

УДК 629.735.45.052.3.028.01

doi: 10.32620/aktt.2022.6.02

В. В. ПАВЛІКОВ, С. С. ЖИЛА, А. М. ГУМЕННИЙ, А. В. ЛОЛЕНКО

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна*

РОЗРОБКА СИСТЕМИ КРІПЛЕННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО РАДАРА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПЕРЕШКОД

Предметом наукових досліджень є розгляд варіантів компоновання та можливості розміщення на борту вертольота мікрохвильового радара. **Метою** є розробка методики створення тривимірної параметричної моделі системи кріплення радара. **Завдання:** розробити алгоритм (послідовність етапів) створення тривимірної параметричної моделі кріплення радара без внесення змін у базову конструкцію та компоновання існуючого літального апарата. Використовуваними **методами** є: методи аналітичної геометрії; методи сканування тривимірних об'єктів; методи тривимірного параметричного моделювання за допомогою сучасних комп'ютерно інтегрованих CAD\CAM\CAE систем у контексті існуючих збірок. Отримано такі **результати**. На базі відсканованої хмари точок створена параметрична модель носової частини літального апарата, визначена зона розміщення додаткового обладнання, що встановлюється на літальний апарат, розроблена система кріплення мікрохвильового радара, виконана тривимірна модель системи кріплення та розроблено конструкторську документацію на неї. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: розроблено загальний алгоритм, етапи проектування та тривимірного параметричного моделювання агрегата літального апарата за допомогою методів та принципів зворотнього інжинірингу. Реалізація даного алгоритму, методів та принципів зворотнього інжинірингу представлена на прикладі створення системи кріплення мікрохвильового радара на відсік Ф1 вертольота Мі8-МСБ1. В роботі представлено етапи проектування платформи для кріплення мікрохвильового радара виявлення перешкод на каркас відсіку Ф1 вертольота Мі-8МСБ1, а також визначено зону сканування радара під час польоту.

Ключові слова: вертоліт; політ; запобігання зіткнення; мікрохвильовий радар; кріплення; фюзеляж.

Вступ

Одним із найважливіших чинників значного відсотка авіаційних подій, аварій та катастроф (далі авіаподії), під час польотів вертольотів на малих та гранично малих висотах є відсутність радара запобігання зіткненню зокрема, з лініями електропередач (ЛЕП), опорами, щоглами та деревами. На сьогодні статистика щодо кількості авіаподій за участю військових вертольотів не оприлюднюється. Проте для цивільної авіації її можна прослідкувати у відкритих джерелах. Так одна зі статистик за аналізом 14 авіаподій 2019 року вказує, що майже 30% з них викликані зіткненнями з ЛЕП, ще майже 30% – зіткненнями у складних метеоумовах. Вплив інших 40% має різноманітний характер чинників, але найбільший з них не перевищує 7%.

Для України статистика має свій відтінок, проте надзвичайно актуальна, адже в Україні виробляються/модернізуються/експлуатуються вертольоти. Так АТ «Мотор Січ» виробляє/модернізує вертольоти «Мі» серій 2, 8 та 24, зокрема ті, які використовуються у Збройних Силах України.

На сьогодні фахівці АТ «Мотор Січ» опанували майже повний цикл проектування-виробництва вертольотів і лопатей (металевих і композитних). Проте невирішеним завданням, яке безпосередньо впливає на безпеку польоту, залишається відсутність вітчизняних радарів запобігання зіткненню під час польотів на малих та гранично малих висотах. Тому розроблення вертолітного радара запобігання зіткненню з перешкодами для безпеки польотів на малих висотах є надзвичайно актуальним завданням, яке важливе для ЗС України, цивільної авіації, а також відповідає державній програмі імпортозаміщення.

На даний час з'явився великий попит у використанні на вертольотах Збройних Сил України радара запобігання зіткненню під час польотів на малих та гранично малих висотах. Спеціалістами Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» розроблено зразок мікрохвильового радара, але з'явилося нове завдання – розробка кріплення для проведення польотних випробувань. Тому була запропонована та розроблена схема розміщення радара в носовій частині фюзеляжу вертольота Мі-8МСБ.

Вітчизняні виробники авіаційної техніки зацікавлені у розробці перспективних радіолокаційних комплексів (РЛК) саме в міліметровому діапазоні довжин хвиль, для застосування їх на вертольотах, що знову розробляються і модернізуються.

1. Постановка завдання дослідження

Діапазон міліметрових хвиль пропонує нові та привабливі розв'язання багатьох проблем у процесі розробки радіолокаційних систем та обладнання [1-4]. Унікальні характеристики міліметрових хвиль зумовлені молекулярним поглинанням в атмосфері на цих частотах [5, 6]. Характерною особливістю спектра поглинання в атмосфері є наявність слабких смуг поглинання у діапазонах наступних довжин хвиль: 8 мм, 3 мм та 2 мм. Саме ці смуги становлять великий інтерес для створення електронних систем різного призначення. Також слід зазначити, що смуга високого поглинання в діапазоні довжин хвиль 5...6 мм представляє інтерес для створення систем з підвищеною захищеністю та стійкістю до перешкод. Оскільки діапазон міліметрових хвиль (ММВ) займає проміжне місце між мікрохвильовими та оптичними частотами, метод ММВ дозволяє поєднати багато переваг обох частотних діапазонів. Крім того, цей діапазон зазвичай вільний від певних недоліків чи обмежень сусідніх частотних діапазонів. Використання міліметрових хвиль часто є оптимальним для задоволення вимог при розробці радіосистем, у тому числі бортових систем визначення відстані до об'єктів, що рухаються. У порівнянні з ІЧ та оптичними системами методика ММВ діапазону дозволяє набагато ефективніше долати дим, туман, пил, дощ, хмари та інші перешкоди, ніж ІЧ та оптичні системи. При дії щільних поглинальних перешкод ММВ системи мають значно менше загасання, ніж інфрачервоні, тому ММВ системи надійно працюють там, де ІЧ техніка практично не працює.

У порівнянні з сантиметровим діапазоном [7, 8] діапазон ММВ обіцяє значно більшу ширину робочої смуги, більшу спектральну роздільну здатність, менший розмір і меншу ймовірність перехоплення або перешкод. Зменшення довжини хвилі сприяє досягненню вищої роздільної здатності в радіолокаційній техніці. Менший розмір антени є дуже відчутною перевагою для більшості застосувань, особливо у випадках, коли критичними параметрами є розміри та обсяг. При порівнянних апертурах коефіцієнт посилення антени в міліметровому діапазоні значно вищий, ніж у сантиметровому [9, 10].

Виходячи з поставленого завдання спеціалістами Національного аерокосмічного університету ім. М. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» було спроектовано, розроблено та виготов-

лено дослідний зразок мікрохвильового радара для виявлення перешкод (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд дослідного зразка мікрохвильового радара

Призначення:

Радар курсових перешкод призначений для попередження льотчика про зіткнення з перешкодами типу ЛЕП, веж, будівель тощо. у простих і складних метеоумовах вдень та вночі.

Завдання, що вирішуються:

- радіолокаційне сканування простору в передній зоні вертольота;
- пошук та виявлення перешкод у зоні сканування;
- вимірювання дальності та кутових координат до виявлених перешкод;
- виведення інформації на МФІ та в систему внутрішнього зв'язку;

Режими роботи:

Тестування РЛС:

Режим "ТЕСТУВАННЯ" ініціюється автоматично при подачі живлення. У цьому режимі радар виконує такі операції:

- тестування програм;
- тестування апаратури за допомогою елементів вбудованого контролю. Загальна тривалість режиму "ТЕСТУВАННЯ" не більше 10 с.

Очікування:

Режим «ОЧІКУВАННЯ» встановлюється автоматично після успішного завершення режиму «ТЕСТУВАННЯ». Вихідний стан функціональних вузлів радара в режимі ОЧІКУВАННЯ:

- передавач вимкнено;
- сканування антени вимкнено.

Робота:

Режим «РОБОТА» встановлюється після відповідної зовнішньої команди управління у разі позитивного результату режиму «ТЕСТУВАННЯ».

Дослідний зразок мікрохвильового радару повинен мати наступні характеристики, викладені у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики мікрохвильового радару

Найменування характеристики	Значення	Одиниця вимірювання
Діапазон частот	94	ГГц
	3	мм
Максимальна дальність виявлення перешкод типу висотний будинок, гора, металева опора лінії електропередач, вітрова електростанція, тощо	2500	м
Максимальна дальність виявлення ліній електропередач з діаметром дроту 10...30 мм, не менше	1500	м
Мінімальна дальність виявлення	100	м
Вірогідність правильного виявлення	0,9	
Вірогідність помилкової тривоги	$35 \cdot 10^{-6}$	
Зона огляду:		
– за азимутом	± 60	кут. град
– за кутом місця	± 30	кут. град
Тривалість циклу сканування сектора	0,3	с
Роздільна здатність за дальністю на відстані 2500 м	9	м
Роздільна здатність за кутовими координатами	3	кут. град
Середньоквадратична помилка визначення кутових координат	0,5	кут. град
Напруга живлення	18–33	В
Споживана потужність, не більше ніж	120	Вт
Час безперервної роботи, не менше ніж	5	час.
Діапазон робочих температур	-40+60	Град. С
Теплостійкість	+70	Град. С

Виникає наступне завдання — проведення льотних випробувань макета вертолітного радару.

Виходячи з того, що для проведення льотних випробувань і забезпечення сканування передньої напівсфери, антенний блок (а взагалі й увесь пристрій) повинен бути розміщений у носовій частині фюзеляжу літального апарата, потрібно вирішувати проблему компоновки пристрою у каркасі Ф1 вертольота Мі-8МСБ.

2. Результати досліджень

Зважаючи на те, що вертольоти виготовлені досить давно і конструкторська документація для їх виготовлення відсутня, для вирішення проблеми компоновки потрібно провести так званий реверс-інжиніринг Ф1 вертольота Мі-8МСБ1.

Для цього було проскановано за допомогою лазерного сканувального пристрою каркас відсіку Ф1 вертольота Мі-8МСБ1. Отриману хмару точок було завантажено до комп'ютера і за допомогою CAD/CAM/CAE програмного комплексу CATIA v.5 перетворено у полігональну модель поверхні агрегата (рис. 2).

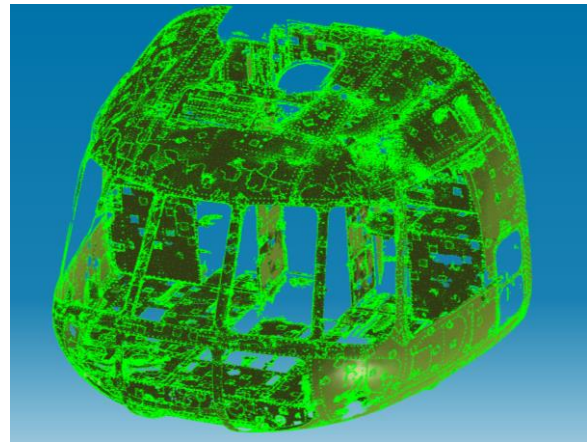


Рис. 2. Сканована поверхня відсіку Ф1 вертольота Мі-8МСБ1

Використовуючи цю модель як базу для подальшої роботи було побудовано аналітичний еталон теоретичної поверхні відсіку Ф1 вертольота Мі-8МСБ1 (рис. 3). Вона може бути використана як для поточних робіт з компоновки агрегатів радару, так і для подальшого доопрацювання систем спостереження за льотною обстановкою.

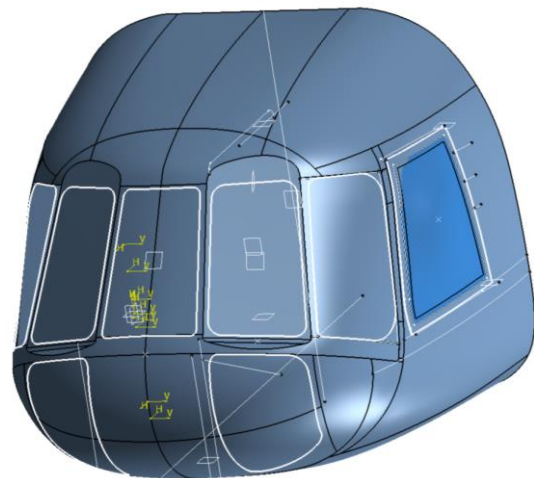


Рис. 3. Теоретична поверхня відсіку Ф1 вертольота Мі-8МСБ1

Наступним етапом стали роботи з відновлення елементів каркаса Ф1. Це зроблено для отримання можливості використання їх для подальшої прив'язки елементів кріплення майбутньої платформи до вертольота (рис. 4). На цьому етапі були відтворені заклепкові шви у зоні розміщення платформи, побудовані частково балки та діафрагми каркаса Ф1 (рис. 5).

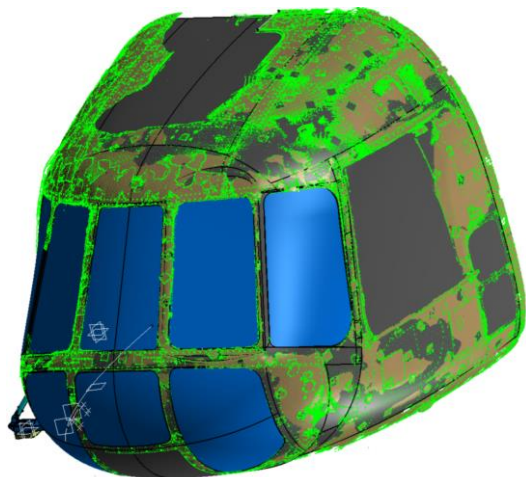


Рис. 4. Відтворення каркаса відсіку Ф1 вертольота Мі-8МСБ1



Рис. 5. Елементи кріплення радару на відсік Ф1 вертольота Мі-8МСБ1

Проаналізувавши можливі зони розміщення антен радару та зауваживши, що у виконанні радару для льотних випробувань він не має механічного пристрою для забезпечення сканування передньої напівсфери були прийняті наступні допущення:

– Радар монтується на виносній платформі зовні фюзеляжу збоку.

– Для збільшення зони сканування під час налаштування та випробування встановити два комплекти радарів, один зліва та один справа, створивши при цьому два виконання монтажу: ліве та праве.

– Платформа повинна бути спроектована таким чином, щоб мати змогу при налаштуванні повертати антенний блок у горизонтальній площині та вертикальній площині.

Компонування радару на вертольоті потрібно виконати таким чином, щоб його огляду та роботі не заважали наявні системи вертольота (ППД системи повітряних сигналів тощо).

Загальний вигляд змонтованих радарів приведено на рис. 6.

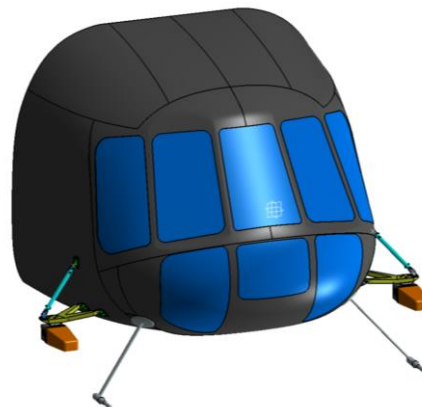


Рис. 6. Загальна схема монтажу радару на відсік Ф1 вертольота Мі-8МСБ1

Виходячи з вищезазначеного була спроектована платформа для кріплення радару та розроблені креслення монтажу платформи на борт вертольота Мі-8МСБ1, розроблені 3D моделі та креслення кронштейнів та підкосів для монтування радару, визначено зону сканування радару під час випробування (рис. 7 – 10).

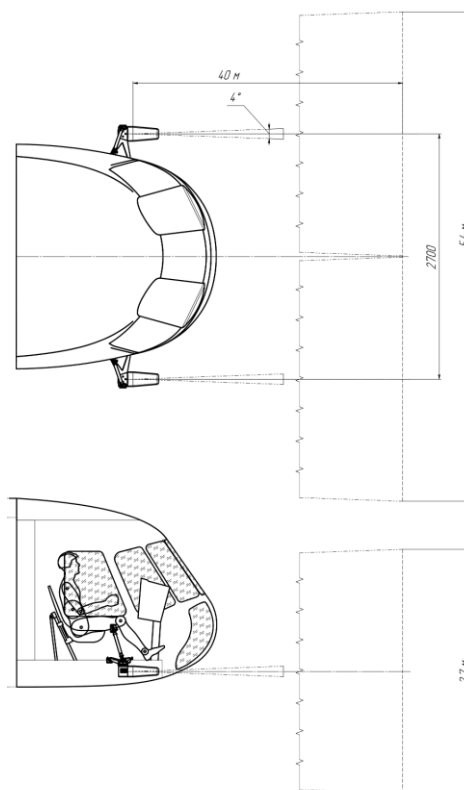


Рис. 7. Зони сканування радіолокатором

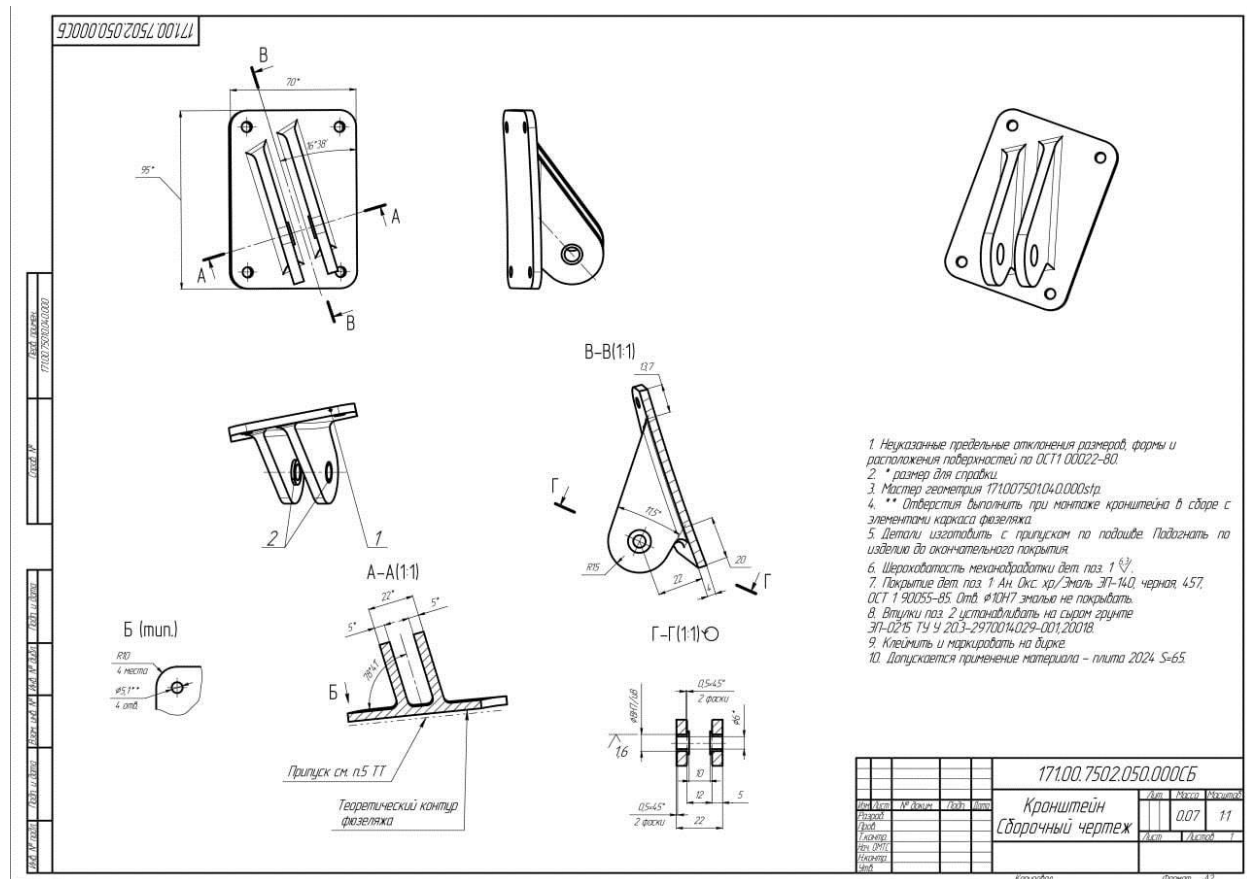


Рис. 10. Креслення кронштейна для монтажу радара

Висновки

В роботі представлено загальний алгоритм, етапи проєктування та тривимірного параметричного моделювання агрегату літального апарата за допомогою методів та принципів зворотного інжинірингу.

Реалізація даного алгоритму, методів та принципів зворотного інжинірингу представлена на прикладі створення системи кріплення мікрохвильового радара на відсік Ф1 вертольота Мі-8МСБ1.

В роботі представлено етапи проєктування платформи для кріплення мікрохвильового радара виявлення перешкод на каркас відсіку Ф1 вертольота Мі-8МСБ1, а також визначено зону сканування радара під час польоту.

Література

1. Yanik, M. E. Near-Field MIMO-SAR Millimeter-Wave Imaging With Sparsely Sampled Aperture Data [Text] / M. E. Yanik, M. Torlak // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 31801-31819. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2902859.

2. Toward Millimeter-Wave Joint Radar Communications: A Signal Processing Perspective [Text] /

K. V. Mishra, M. R. Bhavani Shankar et al. // IEEE Signal Processing Magazine. – 2019. – Vol. 36, no. 5. – P. 100-114. DOI: 10.1109/MSP.2019.2913173.

3. Remote Monitoring of Human Vital Signs Using mm-Wave FMCW Radar [Text] / M. Alizadeh, G. Shaker et al. // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 54958-54968. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2912956.

4. Miniaturized Millimeter-Wave Radar Sensor for High-Accuracy Applications [Text] / M. Pauli et al. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2017. – Vol. 65, no. 5. – P. 1707-1715. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2677910.

5. Cumulative Rain Attenuation Probability In Ukraine [Text] / V. Pavlikov, N. Ruzhentsev, S. Zhyla et al. // 2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM). – 2019. – P. 122-125. DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779261.

6. Pavlikov, V. V., Ruzhentsev, N. V. et al. Millimeter-range radiometric system for perspective problems of meteorology and telecommunication [Text] / V. V. Pavlikov, N. V. Ruzhentsev et al. // 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). – 2017. – P. 46-51. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972583.

7. Radio-Heat Contrasts of UAVs and Their Weather Variability at 12 GHz, 20 GHz, 34 GHz, and

94 GHz Frequencies [Text] / N. Ruzhentsev, S. Zhyla, V. Pavlikov et al. // *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*. – 2022. – Vol. 20, no. 2. – P. 163–173. DOI: 10.37936/ecti-ec.2022202.246878.

8. UAV TARGET detection using radiometers of X K KA and W bands [Text] / N. V. Ruzhentsev, V. K. Volosyuk, V. V. Pavlikov, S. S. Zhyla et al. // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2020. – Vol. 79, no. 17. – P. 1489-1512. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i17.10.

9. A Lens Antenna with Reconfigurable Beams for mmWave Wind Profile Radar [Text] / Y. Ding, Z. Zou et al. // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, no. 9. – Article no. 3148. DOI: 10.3390/s22093148.

10. Frequency-Beam-Scanning mm-Wave Antennas for Direction Finding RADAR [Text] / M. Poveda-García, A. Gil-Martínez et al. // *2022 19th European Radar Conference (EuRAD)*. – 2022. – P. 293-296. DOI: 10.23919/EuRAD54643.2022.9924888.

References

1. Yanik, M. E. and Torlak, M. Near-Field MIMO-SAR Millimeter-Wave Imaging With Sparsely Sampled Aperture Data. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 31801-31819. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2902859.

2. Mishra, K. V., Bhavani Shankar, M. R. et al. Toward Millimeter-Wave Joint Radar Communications: A Signal Processing Perspective. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2019, vol. 36, no. 5, pp. 100-114. DOI: 10.1109/MSP.2019.2913173.

3. Alizadeh, M., Shaker, G. et al. Remote Monitoring of Human Vital Signs Using mm-Wave FMCW Radar. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 54958-54968. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2912956.

4. Pauli, M. et al. Miniaturized Millimeter-Wave Radar Sensor for High-Accuracy Applications. *IEEE*

Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, vol. 65, no. 5, pp. 1707-1715. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2677910.

5. Pavlikov, V., Ruzhentsev N., Zhyla, S. et al. Cumulative Rain Attenuation Probability In Ukraine. *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, 2019, pp. 122-125. DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779261.

6. Pavlikov, V. V., Ruzhentsev, N. V. et al. Millimeter-range radiometric system for perspective problems of meteorology and telecommunication. *2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*, 2017, pp. 46-51. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972583.

7. Ruzhentsev, N., Zhyla, S., Pavlikov, V. et al. Radio-Heat Contrasts of UAVs and Their Weather Variability at 12 GHz, 20 GHz, 34 GHz, and 94 GHz Frequencies. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, 2022, vol. 20, no. 2, pp. 163–173. DOI: 10.37936/ecti-ec.2022202.246878.

8. Ruzhentsev, N. V., Volosyuk, V. K., Pavlikov, V. V., Zhyla, S. S. et al. UAV TARGET detection using radiometers of X K KA and W bands. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2020, vol. 79, no. 17, pp. 1489-1512. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i17.10.

9. Ding, Y., Zou, Z. et al. A Lens Antenna with Reconfigurable Beams for mmWave Wind Profile Radar. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 9, article no. 3148. DOI: 10.3390/s22093148.

10. Poveda-García, M., Gil-Martínez, A. et al. Frequency-Beam-Scanning mm-Wave Antennas for Direction Finding RADAR. *2022 19th European Radar Conference (EuRAD)*, 2022, pp. 293-296. DOI: 10.23919/EuRAD54643.2022.9924888.

Надійшла до редакції 11.09.2022, розглянута на редколегії 20.11.2022

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MOUNTING A MICROWAVE RADAR FOR OBSTACLE DETECTION

Volodymyr Pavlikov, Semen Zhyla, Andrii Humennyi, Andrii Lolenko

The subject of scientific research is the consideration of layout options and the possibility of placing a microwave radar on board a helicopter. **The goal** is to develop a methodology for creating a three-dimensional parametric model of the radar mounting system. **The task** is to develop an algorithm (sequence of steps) for creating a three-dimensional parametric radar mount model without making changes to the basic design and layout of an existing aircraft. **The methods** used are: methods of analytical geometry; methods of scanning three-dimensional objects; methods of three-dimensional parametric modeling using modern computer-integrated CAD\CAM\CAE systems in the context of existing assemblies. The following **results** were obtained. On the basis of the scanned point cloud, a parametric model of the nose of the aircraft was created, the area of additional equipment installed on the aircraft was determined, a microwave radar mounting system was developed, a three-dimensional model of the mounting

system was made, and design documentation was developed for it. **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results is as follows: a general algorithm, stages of design and three-dimensional parametric modeling of the aircraft unit using the methods and principles of reverse engineering have been developed. The implementation of this algorithm, methods and principles of reverse engineering is presented on an example of the creation of a microwave radar mounting system on the F1 compartment of the Mi8-MSB1 helicopter. The work presents the stages of designing a platform for attaching a microwave obstacle detection radar to the frame of the F1 compartment Mi8MSB1 helicopter, as well as the radar scanning zone during the flight.

Keywords: helicopter; flight; collision prevention; microwave radar; fastening; fuselage.

Павліков Володимир Володимирович – д-р техн. наук, проф., проректор з наукової роботи, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Жила Семен Сергійович – д-р техн. наук, доц., зав. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Гуменний Андрій Михайлович – канд. техн. наук, доц., зав. каф. проектування літаків та вертольотів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Лоленко Андрій Васильович – асист. каф. проектування літаків та вертольотів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Volodymyr Pavlikov – Doctor of Techn. Sci., Professor, vice-rector for scientific work, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: v.pavlikov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-6370-1758, Scopus Author ID: 23397933100.

Semen Zhyla – Doctor of Techn. Sci., Associate Professor, Head of Aerospace Radio-Electronic Systems Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: s.zhyla@khai.edu, ORCID: 0000-0003-2989-8988, Scopus Author ID: 57207914339.

Andrii Humennyi – PhD, Associate Professor, Head of Aircraft Designing Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: a.gumennyi@khai.edu, ORCID: 0000-0003-1020-6304, Scopus Author ID: 57219051542.

Andrii Lolenko – assistant professor of Aircraft Designing Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: alolenko66@gmail.com.