

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЙНИЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА SKYWALKER-X8

Е КУАНГ МЬЯТ¹

¹Институт информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (ИИТ БГУИР)
(г. Минск, Республика Беларусь)

E-mail: myatnyarna3714@gmail.com

Аннотация. В докладе представлены результаты исследования статической эффективной площади рассеяния (ЭПР) малоразмерного беспилотного летательного аппарата Skywalker-X8 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 отражательных свойств беспилотного летательного аппарата Skywalker-X8 получены диаграммы обратного вторичного излучения, в соответствии с критерием согласия Колмогорова-Смирнова и информационным критерием Акаике оценен вид закона распределения ЭПР и его параметры.

Abstract. The report presents the results of a study on the static radar cross-section (RCS) of the small unmanned aerial vehicle (UAV) Skywalker-X8 at frequencies of 3, 9.3, and 12 GHz using linear horizontal and vertical polarizations. The RCS investigation was conducted through electromagnetic modeling using the specialized software package CST STUDIO SUITE 2019. As a result of the analysis of the reflective properties of the Skywalker-X8 UAV, backscattering diagrams were obtained. Additionally, the Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit criterion and the Akaike information criterion were used to assess the distribution type of the RCS and its parameters.

Введение

Рост количества малоразмерных БЛА, используемых в гражданских, коммерческих и военных целях, увеличивает риски их несанкционированного применения в охраняемых зонах и зонах запрета полетов (аэропорты, критически важные объекты инфраструктуры и зоны боевых действий). Радиолокаторы играют важную роль в системе противодействия БЛА и обладают рядом преимуществ по сравнению с другими средствами разведки. В связи с этим задача оценивания ЭПР становится важной для повышения эффективности радиолокационных систем контроля воздушного пространства. В рамках научных исследований проводился анализ статической ЭПР малоразмерного БЛА Skywalker-X8. 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 эффективной площадью рассеяния (ЭПР). Эффективная площадь рассеяния σ_{eff} 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, полужэкспериментальный и математическое моделирование.

Процесс измерения ЭПР целей на полигонах 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). Полагается, что радиолокатор, используемый для измерения ЭПР, обеспечивает возможность определения напряженности электрического поля отраженного сигнала от эталонной (E_0) и испытуемой ($E_{\text{ц}}$) целей, а отражения от земной поверхности при этих измерениях отсутствуют, потери энергии из-за затухания радиоволн при распространении их на расстояния до эталонной (R_0) и испытуемой целей $R_{\text{ц}}$ отсутствуют.

При наличии априорных данных об эталонном объекте, расположенном на полигоне, экспериментальная оценка статической ЭПР цели ($\sigma_{\text{ц}}$) формируется в соответствии с выражением:

$$\sigma_{\text{ц}} = \sigma_0 \cdot \left(\frac{R_{\text{ц}}}{R_0} \right)^2 \frac{E_{\text{ц}}^2}{E_0^2}, \quad (1)$$

где σ_0 – априорно известное значение ЭПР эталонного отражателя;

$R_{\text{ц}}$ – расстояние от антенны до цели;

$E_{\text{ц}}^2$ – квадрат напряженности электрического поля отраженного от цели сигнала у раскрыва приемной антенны;

R_0 – расстояние от антенны до эталонного отражателя;

E_0^2 – квадрат напряженности электрического поля отраженного сигнала от эталонного отражателя у раскрыва приемной антенны.

Измерение ЭПР полуэкспериментальным способом предполагает наличие безэховой камеры и соответствующих моделей объектов наблюдения. В качестве моделей цели при этом используются уменьшенные в m раз копии реальных объектов, где m – коэффициент масштабирования. При расчете ЭПР полуэкспериментальным способом ($\sigma'_{\text{ц}}$), когда модель цели представляет собой уменьшенную в m раз копию реального объекта, для удовлетворения принципа подобия, длину волны также уменьшают в m раз. В конечном счете, значение ЭПР модели объекта должно быть пересчитано в ЭПР реальной цели: $\sigma_{\text{ц}} = m^2 \cdot \sigma'_{\text{ц}}$.

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, их точности достаточно для разработки и настройки моделей устройств радиолокационного наблюдения.

В рамках исследований измерение ЭПР малоразмерного БЛА Skywalker-X8 использовался специализированный пакет программ CST STUDIO SUITE 2019 компании CST [3]. Проведение электродинамического моделирования предполагало наличие трехмерной (3D) модели малоразмерного БЛА. Соответствующая модель БЛА Skywalker-X8 была взята с веб-сайта GrabCAD.com.

На рисунке 1 представлен внешний вид БЛА Skywalker-X8 и его трехмерная модель.



Рис. 1. Внешний вид БЛА Skywalker-X8 и его трехмерная модель

В результате моделирования были получены ДОВИ на горизонтальной (НН), вертикальной (VV) поляризациях зондирующего сигнала для частот 3, 9,3 12 ГГц при различных углах наблюдения БЛА в вертикальной плоскости. В качестве примера, на рисунке 2 представлен внешний вид ДОВИ БЛА Skywalker-X8 для угла наблюдения $\Theta = 110^\circ$ и трех частот зондирующего сигнала (ЗС).

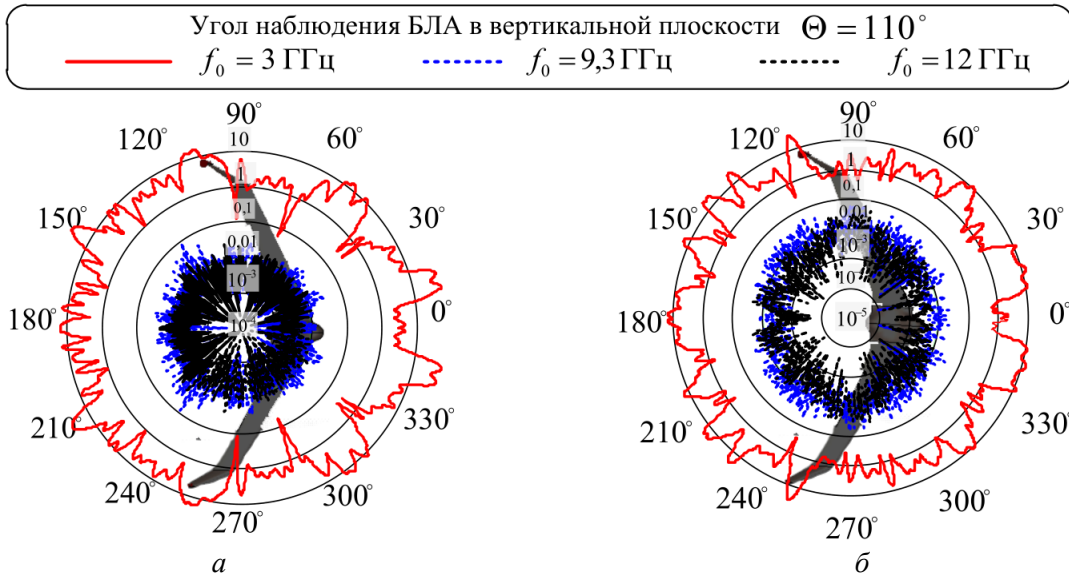


Рис. 2. ДОВИ МБЛА Skywalker-X8 (а – горизонтальная поляризация, б – вертикальная поляризация)

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 3 ГГц значительно выше, поскольку геометрические размеры БЛА и длина волны соотносятся таким образом, что наблюдается резонансный всплеск значения ЭПР. При увеличении частоты ЗС происходит переход в оптическую область и соответственно для частот 9,3 и 12 ГГц значения ЭПР сходятся [2].

В процессе исследований ЭПР МБЛА были получены ДОВИ для различных углов наблюдения в вертикальной плоскости и трех частот ЗС. На рисунке 3 представлен внешний вид ДОВИ для 3, 9,3 и 12 ГГц на линейной горизонтальной и вертикальной поляризациях.

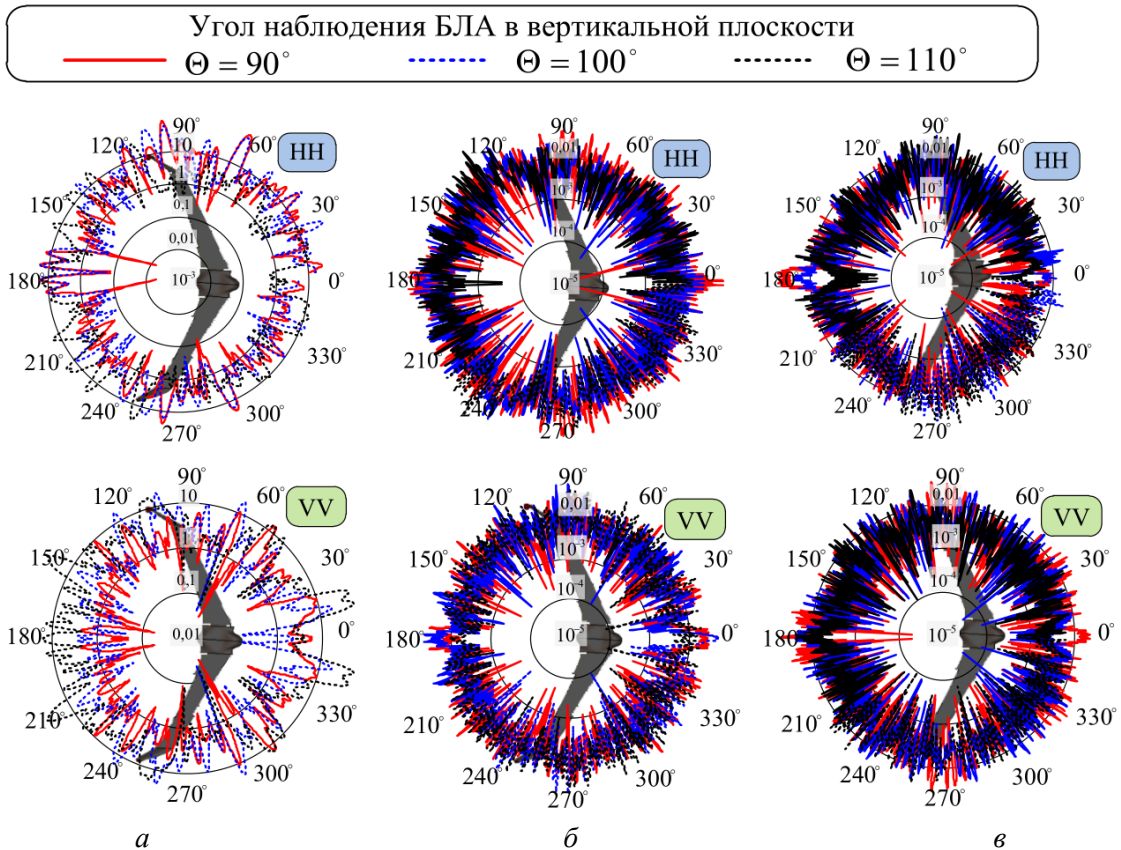


Рис. 3. ДОВИ МБЛА Skywalker-X8 (а – 3 ГГц, б – 9,3 ГГц, в – 12 ГГц)

Полученные результаты свидетельствуют, что изменение угла наблюдения незначительно влияют на форму ДОВИ на более высоких частотах, тогда как на 3 ГГц наблюдаются значительные всплески. При этом, среднее значение ЭПР БЛА Skywalker-X8 на двух поляризациях составило: 4,4 м² – 3 ГГц, 0,01 м² – 9,3 ГГц, 0,05 м² – 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 Skywalker-X8, на основании полученных при проведении исследований ДОВИ, были построены гистограммы распределения ЭПР БЛА Skywalker-X8.

На рисунке 4 представлен внешний вид эмпирических гистограмм (получены методом электродинамического моделирования) и гипотетических плотностей распределения [4] для частоты ЗС 12 ГГц.

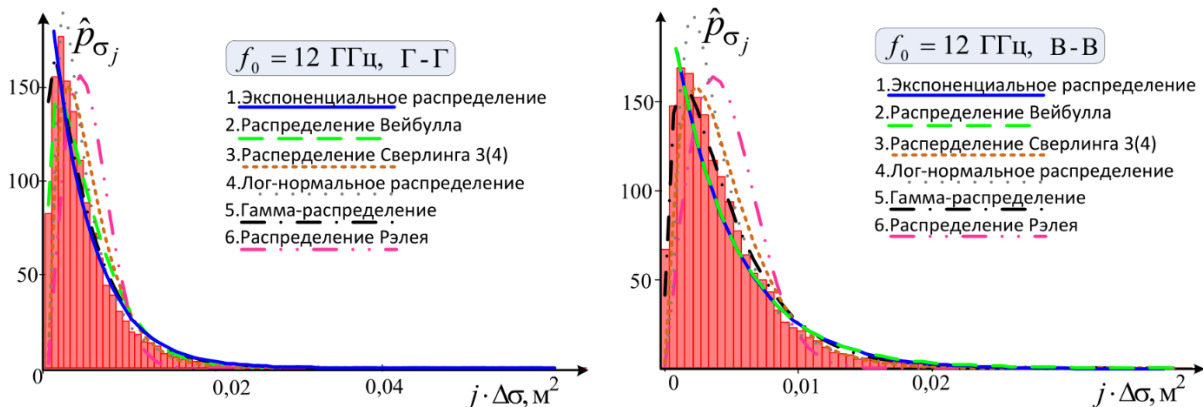


Рис. 4. Внешний вид гистограмм распределения ЭПР БЛА Skywalker-X8 и гипотетические плотности вероятности

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

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

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.

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

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

где α – уровень значимости критерия;

K – длина выборки.

В том случае, если полученная статистика D_{σ} (2) меньше критического значения $\lambda_{\text{крит}}$ (3), то выдвинутая гипотеза о виде ПРВ принимается, в противном случае – отвергается.

При оценивании вида закона распределения ЭПР БЛА Skywalker-X8, 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 окончательно выбора вида ПРВ, наиболее точно описывающего гистограмму, а также определения оптимальных значений параметров ПРВ использовался информационный критерий Акаике, вычисляемый в соответствии с выражением [6]:

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

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 БЛА Skywalker-X8 по критерию согласия Колмогорова-Смирнова и информационному критерию Акаике.

Таблица 1. Результаты оценивая ПРВ ЭПР БЛА Skywalker-X8

Частота (поляризация)	ПРВ	Параметры ПРВ
3 ГГц (горизонтальная)	Экспоненциальная (Сверлинга 1(2))	$a = 0,247$
3 ГГц (вертикальная)	Экспоненциальная (Сверлинга 1(2))	$a = 0,209$
9,3 ГГц (горизонтальная)	Экспоненциальная (Сверлинга 1(2))	$a = 95,854$
9,3 ГГц (вертикальная)	Сверлинга 3(4)	$a = 233,355$
12 ГГц (горизонтальная)	Экспоненциальная (Сверлинга 1(2))	$a = 205,129$
12 ГГц (вертикальная)	Сверлинга 3(4)	$a = 431,437$

Использование моделей Сверлинга для описания плотности распределения вероятности ЭПР малоразмерного БЛА Skywalker-X8 облегчает разработку алгоритмов для обнаружения и классификации БЛА в сложных условиях помех.

Заключение

В докладе представлены результаты анализа статической эффективной площади рассеяния малоразмерного БЛА Skywalker-X8. Исследования ЭПР проводились методом электродинамического моделирования для частот 3, 9,3 и 12 ГГц на линейной горизонтальной и вертикальной поляризациях. Электродинамическое моделирование осуществлялось на основе имеющейся 3D модели БЛА Skywalker-X8 с использованием специализированного пакета программ CST STUDIO SUITE 2019.

В результате проведенных исследований ЭПР БЛА Skywalker-X8 были получены диаграммы обратного вторичного излучения, вычислено среднее значение ЭПР $\sigma_{cp} = 0,005-4,4\text{ м}^2$. Такой разброс значений вызван тем, что на частоте 3С 3 ГГц наблюдается резонансное повышение значений ЭПР, а на 9,3 и 12 ГГц значение ЭПР стремиться к постоянному значению вследствие перехода в оптическую область. Оценен вид ПРВ ЭПР по критериям согласия Колмогорова-Смирнова и Акаике. Полученная гистограмма распределения ЭПР наиболее согласуется с показательным законом распределения, однако на более высоких частотах (9,3 и 12 ГГц) на линейной вертикальной поляризации наблюдается соответствие моделям Сверлинга 3(4). 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.