

УДК 621.396.96

АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА DJI PHANTOM 3 PRO

Е Каунг Мьят, магистрант

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Институт информационных технологий,
г. Минск, Республика Беларусь*

Храменков А. С. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В статье представлены результаты исследования статической эффективной площади рассеяния (ЭПР) малоразмерного беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 3 PRO для частот 3, 9,3 и 12 ГГц на линейной горизонтальной и вертикальной поляризациях. Исследование ЭПР проводилось методом электродинамического моделирования с использованием специализированного пакета программ CST STUDIO SUITE 2019. В результате анализа отражающих свойств беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 3 PRO получены диаграммы обратного вторичного излучения, вычислено среднее значение ЭПР, по критерию согласия Колмогорова-Смирнова и информационному критерию Акаике оценен вид закона распределения ЭПР.

Ключевые слова. Эффективная площадь рассеяния, малоразмерный беспилотный летательный аппарат, диаграмма обратного вторичного излучения, закон распределения.

Введение.

Радиолокаторы играют важную роль в системе противодействия беспилотным летательным аппаратам (БЛА) и обладают рядом преимуществ по сравнению с другими средствами разведки. Вместе с этим радиолокационное обнаружение малоразмерных БЛА сильно затруднено по причине малых значений эффективной площади рассеяния (ЭПР), низких скоростей и высот полета БЛА, интенсивного потока отражений от других объектов (птицы, гидрометеоры, «ангел-эхо»), мощных отражений от подстилающей поверхности и местных предметов. Сложности, возникающие при радиолокационном наблюдении малоразмерных БЛА, в значительной степени повысили интерес к исследованию их радиолокационных характеристик [1].

В рамках научных исследований проводился анализ статической ЭПР малоразмерного БЛА DJI Phantom 3 PRO. Исследования проводились на частотах 3, 9,3, 12 ГГц на линейной горизонтальной и вертикальной поляризациях относительно строительной оси БЛА.

Основная часть.

Отражающие свойства радиолокационной цели принято характеризовать ЭПР. Эффективная площадь рассеяния σ_u определяется как площадь некоторого фиктивного изотропного отражателя, который, будучи помещенным на место цели, равномерно рассеивает всю падающую на него мощность и создает на раскрытие приемной антенны такую же плотность потока мощности, что и сама цель [2]. В качестве фиктивного изотропного отражателя могут выступать эталонные отражатели с известными значениями ЭПР (сфера, пластина и т.д.). Для оценивания значения ЭПР цели наибольшее распространение получили следующие способы: экспериментальный, полужатиментальный и математическое моделирование.

Экспериментальный способ измерения ЭПР целей реализуется на полигонах и имеет ряд особенностей. Летным испытаниям предшествуют наземные, на которых выполняются измерения ЭПР при различных углах наблюдения цели. Зависимость ЭПР цели от ее ориентации относительно радиолокатора называют диаграммой обратного вторичного излучения (ДОВИ). При условии, что радиолокатор, используемый для измерения ЭПР, обеспечивает возможность определения напряженности электрического поля отраженного сигнала от эталонной (E_0) и испытываемой (E_u) целей, а также при наличии априорных данных об эталонном объекте, расположенном на полигоне, экспериментальная оценка статической ЭПР цели (σ_u) формируется в соответствии с выражением:

$$\sigma_u = \sigma_0 \cdot \left(\frac{R_u}{R_0} \right)^2 \frac{E_u^2}{E_0^2} \quad (1),$$

где σ_0 – априорно известное значение ЭПР эталонного отражателя; R_u – расстояние от антенны до цели; E_u^2 – квадрат напряженности электрического поля отраженного от цели сигнала у раскрытия приемной антенны; R_0 – расстояние от антенны до эталонного отражателя; E_0^2 – квадрат напряженности электрического поля отраженного сигнала от эталонного отражателя у раскрытия приемной антенны.

Следует отметить, что при оценивании статической ЭПР объекта в полигонных условиях обязательно необходимо учитывать отражения от земной поверхности, потери энергии из-за

затухания радиоволн при распространении их на расстояния до эталонной (R_0) и испытуемой целей (R_u).

Измерение ЭПР полуэкспериментальным способом предполагает наличие безэховой камеры и соответствующих моделей объектов наблюдения. Данные методы являются дорогостоящими и требуют длительного времени подготовки и калибровки измерений.

На современном этапе развития средств вычислительной техники наименее трудоемким способом оценивания ЭПР является метод математического моделирования. Расчет ЭПР производится в системе электромагнитного моделирования, представляющей собой универсальный или узконаправленный пакет моделирования. Результаты расчета ЭПР, полученные таким образом, являются приближенными, однако, как правило, их точности достаточно для разработки и настройки моделей устройств радиолокационного наблюдения.

В рамках исследований ЭПР малоразмерного БЛА DJI Phantom 3 PRO использовался специализированный пакет программ CST STUDIO SUITE 2019 компании CST [3]. Проведение электродинамического моделирования предполагало наличие трехмерной (3D) модели малоразмерного БЛА. Соответствующая модель БЛА была взята с веб-сайта GrabCAD.com.

В результате моделирования получены ДОВИ для горизонтальной (HH), вертикальной (VV) поляризаций зондирующего сигнала на частоте 3, 9,3 12 ГГц при различных углах наблюдения. В качестве примера на рисунке 1 представлен внешний вид ДОВИ БЛА DJI Phantom 3 PRO для угла наблюдения $\theta = 110^\circ$ и трех частот зондирующего сигнала (ЗС).

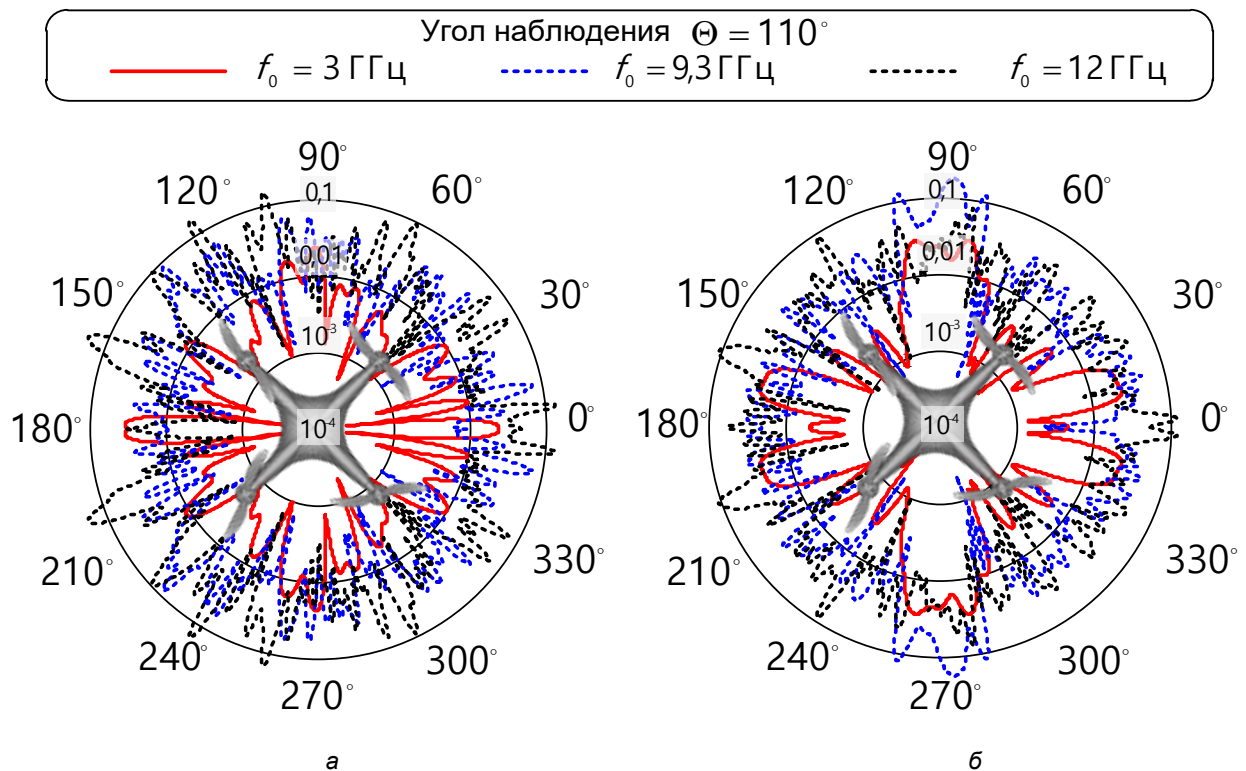


Рисунок 1 – ДОВИ МБЛА DJI Phantom 3 PRO:

а – горизонтальная поляризация,
б – вертикальная поляризация

Анализ представленных результатов показывает, что форма диаграммы обратного вторичного излучения БЛА имеет изрезанный характер. При этом ширина лепестка ДОВИ с увеличением частоты уменьшается. Кроме того, численное значение ЭПР на частоте 3 ГГц значительно ниже, чем на частотах 9,3 и 12 ГГц. Это связано с тем, что соотношение длины волны и геометрических размеров БЛА носит Рэлеевский характер изменения ЭПР. При увеличении частоты ЗС происходит переход в резонансную область [2], что подтверждается соответствующим увеличением значений ЭПР на частотах 9,3 и 12 ГГц.

В рамках исследований ЭПР БЛА DJI Phantom 3 PRO были получены ДОВИ для различных углов наблюдения для трех частот ЗС. На рисунке 2 представлен внешний вид ДОВИ для 3, 9,3 и 12 ГГц на линейной горизонтальной и вертикальной поляризациях.

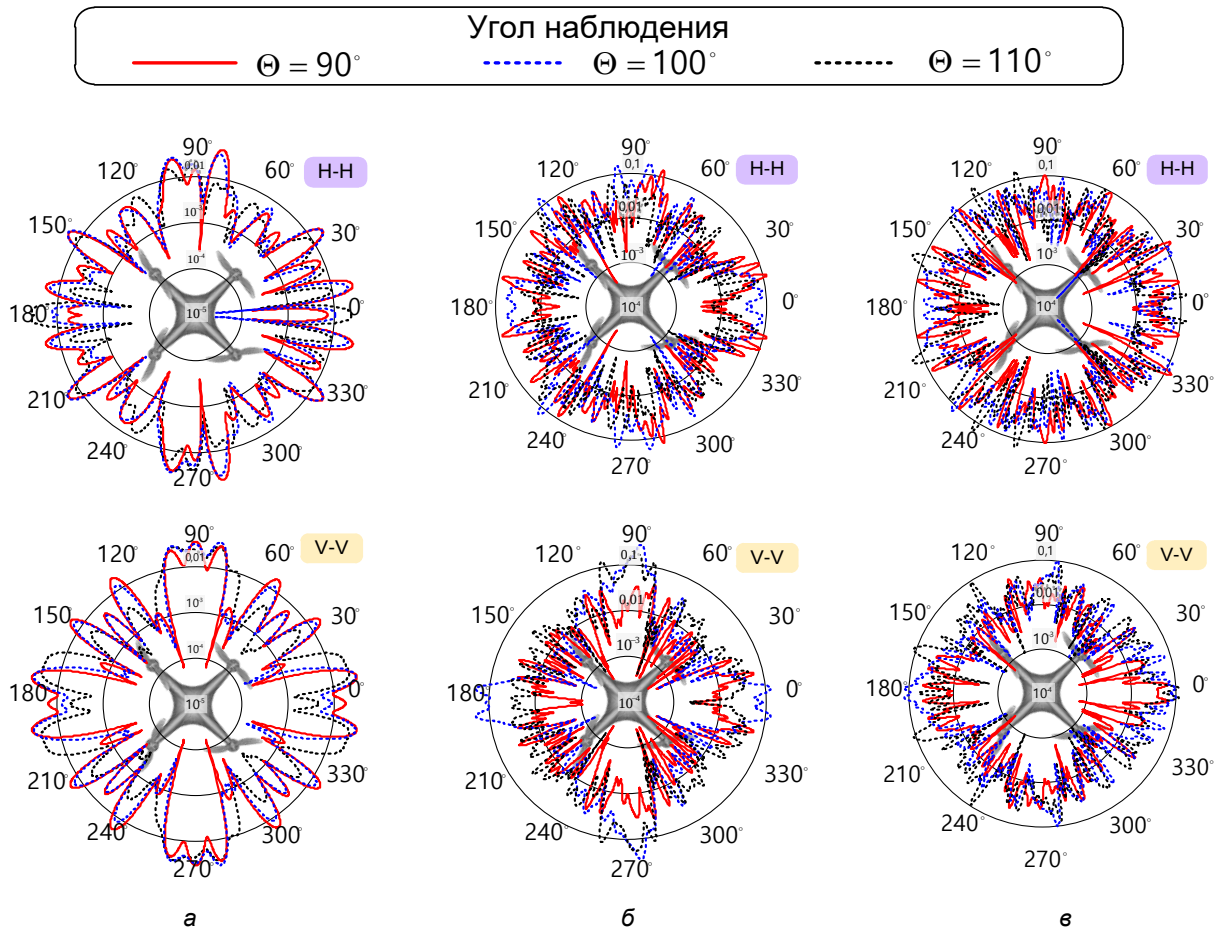


Рисунок 2 – ДОВИ МБЛА DJI Phantom 3 PRO:
а – 3 ГГц, б – 9,3 ГГц, в – 12 ГГц

Полученные результаты показали, что изменение угла наблюдения незначительно влияют на форму ДОВИ и значения ЭПР на 3 ГГц. На более высоких частотах за счет резонансного характера ЭПР наблюдаются всплески и незначительное перераспределение максимумов. При этом среднее значение ЭПР DJI Phantom 3 PRO для двух поляризаций составило: $0,0085 \text{ м}^2$ – 3 ГГц, $0,022 \text{ м}^2$ – 9,3 ГГц, $0,027 \text{ м}^2$ – 12 ГГц.

Поскольку угловое положение радиолокационной цели в пространстве (в вертикальной и горизонтальной плоскостях) можно считать случайным, то и величина ЭПР в каждый отдельный момент времени радиолокационного наблюдения является случайной. Законы распределения этой случайной величины можно определить по рассчитанным (или экспериментально снятым) ДОВИ путем построения соответствующих гистограмм распределения. Гистограмма распределения является наиболее полной характеристикой случайной величины ЭПР.

В интересах анализа закона распределения ЭПР малоразмерного БЛА DJI Phantom 3 PRO, на основании полученных ДОВИ, были построены гистограммы распределения ЭПР. На рисунке 3 представлен внешний вид гистограмм распределения (получены на основании значений ЭПР, полученных методом электродинамического моделирования) и гипотетических плотностей распределения вероятности [4].

Степень соответствия гистограммы и гипотетической плотности распределения вероятности (ПРВ) оценивалась предварительно в соответствии с критерием согласия Колмогорова-Смирнова [5]. Статистика критерия определяется выражением:

$$D_{\sigma} = \max_{\sigma_i} |F_{\sigma}(\sigma_i) - F_{\text{теор}}(\sigma_i, \theta)| \quad (2),$$

где $F_{\sigma}(\sigma_i)$ – дискретные отсчеты эмпирической функции распределения ЭПР; $F_{\text{теор}}(\sigma_i, \theta)$ – дискретные отсчеты теоретической функции распределения ЭПР; θ – вектор параметров, определяемый в соответствии с теоретической функцией распределения.

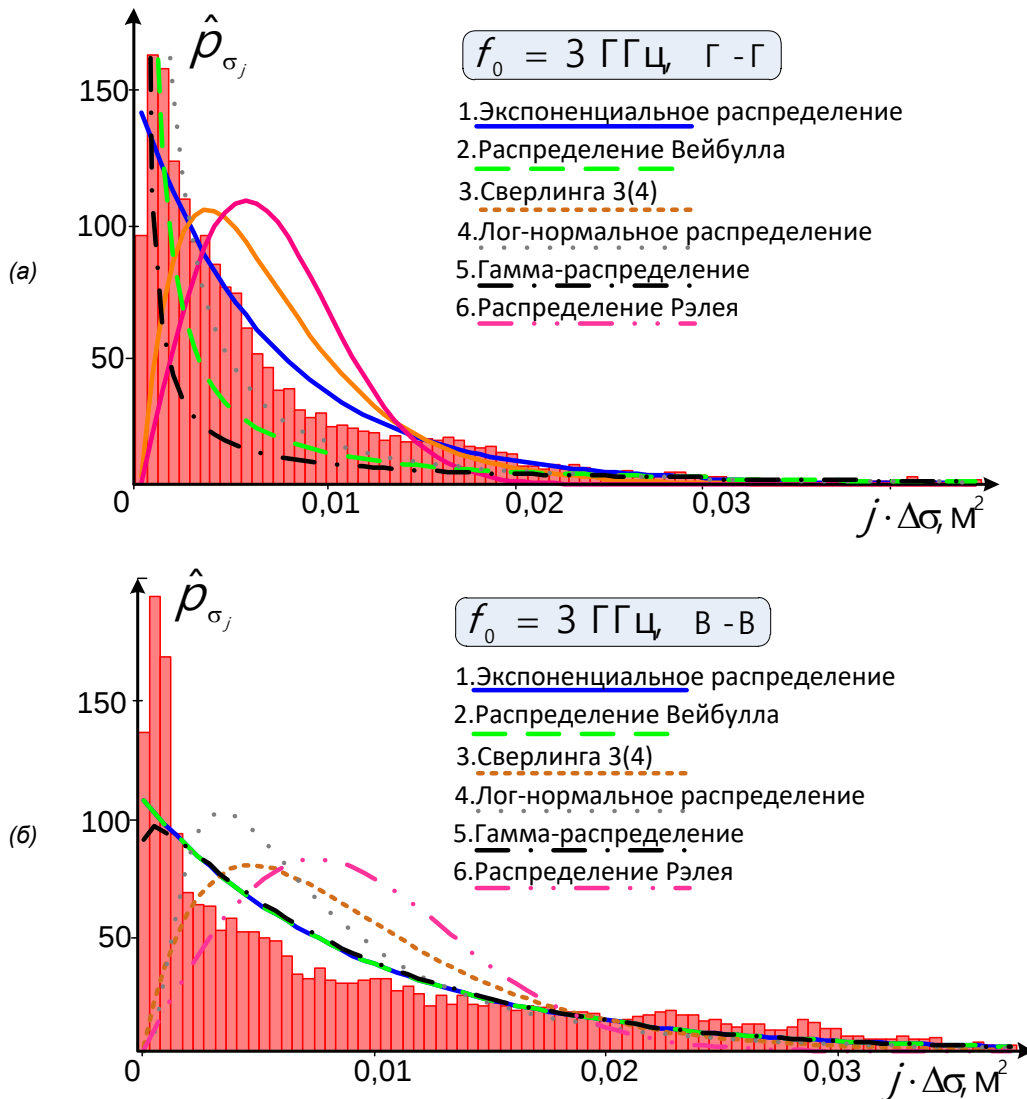


Рисунок 3 – Внешний вид гистограмм распределения ЭПР БЛА DJI Phantom 3 PRO и гипотетические плотности вероятности:

а – горизонтальная поляризация, б – вертикальная поляризация

Полученная в соответствии с (2) статистика сравнивалась с критическим значением $\lambda_{\text{крит}}$:

$$\lambda_{\text{крит}} = \sqrt{\frac{\ln(\frac{2}{\alpha})}{2K}} \quad (3),$$

где α – уровень значимости критерия, K – длина выборки.

В том случае, если полученная статистика D_σ (2) была меньше критического значения $\lambda_{\text{крит}}$ (3), то выдвинутая гипотеза о виде ПРВ принималась, в противном случае – отвергалась.

При оценивании вида закона распределения ЭПР БЛА DJI Phantom 3 PRO, исходя из заданного уровня значимости $\alpha = 0,01$, были рассчитаны критические значения применительно к выборкам, полученным при электродинамическом моделировании в CST STUDIO SUITE 2019 ($\lambda_{\text{крит}} = 0,182$).

В качестве критерия окончательного выбора вида ПРВ, наиболее точно описывающего гистограмму, а также определения оптимальных значений параметров ПРВ использовался информационный критерий Акаике, вычисляемый в соответствии с выражением [6]:

$$AIK = k + N \sum_{i=1}^N \ln[p(\sigma_i) + h_i]^2 \quad (4),$$

где k – количество параметров модели; N – количество интервалов группировки для построения гистограммы отсчетов ДОВИ; $p(\sigma_i)$ – значение теоретической аппроксимирующей ПРВ для значения ЭПР σ_i ; h_i – значение гистограммы на i -м интервале группировки.

В таблице 1 представлены результаты оценивания вида закона распределения ЭПР МБЛА DJI Phantom 3 PRO по критерию согласия Колмогорова-Смирнова и информационному критерию Акаике.

Таблица 1 – Результаты оценивая ПРВ ЭПР БЛА DJI Phantom 3 PRO

Частота (поляризация)	ПРВ	Параметры ПРВ
3 ГГц (горизонтальная)	Экспоненциальная	$a = 141,3$
3 ГГц (вертикальная)	Экспоненциальная	$a = 106,4$
9,3 ГГц (горизонтальная)	Экспоненциальная	$a = 42,7$
9,3 ГГц (вертикальная)	Гамма	$\lambda = 23,1, \alpha = 0,5$
12 ГГц (горизонтальная)	Экспоненциальная	$a = 31,5$
12 ГГц (вертикальная)	Экспоненциальная	$a = 48,9$

Заключение.

В результате проведенных исследований были получены диаграммы обратного вторичного излучения, вычислен диапазон средних значений ЭПР $\sigma_{\text{ср}} = 0,007 - 0,032 \text{ м}^2$ для БЛА DJI Phantom 3 PRO. Такой разброс значений вызван тем, что на частоте 3С 3 ГГц ЭПР имеет Рэлеевский характер изменения, а на частотах 9,3 и 12 ГГц наблюдается резонансный характер ЭПР. По критериям согласия Колмогорова-Смирнова и Акаике оценен вид ПРВ ЭПР. Полученная гистограмма распределения ЭПР наиболее согласуется с показательным законом распределения, что соответствует моделям Сверлинга 1(2).

Представленные результаты могут быть использованы в интересах оценивания потенциальной дальности обнаружения малоразмерных БЛА, формирования математической модели радиолокационной цели типа малоразмерный БЛА, а также для анализа отличительных признаков малоразмерных БЛА с целью их селекции на фоне других воздушных объектов и помех.

Список использованных источников

1. Костромицкий С.М., Нефедов Д.С., Храменков А.С., Чигряй В.Г. Статистические модели флуктуаций эффективной поверхности рассеяния малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 3 С. 24–36.
2. Охрименко, А. Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч. 1. Основы радиолокации / А. Е. Охрименко. – М. : Воен. издат., 1983. – 456 с.
3. Курушин, А.А. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio / А.А. Курушин, А.Н. Пластиков. – Москва: Издательство МЭИ, 2011. – 155 с..
4. Вадзинский, Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р. Н. Вадзинский. – СПб. : Наука, 2001. – 295 с.
5. Лемешко, Б.Ю. Непараметрические критерии согласия / Б.Ю. Лемешко. – Москва: «ИНФРА-М», 2014. – 163 с.
6. Akaike H. A new look at the statistical model identification // IEEE Trans. on Automatic Control, 1974, Vol. 19, № 6. – P. 716–723.

UDC 621.396.96

ANALYSIS OF STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THE RADAR CROSS SECTION OF THE SMALL-SIZED DJI PHANTOM 3 PRO UNMANNED AERIAL VEHICLE WORK

*E Kuang Myat, master's student**Institute of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus**Khramiankou A. S. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

Annotation. Results of research of the static Radar cross section (RCS) of the small-sized DJI Phantom 3 PRO unmanned aerial vehicle for frequencies of 3, 9.3 and 12 GHz on linear horizontal and vertical polarization are presented in the report. Research RCS was conducted by method of electrodynamic modeling with use of the specialized CST STUDIO SUITE 2019 software package. As a result of the analysis of the reflecting properties of the DJI Phantom 3 PRO unmanned aerial vehicle, charts of the return secondary radiation are received, the RCS average value is calculated, by criterion of consent of Kolmogorov-Smirnov and information criterion of Akaike the type of the distribution law of RCS is estimated.

Keywords. Radar cross section, mall-sized unmanned aerial vehicle, secondary backscatter radiation diagram, probability distribution law.