

## ТЕСТИРОВАНИЕ АНТЕННЫХ СИСТЕМ РАДАРОВ МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ОБЛЕТНЫМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДРОНА

В.Г. Аветисян<sup>1,2</sup>, М.В. Маркосян<sup>1,2</sup>, А.Г. Мартиросян<sup>1</sup>, А.К. Агаронян<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ереванский НИИ средств связи

<sup>2</sup>Ереванский технологический институт

<sup>2</sup>Шушинский технологический университет

---

*В статье обсуждается возможность определения и тестирования параметров громоздких антенных систем радаров метровых волн облетным методом с использованием дрона. Современные комплексы радаров предназначены для обнаружения и сопровождения воздушных судов и летающих объектов гражданского и военного назначения. При их работе, всегда на первый план выдвигается надежность выполнения их функционального предназначения. Комплексы охватывают радары различных диапазонов, начиная с метровых волн и включая сверхвысокочастотный диапазон. Такой широкий охват частотных диапазонов обусловлен стремительными темпами конструктивных и технологических разработок для воздушных объектов, направленных на минимизацию отражений от них. Радары различных диапазонов, дополняя друг друга, повышают возможность надежного обнаружения и сопровождения воздушных объектов.*

**Ключевые слова:** радар, метровые волны, антенна, тестирование, дрон, облетный метод.

### Введение

Радары метровых, или ультракоротких волн (УКВ), успешно конкурируют с радаром сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. В частности, радары метрового диапазона обеспечивают большую дальность обнаружения воздушных целей. Распространение метровых волн практически не подвержено влиянию атмосферных осадков [1], [2]. По своим возможностям эти радары уникальны, поскольку представляют собой эффективным средством обнаружения и распознавания “самолетов-невидимок”, разработанных по технологии Stealth. Однако радары УКВ имеют громоздкие антенные сооружения. При этом диаграмма направленности (ДН) их антенных систем формируются с участием Земли. В подавляющем большинстве случаев в диапазоне метровых волн, поверхность Земли удовлетворяет критерию Релея при отражении падающей на ее поверхность волны. Поэтому ДН антенн радара метровых волн в вертикальной плоскости приобретают многолепестковый характер [1], [2]. Это свойство антенных систем радаров диапазона УКВ широко используется и для связи с воздушными судами и их локации.

С точки зрения определения параметров таких больших антенных сооружений в условиях, максимально приближенных к реальным условиям их работы, облетный метод измерения параметров этих антенных систем становится практически чуть ли не единственным [3] - [8]. С другой стороны, высокая стоимость облетных измерений требует снижения времени процесса измерений и применения относительно менее дорогостоящих в эксплуатации летательных аппаратов (ЛА). Поэтому облетные методы, с применением в качестве ЛА вертолетов, начали производиться со второй половины прошлого столетия [6], [7], [11]. Относительно низкие скорости полета вертолета, возможность его “зависания” в определенной точке (по длительности не более 10 минут без нарушения режимов работы вертолета), современные средства автоматизации измерений, вычислительной техники, систем позиционирования и навигации летающего объекта приводят в конечном итоге к положительному эффекту.

Однако даже применение вертолетов вместо самолетов, хотя и снижает стоимость измерений, все же не решает кардинально этот вопрос. Во-первых, доступность применения отмеченных ЛА при измерениях в большинстве случаев ограничивается проблемами административного характера. Во-вторых, тестирование параметров антенной системы УКВ радара должно производиться в месте его развертывания, поскольку профиль местности нахождения радара, шероховатость ее поверхности и угол места антенной системы радара по отношению к горизонту оказывают существенное влияние на формирующуюся ДН антенной системы. В-третьих, в процессе измерений, которые, в зависимости от погодных условий, потребуют время не одного дня, желательно исключить перелеты вертолета на базу его сосредоточения, на что расходуется дополнительное необходимое количество топлива и что является важным фактором в ценообразовании тестирования. При этом придется создать некоторую приемлемую взлетно-посадочную площадку для вертолета, на что необходимы также дополнительные затраты. В-четвертых, режим “зависания” вертолета не такой уж удобный режим его функционирования, тем более в течении 10 минут, поскольку это связано с перегруженным состоянием работы двигателя вертолета. В-пятых, существенным фактором, влияющим на точность тестирования параметров испытываемой антенной системы (ИАС) УКВ радара, является влияние корпуса и винта вертолета на ДН и, соответственно, на коэффициент усиления (КУ) установленной на вертолете излучающей вспомогательной антенны (ВА). Хотя и в [9] предложено устанавливаемое на вертолете устройство для существенного снижения отмеченного влияния, однако реализация этого устройства также требует некоторых дополнительных финансовых затрат.

### **Цель работы**

Рассмотрение перспектив использования дрона в качестве ЛА при определении и тестировании параметров ИАС УКВ радаров облетным методом.

### **Обсуждение проблемы**

Облетный метод тестирования с применением ЛА реализуются в дальней зоне ИАС при значительном удалении ЛА с ВА от ИАС, на расстояниях

$$R_{FZ} \geq R_{FZ}^{\min} = 2D^2 / \lambda \quad (1)$$

где:  $R_{FZ}^{\min}$  - минимальное расстояние дальней зоны ИАС,  $D$  - наибольший размер ИАС,  $\lambda$  - длина рабочей волны. Следует отметить, что облетный метод представляет из себя довольно сложный в техническом плане и дорогостоящий процесс. Это обусловлено, во-первых, измерением положения ЛА в пространстве, а во-вторых, большим объемом работ по обработке результатов. Метод требует внедрения максимального уровня автоматизации всех этапов измерений - от управления полетами, до обработки и документирования регистрируемых данных измерений. Для больших ИАС ( $D \leq 20m$ ), к которым можно отнести антенные системы радаров метровых волн ( $\lambda = 1...10m$ ), значение расстояния дальней зоны  $R_{FZ}^{\min}$  составляет менее  $1km$ .

Оцененное значение  $R_{FZ}^{\min} \leq 1km$  менее потолка высоты полета малых дронов, чем обеспечивается измерение ДН ИАС также в направлении на зенит. Использование таких дронов сразу же снимает вопросы административного порядка по доступности ЛА и вопрос его сосредоточения ЛА, поскольку дрон, из-за своей невысокой стоимости, будет являться неотъемлемой частью комплекса аппаратуры тестирования ИАС. При нормальных погодных условиях дрон можно использовать в течение достаточного по длительности времени производимых антенных измерений путем периодической замены его аккумуляторных батарей.

Определение и тестирование параметров ИАС с использованием дрона осуществляется на основе способа, предложенного в [10]. Измерения ДН и коэффициента усиления (КУ) ИАС производится в режиме ее приема, а излучающая (ВА) устанавливается на летающем дроне. Процедура антенных измерений состоит из трех этапов. В первом и втором этапах выполняется тестирование угломестной ДН и КУ антенной системы радара в плоскости главного сечения ДН ИАС (вертикальная плоскость, являющаяся перпендикулярной апертуре ИАС и проходящая через ее середину). Третий этап - тестирование азимутальных (горизонтальных) ДН и КУ антенной системы радара в плоскостях, соответствующих максимумам лепестков угломестной ДН.

Суть первого этапа состоит в следующем. Производится регистрация данных об угломестной ДН в передней и задней вертикальных полуплоскостях главного сечения ДН ИАС при вертикальном подъеме дрона до высоты  $H_{\max} \approx 0,4R_{FZ}^{\min}$  и его последующем спуске. При такой высоте и удалении дрона на расстояние  $R \approx R_{FZ}^{\min}$  обеспечивается измерение наиболее важных, с точки зрения функциональности работы УКВ радара, угловых секторов ДН от  $0^{\circ}$  до  $20^{\circ}$ . На рис. 1 представлена схема выполнения измерений первого этапа.

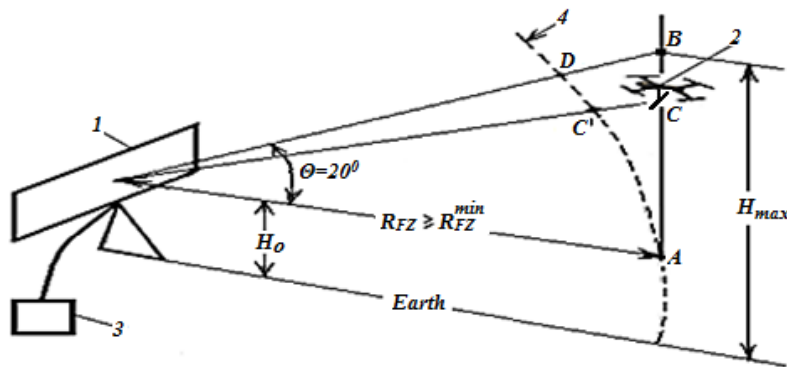


Рис. 1 Схема выполнения измерений при вертикальном подъеме дрона и его последующем спуске: 1 – ИАС, 2 – дрон, 3 – приемник, 4 – дуга окружности с радиусом  $R = R_{FZ} \geq R_{FZ}^{\min}$

Привязка регистрируемого уровня мощности выходного сигнала приемника ИАС к координатам точки нахождения дрона в полете осуществляется временной синхронизацией начала работы регистрирующего сигнал компьютера приемного оборудования ИАС и GPS-навигатора на дроне. Определение угломестной ДН ИАС в секторе углов до  $20^{\circ}$  осуществляется дальнейшим пересчетом массива данных уровней принятых мощностей в результате подъема и спуска дрона вдоль прямой  $AB$  в массив уровней сигналов, соответствующих воображаемому движению дрона вдоль дуги  $AC'D$  с радиусом  $R_{D3}$ . Для этого сигнал приемника, принятый с точки  $C$  нахождения дрона, умножается на коэффициент, равный ослаблению волны в свободном пространстве на участке  $CC'$ . Совокупность массива полученных таким образом данных в зависимости от угла  $\theta$  определяет угломестную ДН ИАС в секторе углов  $0^{\circ} \dots 20^{\circ}$ .

Второй этап - регистрация данных об угломестной ДН в угловом секторе от  $1^{\circ}$  до  $179^{\circ}$  включительно, что почти полностью перекрывает всю верхнюю полуплоскость. Этот этап измерений осуществляется серией горизонтальных полетов дрона на дискретных высотных этажах в количестве  $M$  штук. Полеты дрона выполняются согласно составленной карте маршрутов полета дрона на этажах. Карта маршрутов горизонтальных полетов составляется на основе соображений, поясняемых рис. 2. Исходными данными являются выбранное расстояние  $R_{FZ}$  дальней зоны, удовлетворяющее условию  $R_{FZ} \geq R_{FZ}^{\min}$ , высота  $H_0$  центра ИАС над Землей,

средний угол  $\bar{\theta}_{M+1}$  секторов измерения ДН в каждой полуплоскости на каждом этаже, равный  $\bar{\theta}_{M+1} = 90^\circ / M$ , и угол  $\theta_1 \approx 1^\circ$ . На этом рисунке изображена упрощенная схема горизонтальных полетов дрона с высотными этажами в количестве  $M = 4$ .

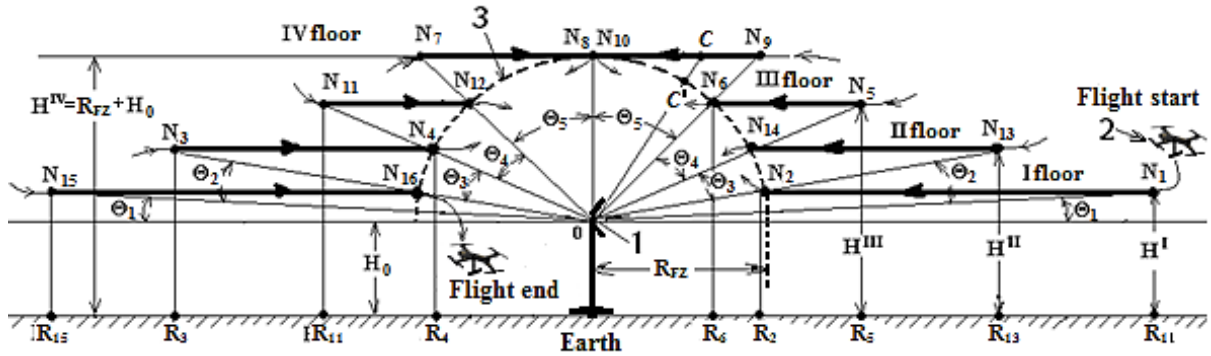


Рис. 2 Схема горизонтальных полетов дрона: 1 - ИАС, 2 - дрон, 3 - дуга окружности с радиусом  $R = R_{FZ} \geq R_{FZ}^{\min}$ , равным расстоянию дальней зоны

Каждый горизонтальный пролет дрона (от точки  $N_i$  до точки  $N_{i+1}$ ) на определенном участке этажа с высотой  $H^K$  ( $K = 1, 2, 3 \dots M$  - номер этажа) обеспечивает регистрацию данных об угломестной ДН в определенном секторе с углом  $\theta_{K+1}$ . Максимальное количество  $M$  высотных этажей горизонтальных полетов вертолета определяется средней величиной примыкающих друг к другу угловых секторов. При средних величинах угловых секторов  $\theta_{K+1} \approx 10^\circ \dots 15^\circ$  имеем  $M \approx 90^\circ / 9^\circ \dots 12^\circ \leq 10$ . Высота  $K$ -го этажа равна

$$H^K = H_0 + R_{FZ} \sin(\theta_1 + \theta_2 \dots + \theta_K) \quad (2)$$

Таким образом, высота нижнего этажа равна  $H^1 = H_0 + R_{FZ} \sin \theta_1$ , а самого верхнего последнего этажа равна -  $H^M = H_0 + R_{FZ} \sin(\theta_1 + \theta_2 \dots + \theta_M) = H_0 + R_{FZ} \sin 90^\circ = H_0 + R_{FZ}$ . Полет дрона на этаже выполняется всегда в направлении к ИАС. Привязка регистрируемого уровня мощности выходного сигнала приемника ИАС к координатам точки нахождения дрона в полете осуществляется опять же временной синхронизацией начала работы регистрирующего сигнала компьютера приемного оборудования ИАС и GPS-навигатора на дроне. В процессе горизонтального полета дрона измерения регистрируются при его нахождении между начальной  $R_s^K$  и конечной  $R_e^K$  координатами горизонтальной проекция наклонной дальности дрона, которые соответствуют конкретному этажу. Выражения для  $R_s^K$  и  $R_e^K$ , согласно рис. 2, определяются простыми геометрическими соотношениями

$$\left. \begin{aligned} R_s^K &= \frac{H^K - H_0}{\operatorname{tg}(\theta_1 + \theta_2 \dots + \theta_K)} \\ R_e^K &= \frac{H^K - H_0}{\operatorname{tg}(\theta_1 + \theta_2 \dots + \theta_{K+1})} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Процедура определения угломестной ДН при горизонтальных полетах в пределах угловых секторов  $\theta_{K+1}$  аналогична процедуре при вертикальных полетах. Опять же сигнал, принятый с точки  $C$  (см. IV-ый этаж на рис. 2) нахождения дрона на горизонтальном участке

пересчитывается в точку  $C'$  на дугу окружности  $3$  с радиусом  $R_{FZ}$  и с центром, где находится ИАС.

После определения направлений максимумов  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  лепестков угломестной ДН далее производится измерение горизонтальной (азимутальной) ДН в направлении максимумов лепестков при нахождении дрона на высотах  $H_1, H_2, \dots, H_n$  ( $H_n = R_{FZ} \operatorname{tg} \beta_n$ ). Дрон при этом совершает круговой облет вокруг ИАС на высоте  $H_n$  и с наклонной дальностью большей, чем минимальная дальняя зона ИАС. Либо, если приемная ИАС установлена на опорно-поворотное устройство, дрон зависает на выбранной высоте  $H_n$ , а ИАС вращается вокруг своей вертикальной оси на один оборот во время зависания дрона.

Отметим, что описанный способ определения и тестирования ИАС УКВ радара, но с помощью вертолета, был апробирован и успешно использован при разработке и изготовлении антенной системы УКВ радара “Амбер” и определении ее параметров [11] - [13]. При этом, для снижения влияния вертолета на ДН излучающий симметричный вибратор, установленный на вертолете, и повышения точности измерений применялся контейнер ([9], [11]), закрепленный под днищем вертолета. Контейнер представляет собой короб с поглотителями, на котором закреплен излучающий симметричный вибратор (см. рис. 3).



Рис. 6 Вертолет с установленным под его днищем коробом

Однако, в случае применения дрона надобность в таком коробе отпадает из-за простоты такой излучающей системы, как “дрон+симметричный вибратор”. ДН и КУ такой системы относительно легко и достаточно точно можно измерить предварительно на Земле по методике, предложенной в [14]. Это обстоятельство, наряду с заменой вертолета дроном, в свою очередь, также снижает финансовые затраты на тестирование ИАС.

### Заключение

Изложенное выше обсуждение является реальной основой создания комплекса аппаратуры для решения насущной задачи – определения и тестирования параметров громоздких антенных систем УКВ радаров различного назначения. Для перекрытия частотного диапазона  $f = (35 \dots 200) \text{MHz} \rightarrow \lambda = (8,57 \dots 1,5) \text{m}$  необходимо:

1. Разработать и изготовить компоненты передающей части комплекса аппаратуры – комплекты передатчиков с симметричными вибраторами.
2. Провести экспериментальное исследование ДН и КУ этих компонентов в компоновке с несущим их дроном.
3. Протестировать созданный комплекс аппаратуры на применяемых различных УКВ радарах.

Созданный комплекс аппаратуры с использованием дрона для тестированию параметров ИАС радаров облетным методом позволит обеспечить:

- повышение безопасности персонала, участвующего в процессе тестирования;
- снижение затрат на процесс тестирования;
- повышение точности тестирования;
- универсализацию тестирования в широком диапазоне рабочих частот.

**Использованная литература**

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.; Связь, 1972г.
2. Аветисян В.Г., Никогосян Е.Г. Распространение радиоволн. Ереван; Изд. РАУ, 2020г.
3. Фрадин А.З., Рыжков Е.В. Измерения параметров антенно-фидерных устройств. М.; Связь, 1972г.
4. IEEE Standard Test Procedures for Antennas. IEEE Std 149-1979, Published by IEEE Inc., 1979г.
5. Методы измерения характеристик антенн СВЧ./ Под ред. Н.М.Цейтлина–М.; Радио и связь, 1985г.
6. Brueckman H. // Electronics, Nov.1955, pp 134-136.
7. Barker G.E. Measurement of the radiation patterns of full-scale HF and VHF antennas.// IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol. AP-21, No. 4, July 1973, pp. 538-542.
8. «Antenna RF measurements with a miniature helicopter» // LS Spectrum Special Editions, Special Edition Broadcast, January, 2012, <http://www.lstelcom.com/en/company/ls-spectrum/overview/>
9. Արտոնագիր N 2803A, ՀՀ, ՄԱԴ G01R 29/00: Շրջաթիռ եղանակով վերգետնյա անտենայի պարամետրերի չափման սարք: Վ.Հ.Ավետիսյան, Մ.Վ.Մարկոսյան, Ա.Ա.Հովհաննիսյան, Ա.Կ.Ահարոնյան, Ա.Ա.Սարգսյան: Առաջնության թվ. 23.05.2013, Հրապարակման թվ. 29.01.2014:
10. Արտոնագիր N 2814A, ՀՀ, ՄԱԴ G01R 29/00: Ուղղաթիռի միջոցով վերգետնյա անտենայի ուղղորդվածության դիագրամի չափման եղանակ: Վ.Հ.Ավետիսյան, Մ.Վ.Մարկոսյան, Ա.Ա.Նիկողոսյան, Ա.Ա.Սարգսյան: Առաջնության թվ. 23.05.2013, Հրապարակման թվ. 25.02.2014:
11. Маркосян М.В., Аветисян В.Г., Мартиросян Г.Г., Никогосян А.Г., Оганесян А.А., Агаронян А.К., Саргсян А.А.. К определению параметров антенных решеток облетным методом с помощью вертолета // Труды международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2013. / Таганрог – Дивноморское, Россия, 23-28 июнь, 2013г., - С. 262-267.
12. Markosyan M.V., Avetisyan V.H., Hovhannisyan A.A., Manukyan A.A, Mosesov M.A., Aharonyan A.K., Petrosyan A.I., Sughyan G.Z., Saryan A.Y., Petrosyan R.M., Harutyunyan E.A., Ghazaryan K.A.. Mobile VHF radar // Proceedings of Inter. Conf. on “Microwave and THz Technologies and Applications” (IRPhE’ 2014) / Agveran, Armenia, Oct. 2-3, 2014, pp. 29-33.
13. Маркосян М.В., Аветисян В.Г., Оганесян А.А., Манукян А.А., Агаронян А.К., Арутюнян Э.А., Петросян А.И., Сугян Г.З.. Автоматически сворачиваемая антенная система // Труды международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2015 / Таганрог – Дивноморское, Россия, 28 июнь – 3 июль, 2015г., - С. 41-45.
14. Аветисян В.Г., Агаронян А.К., Саргсян А.А. Методика определения параметров слабонаправленных антенн диапазона ультракоротких волн // Вестник ГИУА, серия “Информационные технологии, электроника, радиотехника”, - 2014г., вып. 17, №1, - С. 78-86.

ՀՏԴ - 623.765.4:681.3

**ՄԵՏՐԱՅԻՆ ՏԻՐՈՒՅԹԻ ՌԱԴԱՐՆԵՐԻ ԱԼԵՀԱՎԱՔԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ  
ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄԸ ՇՐՋԱԹԻՐ ԵՂԱՆԱԿՈՎ՝ ԴՐՈՆԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՄԲ**

**Վ.Գ. Ավետիսյան<sup>1,2</sup>, Մ.Վ. Մարկոսյան<sup>1,2</sup>, Հ.Գ. Մարտիրոսյան<sup>1</sup>, Ա.Կ. Ահարոնյան<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Երևանի կապի միջոցների ԳՀԻ

<sup>2</sup>Երևանի տեխնոլոգիական ինստիտուտ

Հոդվածում քննարկվում է մետրային ալիքների ռադարների համակարգերի մեծածավալ ալեհավաքների պարամետրերի որոշման և փորձարկման հնարավորությունը շրջաթիր եղանակով՝ դրոնի օգտագործմամբ: Ռադարների ժամանակակից համալիրները նախատեսված են քաղաքացիական և ռազմական նշանակության օդանավերի և թռչող օբյեկտների հայտնաբերման և ուղեկցման համար:

Նրանց աշխատանքի ժամանակ, միշտ առաջին պլան է մղվում դրանց ֆունկցիոնալ նշանակության կատարման հուսալիությունը: Համալիրներն ընդգրկում են տարբեր դիապազոնների ռադարներ՝ սկսած մետրային ալիքներից և ներառյալ գերհզոր հաճախականությամբ դիապազոնը: Հաճախականությունների դիապազոնների նման լայն ընդգրկումը պայմանավորված է օդային օբյեկտների համար կառուցողական և տեխնոլոգիական զարգացումների արագընթաց տեմպերով, որոնք ուղղված են դրանցից արտացոլումների նվազեցմանը:

Տարբեր դիապազոնների ռադարները, լրացնելով միմյանց, բարձրացնում են օդային օբյեկտների հուսալի հայտնաբերման և ուղեկցման հնարավորությունը:

**Բանալի բառեր.** ռադար, մետրային ալիքներ, ալեհավաք, փորձարկում, դրոն (անօդաչու թռչող սարք), շրջաթիր եղանակ:

UDC - 623.765.4:681.3

## **FLIGHT TESTING OF ANTENNA SYSTEMS OF METER RANGE RADARS USING A DRONE**

**V.G. Avetisyan<sup>1,2</sup>, M.V. Markosyan<sup>1,2</sup>, H.G. Martirosyan<sup>1</sup>, A.K. Aharonyan<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Yerevan Scientific Research Institute of Communications*

<sup>2</sup>*Yerevan Institute of Technology*

The article discusses the possibility of determining and testing the parameters of bulky meter wave radar antenna systems by the flyby method using a drone. Modern radar systems are designed to detect and track aircraft and flying objects for civil and military purposes. During their work, the reliability of the fulfillment of their functional purpose is always brought to the fore. The complexes cover radars of various ranges, starting from meter waves and including the microwave range. Such a wide coverage of frequency ranges is due to the rapid pace of design and technological developments for airborne objects aimed at minimizing reflections from them. Radars of different ranges, complementing each other, increase the ability to reliably detect and track airborne objects.

**Key words:** radar, meter waves, antenna, testing, drone, flyby method.

Ներկայացվել է՝ 13.11.2020թ.

Գրախոսման է ուղարկվել՝ 04.12.2020թ.

Երաշխավորվել է տպագրության՝ 23.12.2020թ.