

ПРИМЕНЕНИЕ ДРОНА В ОБЛЕТНОМ МЕТОДЕ АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РАДАРОВ УЛЬТРАКОРОТКИХ ВОЛН МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

М.В. МАРКОСЯН¹, В.Г. АВЕТИСЯН^{1,2}, А.К. АГАРОНЯН^{1,2},
А.Г. МАРТИРОСЯН¹, Э.А. АРУТЮНЯН¹, Г.З. СУГЯН^{1,2}, Р.А. ДАВТЯН¹

¹Ереванский НИИ средств связи, Ереван, Армения

²Российско–Армянский университет, Ереван, Армения

*e-mail: aharon.aharonyan@rau.am

(Поступила в редакцию 8 сентября 2023 г.)

Рассмотрено применение дрона в качестве летательного аппарата для реализации метода антенных измерений. Управление дрона осуществляется программно, посредством унифицированного радиоэлектронного оборудования, содержащего передатчик, полуволновой вибратор и GPS навигатор. Параметры направленных свойств антенной системы являются результатом программной обработки выходных сигналов приемника радара, синхронизированных с координатами точек траекторий полетов дрона.

1. Введение

В состав современных комплексов радиолокационных станций входят радары различных диапазонов волн, начиная метровыми и заканчивая диапазоном СВЧ. Столь широкий охват частотных диапазонов обусловлен стремительным развитием конструкторских и технологических разработок летающих объектов, направленных на минимизацию отражений от них. С этой точки зрения радары разных диапазонов дополняют друг друга и повышают надежность обнаружения и сопровождения летающих объектов. Радары ультракоротких волн (УКВ) метрового диапазона могут конкурировать с радаром диапазона СВЧ. Это обеспечение обнаружения летающих объектов на больших расстояниях и практическое отсутствие влияния атмосферных осадков на распространение метровых волн [1–3]. Радары УКВ уникальны по своим возможностям, так как представляют собой эффективное средство обнаружения и распознавания «самолетов-невидимок», разработанных с использованием технологии «Стелс». Однако такие радары имеют крупномасштабные антенные системы, размер D которых в горизонтальном направлении может составлять 20 м и более. Минимальное расстояние $R_{\min}^{FZ}$ дальней зоны такой большой антенной системы, таких антенн равно [4]

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

где $\lambda = (1-3)$ м — рабочая длина волны, а $R_{\min}^{FZ}$ может составлять несколько сотен метров. При определении направленных свойств таких громоздких антенных

систем облетный метод антенных измерений становится чуть ли не единственным [5, 6]. Однако следует отметить, что облетный метод технически достаточно сложный и дорогостоящий процесс. Это связано, во-первых, с измерением положения измерительного летающего аппарата (ЛА) в пространстве, а во-вторых, с большой работой в направлении обработки результатов. Этот метод требует максимального уровня автоматизации всех этапов, от измерений до управления. С другой стороны, высокая стоимость оперативных измерений требует сокращения времени процесса измерения и использования в эксплуатации сравнительно более дешевых ЛА. С целью сокращения времени полета и, следовательно, стоимости измерений в работе [7] был предложен способ измерения направленных свойств антенн радаров УКВ с применением дрона вместо вертолета.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ применения вертолета и дрона в облетном методе антенных измерений для определения направленных свойств антенных систем радаров УКВ, а также выявление преимуществ применения дрона и обоснование его применения в таких измерениях.

2. Применение дрона в облетном методе антенных измерений

При реализации облетного метода измерений вертолетом вместо самолета, хотя стоимость измерений и снижается, всегда возникают осложнения следующего характера. 1). Измерения следует проводить в месте расположения радара, поскольку характер профиля местности (неровности и угол наклона относительно горизонта) оказывают существенное влияние на формирование диаграммы направленности (ДН) антенной системы. 2). При проведении измерений, которые в зависимости от погодных условий могут занимать более суток, желательно исключить перелеты вертолета на место его основного базирования. 3). Наличие вертолета для измерений иногда осложняется административными проблемами. 4). Воздействие фюзеляжа и винта вертолета на ДН установленной на нем вспомогательной измерительной антенны. Это, в свою очередь, приводит к погрешностям определения направленных свойств испытуемой антенной системы радара. 5). При вертикальном медленном взлете и спуске вертолета, особенно при его зависании, режим работы вертолета является режимом перегруженного состояния его двигателя.

Альтернативой для устранения вышеизложенных осложнений является использование дрона в качестве ЛА [10]. Автоматически исключаются проблемы, связанные с пунктами 1–3. Относительно пункта 4 отметим следующее. Отсутствие в дроне значительных проводящих конструкций, приводящих к ощутимым изменениям характеристик направленности вспомогательной измерительной антенны, исключает необходимость в изготовлении и использовании контейнера, применяемого в случае использования вертолета. Далее, определение направленных свойств уже простой излучающей системы конфигурации «дрон–передатчик–вспомогательная измерительная антенна» предложенным в [11] методом на Земле может быть осуществлено значительно проще, дешевле и с более высокой точностью. По пункту 5 отметим, что режим двигателя вертолета все более затрудняется с увеличением высоты и вертикальный медленный взлет до высоты около 1000 м и такое же снижение – это тяжелая задача для вертолета, а тем более, его зависание на больших высотах. С этой точки зрения, дрон не имеет таких

проблем и он легко совершает вертикальный подъем на заданную в таких пределах высоту и даже легко зависает на такой высоте. Упомянутые возможности дрона создают положительный эффект сокращения времени антенных измерений, смысл которого прояснится в изложенных ниже программах полетов и измерений с помощью дрона.

Способ измерений дроном осуществляется в два этапа. Первый этап, на котором определяется ДН антенной решетки радара по углу места, состоит из трех подэтапов.

Первый подэтап заключается в том, что в передней вертикальной главной (перпендикулярной полотну антенной системы) четвертьплоскости в ее дальней зоне, на расстоянии $R \geq R_{\min}^{FR}$ от нее, дрон совершает вертикальный подъем на относительно большую высоту

$$H_{\max} \approx (1 \rightarrow 2)R_{\min}^{FR} \quad (2)$$

и затем снижается, что изображено на рис. 1а.

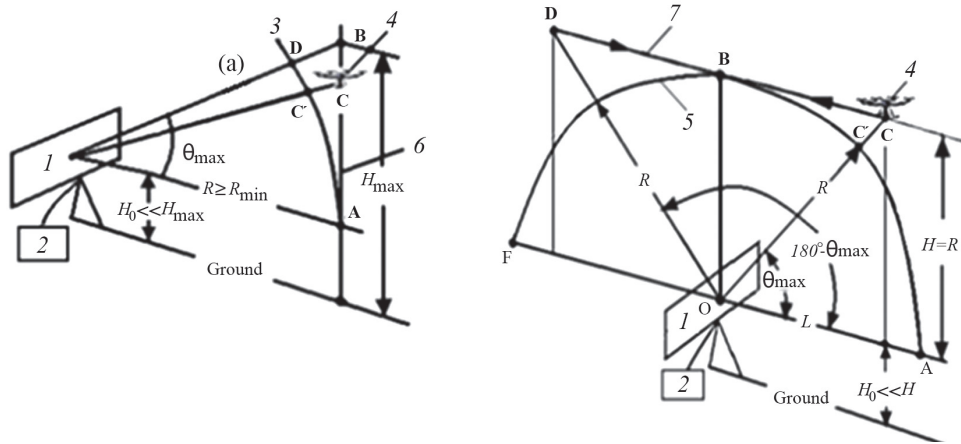


Рис.1. (а) Вертикальный и (б) горизонтальный полет дрона: 1 – полотно антенной системы радара, 2 – приемник радара, 3 – дуга окружности радиуса, 4 – дрон, 5 – полуокружность радиуса R , 6 – траектория вертикального полета дрона, 7 – траектория горизонтального полета дрона.

Во время полета производится регистрация измеренных выходных данных приемника радара для определения ДН по углу места. Максимальный угол $\theta_{\max}$ этого сектора определяется выражением

$$\theta_{\max} = \arctan \frac{H_{\max} - H_0}{R} \approx \arctan \frac{H_{\max}}{R} \quad (3)$$

с учетом того, что высота H_0 центра полотна антенны радара не превышает 10 м от поверхности Земли и $H_0 \ll H_{\max}$. На такой высоте $H_{\max} \approx (1 \rightarrow 2)R_{\min}^{FR}$ обеспечивается определение ДН антенной системы радара по углу места в достаточно большом угловом секторе от 0° до 40° – 60° . Это первое упомянутое выше положительное следствие.

Определение ДН по углу места на этом этапе осуществляется путем пересчета массива данных уровней мощности, поступивших на выход приемника радара. Полученный массив данных программно пересчитывается в массив

данных, соответствующий движению по воображаемой дуге AC'D радиального полета дрона. Для этого уровень мощности сигнала приемника, полученного с точки С дрона, умножается на обратную величину коэффициента ослабления сигнала на расстоянии CC' в свободном пространстве. Пересчитанный массив полученных данных в зависимости от угла места θ определяет ДН по углу места радара в угловом секторе от 0° до $\theta_{\max}$. Момент регистрации уровня мощности выходного сигнала приемника радара привязывается к координатам точки нахождения дрона в полете. Привязка осуществляется синхронизацией времен начала работы компьютера, регистрирующего сигнал приемника радара, и GPS-навигатора на дроне. Далее выполняется та же программа полета дрона и та же программа пересчета массива данных сигнала, но с полетом дрона в задней вертикальной главной четвертьплоскости антенной системы радара.

На третьем подэтапе определяется ДН по углу места в секторе $\theta_{\max} \dots (180^\circ - \theta_{\max})$ оставшихся углов места. Здесь еще раз отметим преимущество использования дрона. Поскольку дрон может спокойно совершать вертикальный большой набор высоты, а значит и большие значения $\theta_{\max}$, то определяемый сектор $\theta_{\max} \dots (180^\circ - \theta_{\max})$ углов ДН сужается. Это позволяет производить измерения для этого сектора не путем многоэтажных горизонтальных полетов, как это делается при использовании вертолета, а в случае с дроном совершать полет только по одному горизонтальному этажу на высоте $R \geq R_{\min}^{FR}$. Следствием этого является сокращение времени измерений. Траектория горизонтального полета дрона для определения ДН по углу места в секторе углов $\theta_{\max} \dots (180^\circ - \theta_{\max})$ показана на рис.1б.

Координаты исходной точки С полета дрона определяются из следующих соображений. Высота Н точки С дрона равна

$$H = R, \quad (4)$$

где R больше минимального расстояния дальней зоны антенны, определяемого выражением (1). Горизонтальная координата L исходной точки С полета дрона равна

$$L = \frac{H}{\tan \theta_{\max}}. \quad (5)$$

Дрон летит из точки С к точке В и в течение этого полета регистрируются данные выходной мощности приемника радара. И снова сигнал, полученный из любой точки расположения дрона на горизонтальном участке, в частности, из точки С, программно пересчитывается, как это описано в предыдущих подэтапах. Аналогичным образом, с помощью GPS-навигатора на дроне, выходной сигнал приемника радара привязывается к координатам точки нахождения дрона во время полета. Таким образом определяется ДН антенной системы радара по углу места в угловом секторе $\theta_{\max} - 90^\circ$. Затем дрон достигнув точки D, разворачивается на 180° и совершает горизонтальный обратный полет до точки В, в ходе которого вышеописанным способом определяется ДН антенной системы радара по углу места в угловом секторе $(180 - \theta_{\max}) - 90^\circ$. На этом завершается первый этап измерений, определяющий ДН антенной системы радара по углу места во всей верхней полуплоскости.

Второй этап процедуры измерений проводится с целью определения азимутальной ДН антенной системы радара. Для этого, после определения направлений $\beta^{(1)}, \beta^{(2)}, \dots, \beta^{(n)}$ максимумов лепестков угломестной ДН, измеряется горизонтальная (азимутальная) ДН в направлении этих максимумов, когда дрон зависает на соответствующих высотах $H^{(1)}, H^{(2)}, H^{(n)}$; $H^{(i)} = H_0 + R \tan \beta(i)$. При этом дрон остается подвешенным на выбранной высоте $H(i)$, а антенная система радара вращается на своем опорно-поворотном устройстве вокруг его вертикальной оси, как показано на рис.2.

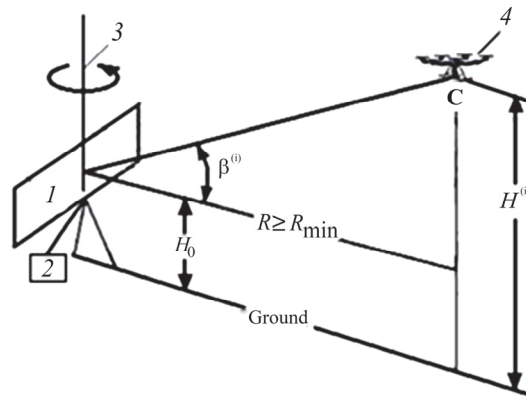


Рис.2. Измерение азимутальной ДН антенной системы радара: 1 – полотно антенной системы радара, 2 – приемник радара, 3 – ось вращения, 4 – дрон в зависшем состоянии.

3. Апробация оснащенного радиоэлектронным оборудованием дрона при облетном методе измерений

Для проверки действенности предложенной методики антенных измерений облетным методом и эффективности применения дрона в качестве ЛА, проводились измерения по определению ДН антенной решетки радара УКВ «Наири». Размеры полотна антенной решетки радара составляют $L_1 \times L_2 \approx (14 \times 4.5)$ м², а минимальное расстояние дальней зоны, согласно (1), равно $R_{\min} \approx 2L_1^2/\lambda \approx 2 \times 14^2/1.5 \approx 260$ м при условии, что рабочая длина волны равна $\lambda \approx 1.5$ м. Для измерения ДН антенной решетки РЛС «Наири» был разработан комплекс радиотехнического оборудования, размещенный на дроне марки «TAROT» с 6-ю моторами. Дрон имеет следующие характеристики: дальность полета около 2 км, грузоподъемность около 3 кг, время полета около 30 мин, средняя скорость около 40 км/час. Размещенный на дроне комплекс радиотехнического оборудования состоял из малогабаритного передатчика размерами $90 \times 65 \times 40$ мм³, весом около 0.5 кг вместе с двумя плечами полуволнового вспомогательного измерительного вибратора и GPS навигатора. Передатчик на основе перестраиваемого синтезатора обеспечивает выходную мощность около 1 Вт в полосе частот $\Delta f = (35-200)$ МГц.

С помощью методики измерения слабонаправленных антенн [11] на соответ-

ствующем измерительном стенде были измерены ДН собранной воедино излучающей системы «дрон+передатчик+вспомогательный полуволновой вибратор+навигатор». Были выполнены измерения ДН в двух плоскостях излучающего полуволнового вибратора такой системы. Результаты подтвердили предположение о несущественных отличиях ДН этой воедино излучающей системы от ДН полуволнового вибратора в свободном пространстве в пределах углов нижней передней Н-четвертьплоскости и для углов в передней Е-полуплоскости.

На рис.3 пунктирной линией показаны *результаты измерений* азимутальных ДН антенной решетки при зависшем состоянии дрона на разных высотах и частотах при следующих параметрах (см. рис.1, 2) облетных измерений. Удаление R дрона от антенной решетки было выбрано $R \approx 400$ м согласно (1), $R = H$ согласно (4), $H_{\max} \approx 700$ м согласно (2), $\theta_{\max} \approx 60^\circ$ согласно (3), $L \approx 230$ м согласно (5).

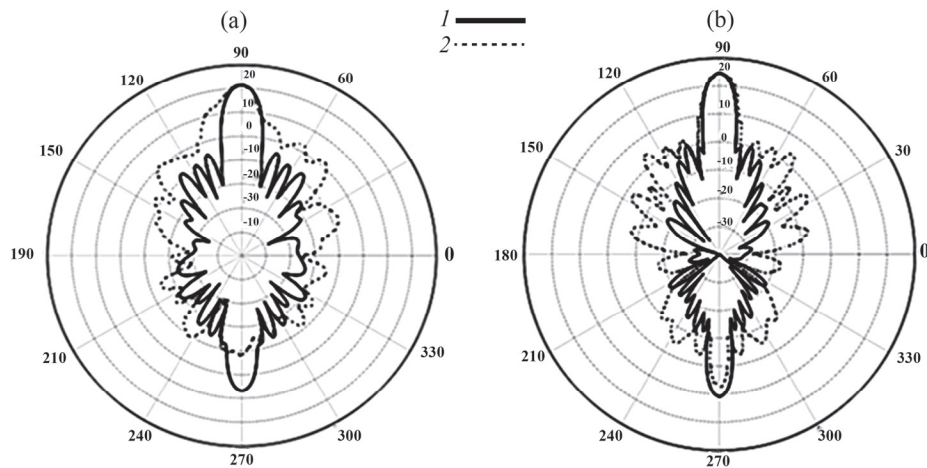


Рис.3. Измеренная азимутальная ДН антенной решетки при (а) зависшем состоянии дрона на высоте $H = 70$ м и на частоте 151 МГц и (б) на высоте $H = 50$ м и на частоте 176 МГц: 1 – результат моделирования, 2 – результат измерения.

На рис.4 пунктирной линией показаны результаты суммарных (по трем подэтапам) измерений ДН антенной решетки по углу места на разных частотах.

Сравнивались результаты измерений и моделирования антенной решетки в условиях отражения волн от поверхности Земли. Моделирование выполнено в программе Altair FEKO®, а его результаты представлены на рис.3 и 4 сплошными линиями. Очевидно, что между этими результатами должна быть небольшая, но ощутимая разница из-за влияния корпуса несущей радар машины и опорно-поворотного устройства антенной решетки. Например, измеренная угловая ширина на уровне половинной мощности основного лепестка, изображенного на рис.3а, составляла 9° , тогда как результат моделирования был равен 8.3° . На рис.3б, соответствующие значения равны 7.5° и 6.8° . Эти сравнения подтверждают достоверность результатов измерений.

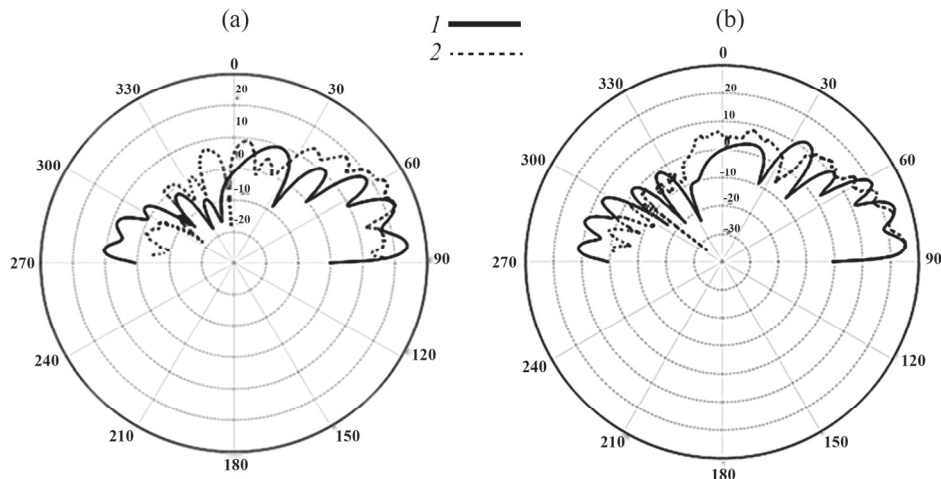


Рис.4. ДН антенной решетки по углу места на частоте (а) 151 МГц и (б) 176 МГц: 1 – результат моделирования, 2 – результат измерения.

4. Заключение

Проведен сравнительный анализ применения дрона в облетном методе антенных измерений для определения направленных свойств антенных систем радаров УКВ. Апробация применения оснащенного радиоэлектронным оборудованием дрона показывают и обосновывают преимущества применения дрона в таких измерениях. Они заключаются в следующем: повышается точность измерений; сокращается время измерений; исключаются всякого рода административные препоны; исключаются строительные подготовительные работы; повышается безопасность измерений из-за исключения в них участия летного персонала; исключаются расходы на оплату летного персонала и на топливный ресурс.

Итогом работы является решение вопросов технического, экономического и социального характеров.

Работа поддержана Госкомитетом по науке республики Армения в рамках исследовательского проекта № 21DP-2B011.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.П. Долуханов. Распространение радиоволн. Москва, Связь, 1972.
2. О.И. Яковлев, В.П. Якубов, В.П. Урядов, А.Г. Павельев. Распространение радиоволн. Москва, 2017.
3. A.S. Saakian. Radio Wave Propagation Fundamentals. Artech House, 2020.
4. А.М. Сомов, В.В. Старостин, Р.В. Кабетов. Антенно-фидерные устройства. Москва, Горячая линия, 2017.
5. IEEE Standard Test Procedures for Antennas. IEEE Std. 149, Published by IEEE Inc., 1979.
6. Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев. Устройства СВЧ и антенны. Москва, Радиотехника, 2006.
7. V.H. Avetisyan, M.V. Markosyan, A.A. Nikoghosyan, A.A. Sargsyan. Patent №2814A,

- Armenia, G01R 29/00, 2014.
8. **H. Brueckman.** Electronics, **11**, 134 (1955).
 9. **G.E. Barker.** IEEE Transaction on Antennas and Propagation, **AP-21**, 538 (1973).
 10. **В.Г. Аветисян, М.В. Маркосян, А.Г. Мартиросян, А.К. Агаронян.** Бюллетень
Высоких Технологий, №3, 30 (2020).
 11. **В.Г. Аветисян, А.К. Агаронян, А.А. Саргсян.** Вестник ГИУА, №1, 78 (2014).

ԴՐՈՆԻ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ ՈՒԼՏՐԱԿԱՐՃ ՄԵՏՐԱՅԻՆ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ՏԻՐՈՒՅԹԻ
ՌԱԴԱՐՆԵՐԻ ՇՐՋԱԴԻՐ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ԱՆՏԵՆԱՅԻՆ ՉԱՓՈՒՄՆԵՐՈՒՄ

Մ.Վ. ՄԱՐԿՈՍՅԱՆ, Վ.Հ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Ա.Գ. ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ, Հ.Գ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ,
Է.Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Գ.Զ. ՍՈՒՂՅԱՆ, Ռ.Ա. ԴԱՎԹՅԱՆ

Անտենային չափումների այս եղանակի իրականացման համար առաջարկվում է օգտագործել դրոնը որպես թռչող սարք: Դրոնի թռիչքները ծրագրային կառավարվում են և այն համալրված է միասնականացված ռադիոէլեկտրոնային սարքավորմամբ, որը պարունակում է հաղորդիչ, կեսաալիքային տատանակ և GPS նավիգատոր: Անտենային համակարգի ուղղորդվածության հատկությունների պարամետրերը ռադարային ընդունիչի էլքային ազդանշանների ծրագրային մշակման արդյունք են՝ որոնք համաժամանակացված են դրոնի թռիչքների հետագծերի կետերի կոորդինատների հետ:

APPLICATION OF A DRONE IN THE ON-SITE ANTENNA MEASUREMENTS OF THE RADAR OF AN ULTRASHORT METER WAVEBAND

M.V. MARKOSYAN, A.H. AVETISYAN, A.K. AHARONYAN, H.G. MARTIROSYAN,
E.A. HARUTYUNYAN, G.Z. SUGHYAN, R.A. DAVTYAN

The implementation of a drone as an aerial vehicle to realise the antenna measurement method is considered. The flights of the drone are programmatically controlled and it is equipped with a unified radio-electronic equipment containing a transmitter, a half-wave vibrator and a GPS navigator. The parameters of the directional properties of the antenna system are the result of software processing of the radar receiver output signals, which are synchronized with the coordinates of the points of the drone flight trajectories.