

## **КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАДІОЛОКАЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ ТАКТИЧНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У МЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ ХВИЛЬ**

Самарський Д. С.

Науковий керівник – д.т.н., с.н.с., Залевський Г. С.

Харківський національний університет Повітряних Сил  
імені Івана Кожедуба, кафедра озброєння радіотехнічних військ,  
м. Харків, Україна

The computer simulation results of the radar scattering characteristics of an unmanned aerial vehicle (UAV) models containing metal and dielectric structural elements are demonstrated and discussed. Due to the fact that the size of the UAV is commensurate with the sounding signal wavelength, an electrodynamic method based on the integral equations solution was used for computer modeling. Numerical method and its advantages over other known algorithms are briefly discussed. The results of modeling scattering characteristics for various UAV models in VHF band and examples of their using to solve a number of radar problems are demonstrated.

Безпілотні літальні апарати (БпЛА) різних типів широко використовуються у скритих діях, таких як розвідка, картографування, відстеження рухомих об'єктів та доставка вантажів. Особливе місце займають ударні безпілотники. Залежно від виконуваних завдань, застосовуються БпЛА, які мають різні геометричні розміри.

Дослідження та розробки, пов'язані з БпЛА, мають дві сторони. З одного боку, розробники безпілотників прагнуть зменшити інтенсивність вторинного випромінювання БпЛА, а з іншого спеціалісти з радіолокації працюють над підвищенням ефективності радіолокаційного виявлення та супроводження БпЛА. Для вирішення зазначених завдань необхідно мати інформацію про характеристики радіолокаційного розсіювання БпЛА різних типів, зокрема і у метровому діапазоні хвиль. Для отримання такої інформації для різних умов радіолокації доцільно застосовувати комп'ютерне моделювання.

Наявність інформації про характеристики розсіювання БпЛА дозволяють розробляти рекомендації щодо підвищення ефективності застосування РЛС метрового діапазону хвиль щодо радіолокаційного спостереження зазначених повітряних об'єктів.

Для комп'ютерного моделювання характеристик розсіювання моделей тактичних БпЛА, які мають резонансні (співрозмірні із довжиною зондувальної хвилі) розміри застосовувався чисельний алгоритм, заснований на розв'язанні поверхневих інтегральних рівнянь, описаний у роботах

[1-4]. Для розрахунку розсіювання металевими, вуглепластиковими поверхнями, які можна вважати ідеально провідними, застосовується алгоритм, заснований на розв'язанні інтегрального рівняння магнітного поля. Розрахунок розсіювання діелектричними об'єктами здійснюється за допомогою алгоритму, заснованого на розв'язанні системи інтегральних рівнянь Мюлера. Сумарний відгук БпЛА знаходиться як сума електромагнітних полів, розсіяних металевими (вуглепластиковими) та діелектричними елементами конструкції.

Розроблене програмне забезпечення пройшло верифікацію шляхом порівняння результатів розрахунку ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) ряду модельних об'єктів із даними фізичних експериментів та результатами, отриманими іншими відомими методами. Запропоновані алгоритми мають ряд переваг при розрахунку характеристик розсіювання об'єктів складної форми у порівнянні з іншими відомими алгоритмами [1-4].

Результати, які подано у даній роботі, публікуються уперше, доповнюють дані, опубліковані у роботах [1-4] та розширюють базу знань про характеристики розсіювання БпЛА різних типів у метровому діапазоні хвиль.

Для розрахунку створено моделі поверхонь БпЛА резонансних розмірів, які містять металеві і діелектричні елементи конструкції. Геометричні параметри моделей наведено у таблиці 1. Перша модель являла собою планер із тонкої діелектричної оболонки товщиною від 1 мм до 2 мм. Діелектрична проникність матеріалу оболонки першої моделі складала  $\epsilon_{06}=2$ . Друга, третя та четверта моделі відповідали БпЛА, фюзеляж яких виготовлено з вуглепластика (при розрахунках поверхня вважалась ідеально провідною), а крила та стабілізатори у вигляді тонкої діелектричної оболонки із товщиною 2 мм до 2,4 мм та  $\epsilon_{06}=3,2$ .

Проведено розрахунки діаграм зворотного вторинного випромінювання моделей – залежність моностатичної ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) об'єкту від азимуту  $\beta$  ( $\beta=0$  – зондування “у ніс”,  $\beta=90$  град. – зондування “у бік”) при фіксованому куті місця опромінювання, рівному нулю (горизонтальна площина, площина крила), на горизонтальній і вертикальній поляризаціях. Частота зондувального сигналу складала 166 МГц (довжина хвилі 1,81 м).

У таблиці 2 наведено середні значення ЕПР досліджуваних моделей БпЛА у головних азимутальних ракурсах.

Таблиця 1 – Геометричні параметри моделей БпЛА

Модель БпЛА	Характерні розміри фюзеляжу, м			Розмах крила, м
	Довжина	Ширина	Висота	
Модель 1	1,8	0,16	0,16	3
Модель 2	0,8	0,09	0,06	1,3
Модель 3	1,465	0,24	0,17	2,308
Модель 4	1,32	0,3	0,175	2,35

Таблиця 2 – Середні значення ЕПР моделей БпЛА

Азимутальний сектор	Модель БпЛА							
	1	2	3	4	1	2	3	4
	ЕПР, $\text{м}^2 \times 10^{-3}$							
	Горизонтальна поляризація				Вертикальна поляризація			
Круговий сектор, $\beta=(0-360)^\circ$	11,2	148	770	689	8,08	0,380	17,5	20,6
Носовий ракурс, $\beta=(0\pm 45)^\circ$	4,49	14,9	240	135	6,73	0,200	8,13	2,16
Боковий ракурс, $\beta=(45-135)^\circ$ , $\beta=(225-315)^\circ$	18,0	281	1316	1247	8,92	0,550	25,8	38,4
Хвостовий ракурс, $\beta=(135-225)^\circ$	4,43	15,4	209	127	7,74	0,210	10,3	3,14

У доповіді демонструються більш детальні результати моделювання ЕПР моделей БпЛА у метровому діапазоні хвиль, які дозволяють узагальнити особливості вторинного випромінювання БпЛА резонансних розмірів у метровому діапазоні хвиль.

Також наводяться приклади застосування даних моделювання для зменшення радіолокаційної помітності вітчизняних перспективних БпЛА, а також для підвищення ефективності застосування РЛС метрового діапазону хвиль для радіолокаційного спостереження тактичних БпЛА.

#### Список використаних джерел

1. Zalevsky G., Sukharevsky O., Vasilets V. Integral Equation Modelling of Unmanned Aerial Vehicle Radar Scattering Characteristics in VHF to S Frequency Bands. IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2021. Vol. 15. No. 10. P. 1299-1309.

2. Сухаревський О. І., Залевський Г. С., Василець В. О., Галкін Ю. О., Горелишев С. А., Садовий К. В. Характеристики вторинного випромінювання тактичного безпілотного літального апарату у метровому, дециметровому і сантиметровому діапазонах хвиль. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2021. № 4(45). С. 82-92.

3. Вторинне випромінювання безпілотних літальних апаратів (математичне моделювання): монографія / О. І. Сухаревський, І. В. Калужинів, В. І. Василець, Г. С. Залевський та ін. // Під ред. О. І. Сухаревського. Х. Видавець: О. А. Мірошніченко, 2022. 272 с.

4. Applied Problems in the Theory of Electromagnetic Wave Scattering / O. I. Sukharevsky (ed.), S. V. Nechitaylo, V. M. Orlenko, V. A. Vasilets, G. S. Zalevsky. Bristol, UK: IOP Publishing, 2022. 283 с.