А. Катюшин, В. І. Зарицький, О. О. Головін, “Цифрова адаптивна система захисту радіолокаторів від маскувальних пасивних завод на основі адаптивного решітчастого фільтра,” *Озброєна та військова техніка*, no. 12, pp. 32–40, 2019, doi: [10.34169/2414-0651.2019.3\(23\).32-40](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.3(23).32-40).
36. C. E. Muehe, M. Labitt, “Displaced-phase-center antenna technique,” *Lincoln Lab. J.*, vol. 12, no. 2, pp. 281–296, 2000, uri: https://archive.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol12_no2/12_2displaced.pdf.
37. В. П. Рябуха, “Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. 2. Квазиньютоновские корреляционные автокомпенсаторы. Адаптивные решетчатые фильтры,” *Прикладная радиоэлектроника*, vol. 15, no. 2, pp. 88–99, 2016, uri: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/12114>.
38. Д. И. Леховицкий, В. П. Рябуха, А. В. Семеняка, Е. А. Катюшин, В. Н. Гриценко, “Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. 5. Опытный образец системы помехозащиты,” *Прикладная радиоэлектроника*, vol. 16, no. 3, 4, pp. 95–102, 2017.
39. D. I. Likhovyt'skiy, Y. S. Shifrin, “Statistical analysis of ‘superresolving’ methods for direction-of-arrival estimation of noise radiation sources under finite size of training sample,” *Signal Process.*, vol. 93, no. 12, pp. 3382–3399, 2013, doi: [10.1016/j.sigpro.2013.03.008](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.03.008).
40. D. I. Likhovyt'skiy, D. V. Atamanskiy, V. P. Riabukha, D. S. Rachkov, A. V. Semeniaka, “Combining target detection against the background of jamming signals and jamming signal DOA estimation,” in *2015 Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*, 2015, pp. 1–5, doi: [10.1109/ICATT.2015.7136777](https://doi.org/10.1109/ICATT.2015.7136777).
41. В.-К. Kim *et al.*, “Drone detection with chirp-pulse radar based on target fluctuation models,” *ETRI J.*, vol. 40, no. 2, pp. 188–196, 2018, doi: [10.4218/etrij.2017-0090](https://doi.org/10.4218/etrij.2017-0090).
42. A. Herschfelt *et al.*, “Consumer-grade drone radar cross-section and micro-Doppler phenomenology,” in *2017 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, 2017, pp. 0981–0985, doi: [10.1109/RADAR.2017.7944346](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944346).
43. A. B. Blyakhman, V. N. Burov, A. V. Myakinkov, A. G. Ryndyk, “Detection of unmanned aerial vehicles via multi-static forward scattering radar with airborne transmit positions,” in *2014 Int. Radar Conf.*, 2014, pp. 1–5, doi: [10.1109/RADAR.2014.7060334](https://doi.org/10.1109/RADAR.2014.7060334).
44. H. D. Griffiths, N. R. W. Long, “Television-based bistatic radar,” *IEE Proc. F Commun. Radar Signal Process.*, vol. 133, no. 7, p. 649, 1986, doi: [10.1049/ip-f-1.1986.0104](https://doi.org/10.1049/ip-f-1.1986.0104).
45. А. П. Кондратенко, “Роль и место неградиционной радиолокации в системе контроля воздушного пространства,” *Збірник наукових праць ХВУ*, no. 1, pp. 87–90, 2002.
46. А. П. Кондратенко, П. А. Коваленко, И. С. Добрынин, “Принципы и варианты построения радиолокационной системы с использованием излучения мобильной связи,” *Системи обробки інформації*, no. 4, pp. 71–78, 2006, uri: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/5093>.
47. Y. Liu, X. Wan, H. Tang, J. Yi, Y. Cheng, X. Zhang, “Digital television based passive bistatic radar system for drone detection,” in *2017 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, 2017, pp. 1493–1497, doi: [10.1109/RADAR.2017.7944443](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944443).
48. B. Knoedler, R. Zemmari, W. Koch, “On the detection of small UAV using a GSM passive coherent location system,” in *2016 17th International Radar Symposium (IRS)*, 2016, pp. 1–4, doi: [10.1109/IRS.2016.7497375](https://doi.org/10.1109/IRS.2016.7497375).
49. A. D. Chadwick, “Micro-drone detection using software-defined 3G passive radar,” in *International Conference on Radar Systems (Radar 2017)*, 2017, doi: [10.1049/cp.2017.0419](https://doi.org/10.1049/cp.2017.0419).
50. D. Solomitchkii, M. Gapeyenko, V. Semkin, S. Andreev, Y. Koucheryavy, “Technologies for efficient amateur drone detection in 5G millimeter-wave cellular infrastructure,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 1, pp. 43–50, 2018, doi: [10.1109/MCOM.2017.1700450](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700450).
51. X. Yang, K. Huo, W. Jiang, J. Zhao, Z. Qiu, “A passive radar system for detecting UAV based on the ofdm communication signal,” in *2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, 2016, pp. 2757–2762, doi: [10.1109/PIERS.2016.7735118](https://doi.org/10.1109/PIERS.2016.7735118).
52. E. Vinogradov, D. A. Kovalev, S. Pollin, “Simulation and detection performance evaluation of a UAV-mounted passive radar,” in *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2018, pp. 1185–1191, doi: [10.1109/PIMRC.2018.8580940](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2018.8580940).
53. T. Martelli, F. Murgia, F. Colone, C. Bongioanni, P. Lombardo, “Detection and 3D localization of ultralight aircrafts and drones with a WiFi-based passive radar,” in *International Conference on Radar Systems (Radar 2017)*, 2017, doi: [10.1049/cp.2017.0423](https://doi.org/10.1049/cp.2017.0423).
54. В. Г. Небабин, В. В. Сергеев, *Методы и Техника Радиолокационного Распознавания*. Москва: Радио и связь, 1984.
55. A. Farina, A. Visconti, “Classification of radar targets by means of multiple hypotheses testing,” in *Proceedings of the International Conference Radar-87*, 1987, pp. 73–78, uri: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1987rpr.conf..73F/abstract>.
56. А. Л. Горелик, Ю. Л. Барабаш, О. В. Кривошеев, С. С. Эпштейн, *Селекция и Распознавание На Основе Локационной Информации*. Москва: Радио и связь, 1990.
57. А. Л. Горелик, Скрипкин В. А. *Некоторые вопросы построения систем распознавания*. Москва: Сов. радио, 1974. 223 с.

58. J. Martin, B. Mulgrew, "Analysis of the theoretical radar return signal from aircraft propeller blades," in *IEEE International Conference on Radar*, 1990, pp. 569–572, doi: [10.1109/RADAR.1990.201091](https://doi.org/10.1109/RADAR.1990.201091).
59. N. E. Chamberlain, E. K. Walton, F. D. Garber, "Radar target identification of aircraft using polarization-diverse features," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 27, no. 1, pp. 58–67, 1991, doi: [10.1109/7.68148](https://doi.org/10.1109/7.68148).
60. В. М. Кошевой, И. И. Макарова, "Синтез и оценка эффективности алгоритмов многоальтернативной классификации радиолокационных объектов с учетом заданных ограничений и в условиях воздействия помех," *Зарубежное военное обозрение*, no. 10, pp. 61–69, 1992.
61. Я. Д. Ширман, С. А. Горшков, С. П. Леценко, Г. Д. Братченко, В. М. Орленко, "Методы радиолокационного распознавания и их моделирование," *Зарубежная радиоэлектроника: Успехи современной радиоэлектроники*, no. 11, pp. 3–62, 1996.
62. Y. D. Shirman, *Computer Simulation of Aerial Target Radar Scatter Recognition, Detection and Tracking*. Norwood, MA: Artech House, 2002.
63. А. Г. Ивахненко, Ед., *Перцептрон — Система Распознавания Образов*. Киев: Наукова думка, 1975.
64. I. Jouny, F. D. Garber, S. C. Ahalt, "Classification of radar targets using synthetic neural networks," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 336–344, 1993, doi: [10.1109/7.210072](https://doi.org/10.1109/7.210072).
65. Я. Д. Ширман, С. Т. Багдасарян, А. С. Маляренко, Д. И. Леховицкий, *Радиоэлектронные Системы. Основы Построения и Теория: Справочник*. Москва: Радиотехника, 2007.
66. А. Л. Горелик, В. А. Скрипкин, *Методы Распознавания: Учеб. Пособие*. Москва: Радио и связь, 1984.
67. Я. Д. Ширман, С. А. Горшков, С. П. Леценко, Г. Д. Братченко, *Радиолокационное Распознавание: Учеб. пособие по курсу "Теоретические Основы Радиолокации"*. Харьков: ХВУ, 1994.
68. X. Bai, M. Xing, F. Zhou, G. Lu, Z. Bao, "Imaging of micromotion targets with rotating parts based on empirical-mode decomposition," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 11, pp. 3514–3523, 2008, doi: [10.1109/TGRS.2008.2002322](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2002322).
69. Fulin S., Mingyuan J. ISAR imaging of target with micro-motion parts based on SSA, *Proc. of the 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, Aachen, Germany, 7-10 June 2010. P. 1–4.
70. V. C. Chen, F. Li, S.-S. Ho, H. Wechsler, "Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 42, no. 1, pp. 2–21, 2006, doi: [10.1109/TAES.2006.1603402](https://doi.org/10.1109/TAES.2006.1603402).
71. A. Solodov, A. Williams, S. Al Hanai, B. Goddard, "Analyzing the threat of unmanned aerial vehicles (UAV) to nuclear facilities," *Secur. J.*, vol. 31, no. 1, pp. 305–324, 2018, doi: [10.1057/s41284-017-0102-5](https://doi.org/10.1057/s41284-017-0102-5).
72. X. Li, B. Deng, Y. Qin, H. Wang, Y. Li, "The influence of target micromotion on SAR and GMTI," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 7, pp. 2738–2751, 2011, doi: [10.1109/TGRS.2011.2104965](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2104965).
73. C. Clemente, J. J. Soraghan, "Vibrating micro-Doppler signature extraction from SAR data using singular value decomposition," in *Proc. 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar EUSAR 2012*, 2012, uri: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6217013>.
74. V. C. Chen, W. J. Miceli, B. Himed, "Micro-Doppler analysis in ISAR - review and perspectives," in *Proc. of 2009 International Radar Conference "Surveillance for a Safer World" (RADAR 2009)*, 2009, uri: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5438505>.
75. B. Li, J. Wan, K. Yao, Y. Wang, L. Ci, J. Lu, "ISAR based on micro-Doppler analysis and chirplet parameter separation," in *2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2007, pp. 379–384, doi: [10.1109/APSAR.2007.4418631](https://doi.org/10.1109/APSAR.2007.4418631).
76. C. Clemente, J. J. Soraghan, "Vibrating target micro-Doppler signature in bistatic SAR with a fixed receiver," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 50, no. 8, pp. 3219–3227, 2012, doi: [10.1109/TGRS.2011.2180394](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2180394).
77. B. Torvik, K. E. Olsen, H. Griffiths, "Classification of birds and UAVS based on radar polarimetry," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 13, no. 9, pp. 1305–1309, 2016, doi: [10.1109/LGRS.2016.2582538](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2582538).
78. B. K. Kim, H.-S. Kang, S.-O. Park, "Experimental analysis of small drone polarimetry based on micro-Doppler signature," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 14, no. 10, pp. 1670–1674, 2017, doi: [10.1109/LGRS.2017.2727824](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2727824).
79. M. Ritchie, F. Fioranelli, H. Griffiths, B. Torvik, "Micro-drone RCS analysis," in *2015 IEEE Radar Conference*, 2015, pp. 452–456, doi: [10.1109/RadarConf.2015.7411926](https://doi.org/10.1109/RadarConf.2015.7411926).
80. A. V. Khristenko et al., "Magnitude and spectrum of electromagnetic wave scattered by small quadcopter in X-band," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 4, pp. 1977–1984, 2018, doi: [10.1109/TAP.2018.2800640](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2800640).
81. M. Ritchie, F. Fioranelli, H. Borrión, H. Griffiths, "Multistatic micro-Doppler radar feature extraction for classification of unloaded/loaded micro-drones," *IET Radar, Sonar Navig.*, vol. 11, no. 1, pp. 116–124, 2017, doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0063](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0063).
82. X. Guo, C. S. Ng, E. de Jong, A. B. Smits, "Micro-Doppler based mini-UAV detection with low-cost distributed radar in dense urban environment," in *Proc. of 2019 16th European Radar Conference (EuRAD)*, 2019, uri: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8904760>.
83. M. Ritchie, F. Fioranelli, H. Borrión, H. Griffiths, "Classification of loaded/unloaded micro-drones using multistatic radar," *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 22, pp. 1813–1815, 2015, doi: [10.1049/el.2015.3038](https://doi.org/10.1049/el.2015.3038).
84. D. A. Brooks, O. Schwander, F. Barbaresco, J.-Y. Schneider, M. Cord, "Temporal deep learning for drone micro-Doppler classification," in *2018 19th International Radar Symposium (IRS)*, 2018, pp. 1–10, doi: [10.23919/IRS.2018.8447963](https://doi.org/10.23919/IRS.2018.8447963).
85. S. Bjorklund, "Target detection and classification of small drones by boosting on radar micro-Doppler," in *2018 15th European Radar Conference (EuRAD)*, 2018, pp. 182–185, doi: [10.23919/EuRAD.2018.8546569](https://doi.org/10.23919/EuRAD.2018.8546569).

Received XX, 2020

Revised XX, 2020

Accepted XX, 2020