

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-30>

УДК 621.37

ТКАЧ Владислав

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

<https://orcid.org/0000-0001-5444-5919>

e-mail: [v.tkach@chnu.edu.ua](mailto:v.tkach@chnu.edu.ua)

ХОБЗЕЙ Микола

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

<https://orcid.org/0000-0002-9101-8569>

e-mail: [m.khobzei@chnu.edu.ua](mailto:m.khobzei@chnu.edu.ua)

## ВИЯВЛЕННЯ ДРОНІВ ШЛЯХОМ ДЕТЕКТУВАННЯ ЕФЕКТУ МІКРО-ДОПЛЕРА

Робота присвячена вивченню ефекту мікро-Доплера для безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на основі квадрокоптера DJI Mini 2. В той час як ефект Доплера застосовується для рухомих об'єктів, ефект мікро-Доплера може проявлятися і в статичних об'єктах, частини якого здійснюють мікрорухи – коливання, обертання, вібрації, тощо. Показано, що пропелер квадрокоптера по різному взаємодіє із електромагнітною (ЕМ) хвилею в залежності від своєї орієнтації згідно неї. Шляхом комп'ютерного моделювання в діапазоні частот від 2 до 30 ГГц показано наявність резонансної взаємодії ЕМ хвилі та пропелера, що відбувається в двох частотних діапазонах: (а) 5-12 ГГц, де довжина ЕМ хвилі співкратна довжині пропелера та (б) 18-25 ГГц, де довжина ЕМ хвилі співкратна ширині пропелера. Експериментальні дослідження, що проводились в сертифікованій безеховій камері в діапазоні частот 2-12 ГГц, наочно продемонструють як залежність значення ефективної площі розсіювання (ЕПР) від значення кута обертання, так і підтверджують резонансну природу розсіювання ЕМ хвилі, що підтверджується різким зростанням спектру ЕПР у діапазоні частот 8-11 ГГц.

Експериментальні дослідження в динаміці проводились за допомогою двох типів радарів: (а) радару неперервної хвилі, що було сконструйовано в лабораторних умовах та(б) комерційного радару типу AWR1642, що виготовляється компанією National Instruments. Для першого випадку було продемонстровано появу чіткої гармонічної складової, що виникає для нерухомого зависаючого в повітрі квадрокоптера – частота мікро-Доплера. У другому випадку показано, що при наявності достатнього рівня роздільної здатності, можна фіксувати мікроколивання, якими є пропелери, що обертаються, а отже визначати ефект Доплера для окремих частин пропелера, що також є ефектом мікро-Доплера.

Результати дослідження можуть бути використані як додатковий інструмент для детектування БПЛА, а також для їх класифікації, використовуючи часові або спектральні характеристики отриманих сигналів як унікальні маски для різних типів безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: квадрокоптер, DJI Mini 2, ефект мікро-Доплера, ефективна площа розсіювання, радар, розсіювання ЕМ хвилі, резонанс.

TKACH Vladyslav, KHOBZEI Mykola

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

## DETECTION OF DRONES THROUGH MICRO-DOPPLER EFFECT ANALYSIS

The paper is dedicated to investigation of the micro-Doppler effect in unmanned aerial vehicles (UAVs) based on the DJI Mini 2 quadcopter utilization. While the Doppler effect is widely applied to moving objects, the micro-Doppler effect can manifest in stationary objects with components undergoing micro-motions, such as oscillation, rotation, or vibration. The research demonstrates that the propeller of a quadcopter interacts differently with electromagnetic (EM) waves depending on its orientation relative to the wave.

Using computational modeling in the frequency range of 2 to 30 GHz, the study reveals the presence of resonant interactions between EM waves and the propeller in two frequency bands: (a) 5–12 GHz, where the EM wavelength is commensurate with the propeller's length, and (b) 18–25 GHz, where the wavelength matches the propeller's width. Experimental investigations conducted in a certified anechoic chamber within the 2–12 GHz range vividly demonstrate the dependency of the radar cross-section (RCS) values on the propeller's rotational angle. Furthermore, these experiments confirm the resonant nature of the scattering, evidenced by a sharp increase in the RCS spectrum within the 8–11 GHz range.

Dynamic experiments were performed using two types of radar systems: (a) a laboratory-assembled continuous wave (CW) radar and (b) a commercial AWR1642 radar manufactured by National Instruments. The CW radar detected a distinct harmonic component corresponding to the micro-Doppler frequency for a stationary hovering quadcopter. The AWR1642 radar, benefiting from higher resolution, captured micro-motions of the rotating propellers, allowing for Doppler analysis of individual propeller segments, thereby confirming the micro-Doppler effect.

The findings can be applied as an additional tool for detecting UAVs and classifying them based on the temporal or spectral characteristics of the detected signals, which can serve as unique signatures for different UAV types.

Keywords: quadcopter, DJI Mini 2, micro-Doppler effect, radar cross-section, radar, EM wave scattering, resonance.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ

### ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Об'єкт, що рухається може генерувати ефект Доплера, що полягає в зсуві частоти у вищу або нищу частотну зону в залежності від напрямку руху цього об'єкта. Натомість багато наземних та літаючих об'єктів включають у свій склад менші частини, що здійснюють коливальні процеси – пропелери, гвинти, колеса зі спицями, руки та ноги, крила птахів тощо [1–5]. Як приклад на рис. 1(а) приведено пропелер, що

складається із двох пластикових лопатей квадрокоптера DJI Mini 2 [6], що в процесі свого обертання додає свій внесок в модуляцію ЕМ хвилі, що надходить від радару. Цей процес модуляції називається ефектом мікро-Доплера [7–9]. Ефект мікро-Доплера досить широко вивчається та застосовується для детектування БПЛА, гелікоптерів, птахів, людей тощо в наш час [4–5]. Проте, більш цікавим застосуванням ефекту мікро-Доплера є не саме детектування наявності того чи іншого об'єкту, а можливість класифікації об'єктів, оскільки інформація, яку несе даний ефект є унікальною для кожного об'єкту. Наприклад, конкретний клас БПЛА має фіксовану частоту обертання пропелерів, що залежить від його масогабаритних розмірів, вантажопідйомності, маневреності, тощо. Звісно вона змінюється відносно швидкості руху безпілотної, кута повороту, поривів вітру та ін., проте ця зміна відбудеться (і) навколо якогось фіксованого значення, (ii) ця зміна досить легко фіксується та вноситься в базу даних, після чого відбувається процес навчання нейронних мереж і класифікація об'єктів за їх допомогою [1,3,10–11]. Більше того, сучасні системи проектування і моделювання дозволяють відтворити будь-які умови польоту для будь-яких літальних апаратів, дані про які є у відкритому доступі [12].

На основі вищесказаного, у роботі проведено аналіз розсіювання ЕМ хвиль у широкому діапазоні частот від пластикових пропелерів на основі квадрокоптера DJI Mini 2 та процес детектування ефекту мікро-Доплера шляхом застосування радару типу неперервної хвилі.

### КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РОЗСІЮВАННЯ ЕМ ХВИЛЬ

Комп'ютерне моделювання проводилось в середовищі для моделювання CST Microwave Studio, що дозволяє проводити аналіз поширення ЕМ хвиль, їх взаємодії з об'єктами різних типів, проводити аналіз полів та ЕПР, тощо [13]. Завданням даного комп'ютерного моделювання була оцінка густини електричного поля від пропелера квадрокоптера DJI Mini 2 відбитої в зворотньому напрямку ЕМ хвилі в дальньому полі. Пропелер, що складається із двох лопатей, було взято за основу та приведено на рис. 1(а). Згідно його розмірів та матеріальних характеристик, було знайдено модель із ресурсу [14–16], що приведена на рис. 1(б-в), зі значенням діелектричної проникності  $\epsilon = 2,8$  та тангенсу кута втрат  $\tan(\delta) = 0,0054$ . Цю модель було експортовано у вищезгадане середовище моделювання і проведено аналіз розсіювання ЕМ поля для кута повороту пропелера від 0 до 360 градусів з кроком 5 градусів у діапазоні частот від 2 до 30 ГГц. Як видно із результатів приведених на рис. 1(г), відбита ЕМ хвиля має різне значення в залежності від (i) кута повороту та (ii) частоти. (i) Оскільки матеріал пропелера є однорідним, а площа поперечного перерізу міняється відповідно до значення кута повороту, то і значення густини електричного поля (а отже і ЕПР) в точці спостереження, що знаходиться на відстані зони дальнього поля, буде змінюватись – це і є принцип ефекту мікро-Доплера. (ii) Оскільки значення розмірів пропелера залишається фіксованим (довжиною 120 мм (довжина кожної лопаті становить 55 мм, а відстань між ними 10 мм) та шириною 15 мм), а значення довжини ЕМ хвилі, що взаємодіє з ним, змінюється від 300 до 10 мм, то і природа взаємодії на різних частотах буде різною – від зони розсіювання Релея, через зону розсіювання Мі (резонансна зона) до зони оптичного розсіювання [17]. Це можна чітко спостерігати із рис. 1(г), де значення розсіювання зростає зі зростанням частоти ЕМ хвилі, що взаємодіє з пропелером. В діапазоні частот від 5 до 12 ГГц для орієнтації пропелера 90 та 270 градусів чітко видно збільшення значення розсіювання – резонансний режим, згідно співвідношення довжини ЕМ хвилі та довжини однієї лопаті. В діапазоні частот від 18 до 25 ГГц спостерігається подібна резонансна картина, проте максимуми зсунуті на 90 градусів та проявляються при орієнтації пропелера 0 та 180 градусів. Це пов'язано із появою резонансу згідно співвідношення довжини ЕМ хвилі та ширини лопаті.

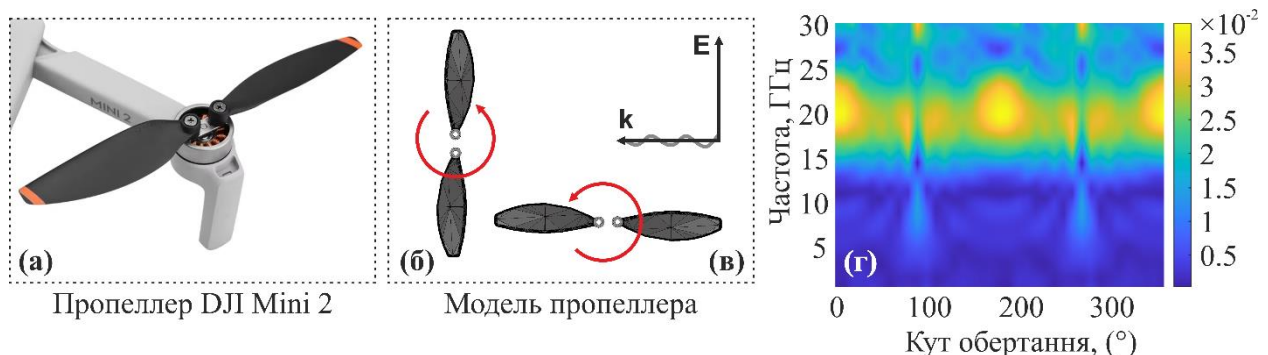


Рис. 1. Зовнішній вигляд пропелера квадрокоптера DJI Mini 2, що складається з двох лопатей (а), його модель, що використовувалась для теоретичного аналізу в середовищі моделювання CST Microwave Studio з двома різними орієнтаціями 90 (б) та 0 (в) градусів відносно вектору поширення падаючої ЕМ хвилі  $k$ , а також залежність густини електричного поля відбитої від пропелера ЕМ хвилі в діапазоні частот 2-30 ГГц відносно кута повороту пропелера від 0 до 360 градусів (г)

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕПР

Згідно із отриманих результатів комп'ютерного моделювання, було проведено експериментальні вимірювання для оцінки значення ЕПР для двох орієнтацій пропелера 90 та 0 градусів. Відповідний експериментальний макет приведено на рис. 2(а-б). Вимірювання проводились в сертифікованій безеховій камері в діапазоні частот 2-12 ГГц. В процесі вимірювання зберігались значення  $S_{11}$ -параметрів шляхом використання мережевого аналізатора (Keysight P9374A Network Analyzer, 300 КГц-20 ГГц), що з'єднувався із ширококутовою рупорною антеною (NATO IDPH-2018, 2-18 ГГц). Далі проводився розрахунок спектру ЕПР, шляхом нормування на еталонний розсіювач із відомим спектром ЕПР – металевий диск. Результати експериментального дослідження приведено на рис. 2(в). Із рисунка видно значну різницю для різних значень кута обертання пропелера, а також видно різкий приріст значення ЕПР у діапазоні 8-11 ГГц, що відповідає зоні резонансів Мі, як зазначалось вище.

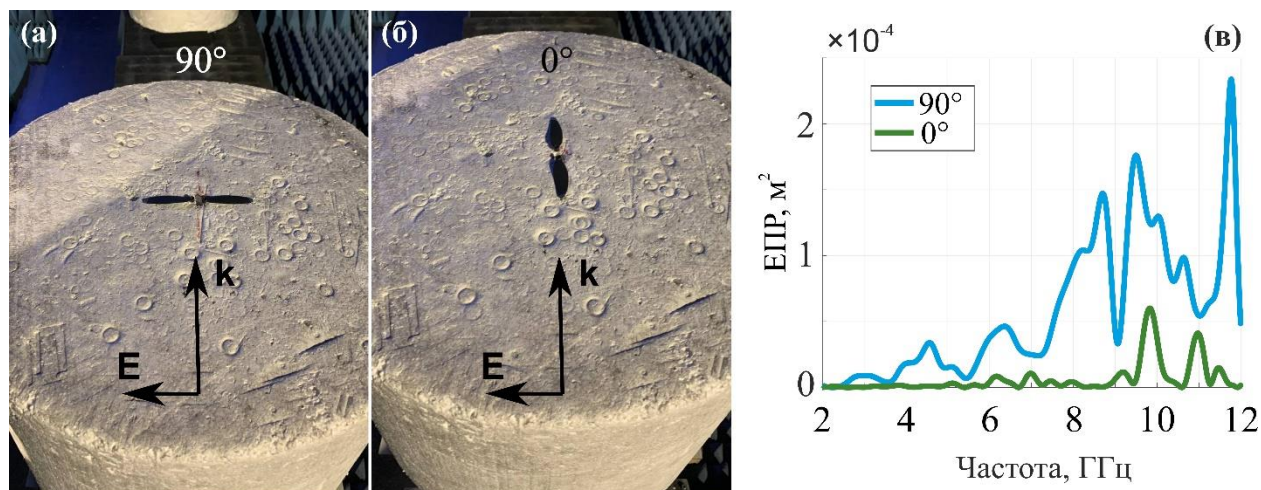


Рис. 2. Експериментальний макет двох орієнтацій пропелера 90 (а) та 0 (б) градусів відносно вектору поширення падаючої ЕМ хвилі  $k$ , а також їх спектри ЕПР в діапазоні частот 2-12 ГГц (в)

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДЕТЕКТУВАННЯ ЕФЕКТУ МІКРО-ДОПЛЕРА

Експериментальні вимірювання, що були представлені в попередньому розділі, проведені для статичного випадку, коли ЕМ характеристики пропелера вимірювались у частотному спектрі для його фіксованої позиції. Проте, для детектування ефекту мікро-Доплера в динаміці, необхідно проводити вимірювання в часі, що може бути реалізовано, наприклад, з допомогою радару неперервної хвилі (continuous wave (CW) radar). Такий радар може бути легко реалізований у лабораторних умовах з використанням вищезгаданого мережевого аналізатора та антени, блок-діаграму якого приведено на рис. 3(а). Мережевий аналізатор повністю керувався з персонального комп'ютера за допомогою середовища програмування MatLab. До одного із портів аналізатора приєднувалась рупорна ширококутова антена, що використовувалась для передавання та приймання (Tx-Rx), в той час як аналізатор відтворював значення  $S_{11}$ -параметрів в часі, після чого вони зчитувалися і зберігались персональним комп'ютером (рис. 3(а)). Експериментальний макет в лабораторних умовах приведено на рис. 3(б), де видно використовувану антену та дрон, що зависає перед антеною. Всі стінки навколо вимірювальної установки закладені спеціальними поглиначами, що використовуються з метою уникнення небажаних відбивань ЕМ хвиль у досліджуваному діапазоні частот. В результаті, шляхом застосування швидкого перетворення Фур'є до вимірних часових діаграм сигналів, що є результатом відбивання ЕМ хвилі від пропелера квадрокоптера, отримується спектральна характеристика, що містить дві чіткі гармонічні складові 320 і 340 Гц (рис. 3(в)). Ці гармонічні складові відповідають подвійним частотам обертання передніх і задніх пропелерів, оскільки лопаті за один повний оберт містять два максимуми відбивання в зворотному напрямку – дипольний момент. Таким чином, результат, що приведено на рис. 3, – це відображення процесу детектування ефекту мікро-Доплера.

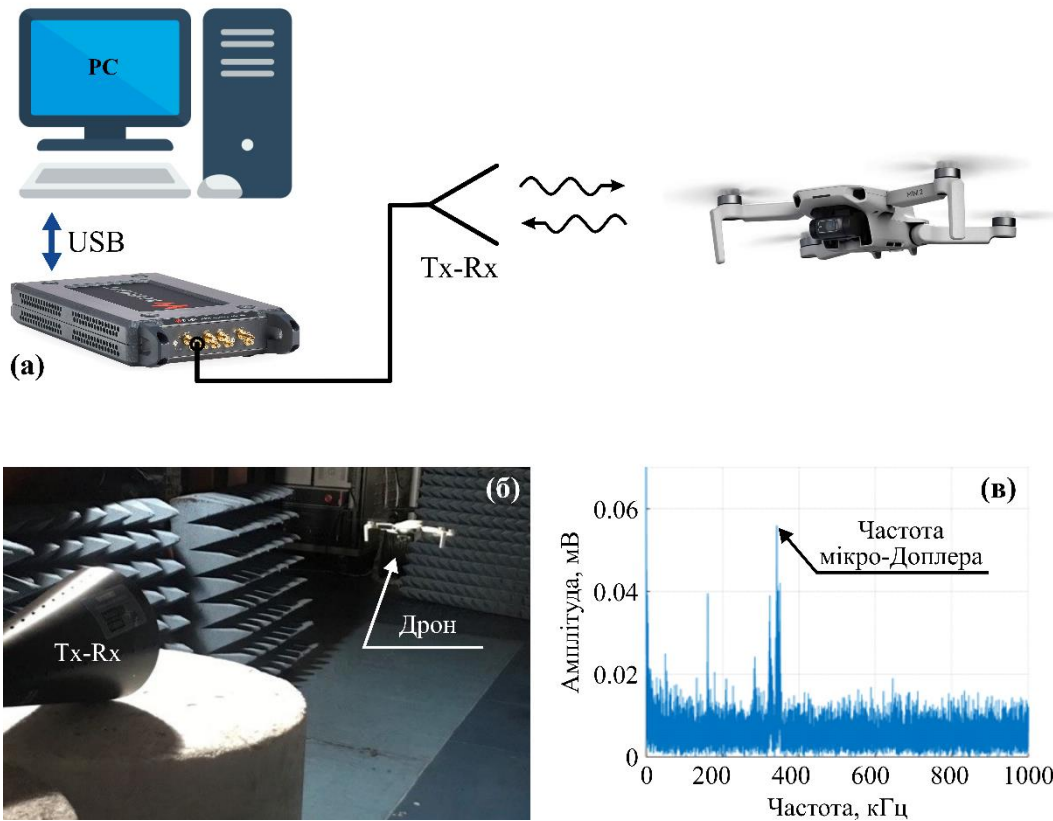


Рис. 3. Блок-діаграма експериментального макету радару неперервної хвилі, що складається із персонального комп'ютера, який здійснює контроль роботи ПНА, що в свою чергу реалізовує процес запису S11-параметрів в часі, що продукуються згідно відбитої ЕМ хвилі від пропелерів квадрокоптера, за допомогою передавально-приймальної (Tx-Rx) антени (а), зовнішній вигляд експериментального макету в процесі вимірювання (б), а також спектральна діаграма з демонстрацією частоти мікро-Доплера (в)

#### ДЕТЕКТУВАННЯ ЕФЕКТУ МІКРО-ДОПЛЕРА З ВИКОРИСТАННЯМ РАДАРУ ТИПУ AWR1642

Експериментальне дослідження виявлення дронів за допомогою ефекту Доплера/мікро-Доплера було також проведено з допомогою комерційного автомобільного радару серії AWR1642, який є радаром частотно-модульованої неперервної хвилі (frequency modulated continuous wave – FMCW) із робочою смугою частот 4 ГГц (діапазон робочих частот 77-81 ГГц) [18]. Експериментальний макет вимірювальної установки приведено на рис. 4(а), де квадрокоптер DJI Mini 2 знаходиться на нерухомій платформі перед радаром із ввімкненими пропелерами. Оскільки роздільна здатність радару за дальністю становить 3,75 см, то є можливість детектувати зсув Доплера від кожного ротора окремо (рис. 4(б)). Цей зсув в кожний окремий момент часу і є ефектом мікро-Доплера. Більше того, враховуючи відстань між точками в першій і другій вертикальних колонках, можна побачити, що вона рівна 0,13 м, тобто точна відстань між центрами переднього і заднього пропелерів (рис. 4(в)). Візуалізація, що приведена на рис. 4(б-в), є можливою завдяки демо-версії згідно програмного забезпечення від компанії-виробника National Instruments (виробник радару типу AWR1642), та представляє відстань до об'єкту від радару уздовж поздовжньої та поперечної осей, а також швидкість згідно ефекту Доплера та відстані, відповідно.

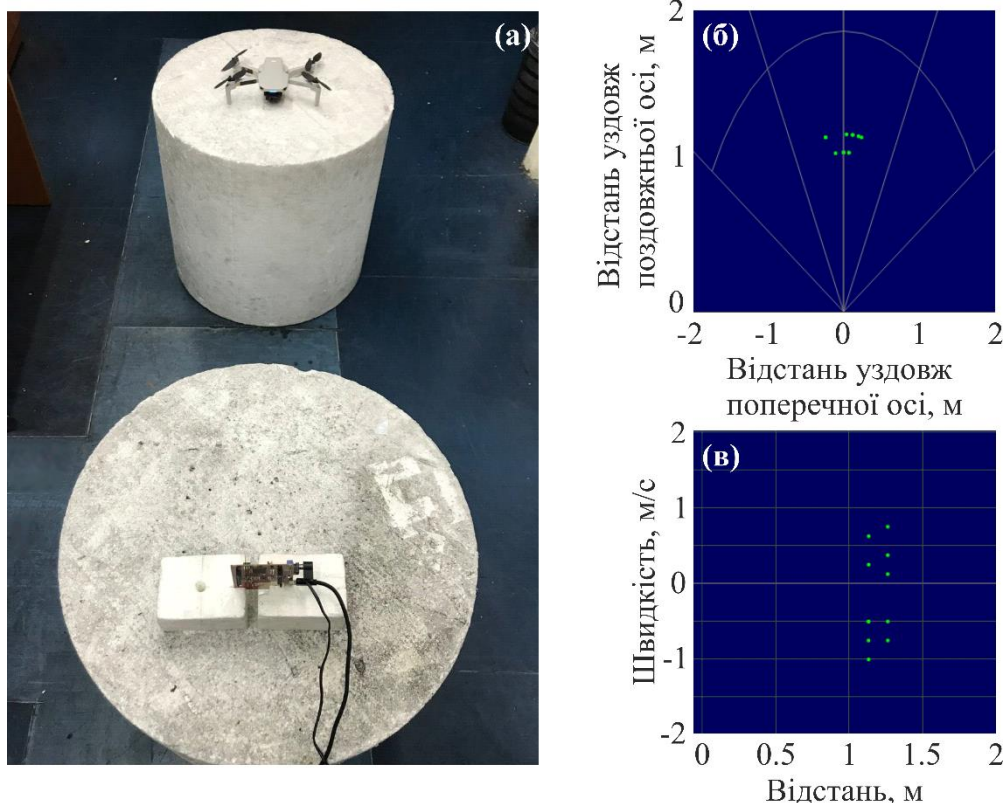


Рис. 4. Експериментальний макет процесу детектування ефекту мікро-Доплера з використанням радару типу AWR1642 (а) та вікна візуалізації, що представляють демо-версію відповідного програмного забезпечення від компанії-виробника National Instruments, – відстані об'єкту від радару уздовж поздовжньої та поперечної осей (б) і швидкості згідно ефекту Доплера та відстані (в)

### ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

#### І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У статті розглянуто можливість використання ефекту мікро-Доплера як додаткової можливості детектування квадрокоптера DJI Mini 2. Здійснено комп'ютерне моделювання пропелера, що обертається, в програмному забезпеченні CST Microwave Studio на основі моделі, що відповідає реальному пропелеру зазначеного квадрокоптера. Моделювання показало природу розсіювання ЕМ хвилі від пропелера в діапазоні частот від 2 до 20 ГГц для повного кута обертання і як результат спостерігаються чіткі мінімуми та максимуми густини електричного поля відбитої від пропелера ЕМ хвилі. Експериментальним підтвердженням цього стало вимірювання в безеховій камері спектру ЕПР у діапазоні частот 2-12 ГГц, з якого можна побачити, що у випадку, коли пропелер займає положення вздовж вектору електричного поля (90 градусів відносно вектору поширення падаючої ЕМ хвилі  $k$ ), то спостерігається значно більший рівень розсіювання, ніж для положення пропелера перпендикулярно до вектору електричного поля (0 градусів відносно вектору поширення падаючої ЕМ хвилі  $k$ ).

Експериментальні дослідження в динаміці проводились за допомогою двох типів радарів: (а) радару неперервної хвилі, що було сконструйовано в лабораторних умовах та (б) комерційного радару типу AWR1642, що виготовляється компанією National Instruments і функціонує як радар частотно-модульованої неперервної хвилі. Для першого випадку було продемонстровано появу чіткої гармонічної складової, що виникає для нерухомого зависаючого в повітрі квадрокоптера – частота мікро-Доплера. У другому випадку показано, що при наявності достатнього рівня роздільної здатності, можна фіксувати мікроколивання, якими є пропелери, що обертаються, а отже визначати ефект Доплера для окремих частин пропелера, що також є ефектом мікро-Доплера.

### References

1. Yang, Y. *et al.* Open-set human activity recognition based on micro-Doppler signatures. *Pattern Recognit* **85**, 60–69 (2019).
2. Narayanan, R. M., Tsang, B. & Bharadwaj, R. Classification and Discrimination of Birds and Small Drones Using Radar Micro-Doppler Spectrogram Images. *Signals 2023, Vol. 4, Pages 337–358* **4**, 337–358 (2023).
3. Alnujaim, I., Oh, D. & Kim, Y. Generative Adversarial Networks for Classification of Micro-Doppler Signatures of Human Activity. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **17**, 396–400 (2020).

4. Polycarpou, A. C., Balanis, C. A. & Stefanov, A. Helicopter rotor-blade modulation of antenna radiation characteristics. *IEEE Trans Antennas Propag* **49**, 688–696 (2001).
5. Ciattaglia, G. *et al.* Analysis of vehicle vibration through automotive radar signal. *2022 IEEE International Workshop on Metrology for Automotive, MetroAutomotive 2022 - Proceedings* 105–110 (2022) doi:10.1109/METROAUTOMOTIVE54295.2022.9855144.
6. DJI - Official Website. <https://www.dji.com/global>.
7. The Micro-Doppler Effect in Radar, Second Edition - Victor C. Chen - Google книги. [https://books.google.co.il/books?hl=uk&lr=&id=SVCQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=The+micro-doppler+effect+in+radar&ots=cpNuD80sOw&sig=gWTXjvQvpkCDeUD9TTQPwnXn-Zc&redir\\_esc=y#v=onepage&q=The%20micro-doppler%20effect%20in%20radar&f=false](https://books.google.co.il/books?hl=uk&lr=&id=SVCQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=The+micro-doppler+effect+in+radar&ots=cpNuD80sOw&sig=gWTXjvQvpkCDeUD9TTQPwnXn-Zc&redir_esc=y#v=onepage&q=The%20micro-doppler%20effect%20in%20radar&f=false).
8. Chen, V. C. Micro-Doppler effect of micromotion dynamics: a review. <https://doi.org/10.1117/12.488855> **5102**, 240–249 (2003).
9. Kozlov, V., Kosulnikov, S., Vovchuk, D. & Ginzburg, P. Memory effects in scattering from accelerating bodies. <https://doi.org/10.1117/1.AP.2.5.056003> **2**, 056003 (2020).
10. Vovchuk, D. *et al.* Micro-Doppler-Coded Drone Identification. (2024).
11. Narayanan, R. M., Tsang, B. & Bharadwaj, R. Classification and Discrimination of Birds and Small Drones Using Radar Micro-Doppler Spectrogram Images. *Signals 2023, Vol. 4, Pages 337-358* **4**, 337–358 (2023).
12. Del Guercio, A. M. DEVELOPMENT OF A WEBAPP FOR SAFE MISSION PLANNING FOR UAS IN URBAN AREAS. (2024).
13. Virtual Worlds for Real Life | Dassault Systèmes. <https://www.3ds.com/>.
14. Inside a Drone: Propellers. <https://www.dji.com/newsroom/news/inside-a-drone-propellers>.
15. DJI Mini 2 props by SilkGuppy - Thingiverse. <https://www.thingiverse.com/thing:4767075>.
16. Li, T., Wen, B., Tian, Y., Li, Z. & Wang, S. Numerical Simulation and Experimental Analysis of Small Drone Rotor Blade Polarimetry Based on RCS and Micro-Doppler Signature. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett* **18**, 187–191 (2019).
17. Rayleigh- versus Mie- Scattering and Optical Region - Radartutorial. <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Rayleigh-%20versus%20Mie-Scattering.en.html>
18. AWR1642 data sheet, product information and support | TI.com. <https://www.ti.com/product/AWR1642>