

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.7.7>

УДК: 621.396.96

## **МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СОЧЕТАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

**С.А. Климов, А.В. Обысов, Е.С. Битаев, А.А. Калачева**

**Военная ордена Кутузова академия войсковой противовоздушной обороны  
Вооруженных Сил Российской Федерации  
имени Маршала Советского Союза А.М.Василевского  
214027, Смоленск, ул. Котовского, 2**

Статья поступила в редакцию 30 марта 2025 г.

**Аннотация.** Рассмотрен метод оценивания характеристик эффективной площади рассеяния сложных объектов в основу которого положены создание трехмерных моделей объектов и последующее компьютерное электродинамическое моделирование их вторичного излучения. Практическая реализация метода представлена на примере оценивания характеристик эффективной площади рассеяния одного из распространенных типов малоразмерного беспилотного летательного аппарата в S-диапазоне частот. Отличительными особенностями предложенного метода являются: учет диэлектрических свойств материалов объектов при проведении электродинамического моделирования, применение вейвлет-фильтрации при обработке экспериментальных данных с целью повышения отношения сигнала к шуму, а также этап проверки сходимости результатов моделирования, в смысле заданных критериев, с данными контрольных натуральных экспериментов. В результате исследований установлено, что для выбранного типа малоразмерного беспилотного летательного аппарата совпадение законов

опытных распределений эффективной площади рассеяния по результатам моделирования и контрольных натуральных экспериментов произошло в 90 % случаев. Совпадение медианных значений эффективной площади рассеяния было обеспечено с точностью не хуже 3 дБ. Опираясь на теорию подобия и моделирования, предложенный подход позволяет переходить к разработке и созданию серии моделей сложных объектов, обладающих признаками подобия. При этом возможно получение большого объема статистических данных по закономерностям их вторичного излучения без проведения натуральных экспериментов, влекущих за собой большие экономические и организационные затраты.

**Ключевые слова:** метод, вторичное излучение радиоволн, радиолокационная система, эффективная площадь рассеяния, беспилотный летательный аппарат, компьютерное моделирование, закон опытного распределения, медианное значение, критерий согласия.

**Автор для переписки:** Климов Сергей Анатольевич, [zuk\\_house@rambler.ru](mailto:zuk_house@rambler.ru)

## Введение

Одним из основных физических явлений, лежащих в основе активной радиолокации, является вторичное излучение радиоволн от объектов. При этом важной энергетической характеристикой вторичного излучения объекта является его эффективная площадь рассеяния (ЭПР). Знание ЭПР объекта имеет важнейшее значение для разработки радиолокационных систем (РЛС). Например, если известна средняя величина ЭПР объекта, то при заданных технических характеристиках РЛС это позволяет оценить рубежи их обнаружения и сопровождения. Кроме того, исследование характеристик ЭПР объектов необходимо для решения задач синтеза и анализа систем селекции и распознавания объектов, защиты от помех и других. Поэтому наличие достоверных данных о закономерностях изменения характеристик ЭПР объектов позволяет обоснованно подходить к формированию облика, принципов построения и тактико-технических требований (ТТТ) к разрабатываем РЛС.

В настоящее время сформировались три основных подхода к получению информации об ЭПР объектов – экспериментальные исследования, теоретические расчеты и компьютерное моделирование.

Экспериментальные исследования предполагают наличие полигона (безэховой камеры), сложной измерительной аппаратуры и реального объекта или его масштабной копии. Все это связано с большими экономическими и организационными затратами. Кроме того, представляющие интерес практические ситуации столь многообразны, что охватить их натурными экспериментами не представляется возможным [1].

Теоретические исследования вызывают интерес вследствие сложности получения широкого набора экспериментальных данных по оценке ЭПР объектов и расхождений результатов, получаемых различными экспериментальными методами [2].

Расчет ЭПР объектов является одной из сложнейших задач прикладной электродинамики и решается с той или иной степенью приближения только для ограниченного количества тел простой формы [2-7].

До настоящего времени строгими методами (разделения переменных, поверхностных токов, парных интегральных уравнений, Винера-Хопфа, Римана-Гильберта, вариационным методом и др.) решено лишь очень небольшое число задач для металлических тел простейшей формы (сфера, сфероид, диск, пластина, конус, тонкий провод) [2-6].

Строгий теоретический расчет ЭПР объектов, имеющих сложную пространственную конфигурацию, а также комбинацию металлических и диэлектрических (композитных) материалов типа углеволокна (карбона), стеклопластика, кевлара, соРЕТ (РЕТ-G, РЕТG) и РЕТ-пластиков и других материалов с различными электрическими и магнитными свойствами в своей конструкции практически невозможен.

В связи с этим заслуживает отдельного рассмотрения подход к получению информации об ЭПР сложных объектов с использованием современных компьютерных систем автоматизированного проектирования и

электродинамического моделирования, которые находят все большее применение для этих целей. В последние десятилетия это стало возможным благодаря высокой динамике развития производительности электронно-вычислительных машин и численных методов решения задач электродинамики.

Рост интереса к компьютерным методам расчета ЭПР сложных объектов нашел отражение в многочисленных публикациях [1, 6, 8, 9].

В работе [1] компьютерное моделирование вторичного излучения моделей реальных сложных объектов было направлено на получение алфавита распознаваемых классов (типов), формирования признаков и разработку методов распознавания, алгоритмов и параметров распознающих систем, а также оценке эффективности систем распознавания.

В работе [6] исследовалась ЭПР сферы из диэлектрического материала, у которого можно было изменять диэлектрическую проницаемость. Отмечается, что теоретический расчет ЭПР такого шара неточен, поскольку в аналитическом выражении не учитывается длина волны. Для того чтобы определить уточненные характеристики ЭПР диэлектрического шара авторы работы воспользовались методом компьютерного моделирования. По полученным в работе [6] результатам авторами работы сделан вывод, что закономерности изменения ЭПР от длины волны для проводящего и диэлектрического шаров существенно различаются, и для диэлектрического шара не поддаются аналитическому описанию.

В работе [8] рассматривается компьютерное моделирование характеристик ЭПР пуль, снарядов и малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БпЛА) типа Phantom 3 и RQ-11 Raven. Трехмерные модели для расчета ЭПР объектов были построены в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D. Оценивание ЭПР выполнялось с целью прогнозирования дальности их обнаружения РЛС. Необходимо отметить, что автором работы [8] оставлен в стороне вопрос доказательства адекватности разработанных трехмерных моделей сложных объектов и полученных на их основе результатов электродинамического моделирования.

В работе [9] использован аналогичный подход для оценивания характеристик ЭПР многоцелевого средневысотного БпЛА «Eitan» в С-диапазоне, трехмерная модель которого была разработана в системе проектирования SolidWorks. Исследование закономерностей изменения ЭПР модели выполнялось в программе электродинамического моделирования Altair FEKO.

В работе [9] показано, что при линейной поляризации облучающих и отраженных сигналов в диапазоне частот 5,2-5,5 ГГц максимальные значения ЭПР БпЛА «Eitan» достигают величины 0,05-0,14 кв.м. Адекватность разработанной трехмерной модели БпЛА «Eitan» проверялась путем проведения виртуальных испытаний на соответствие летно-технических характеристик модели и реального образца.

В работе [9] отмечается, что из-за отсутствия достоверной и полной информации о материалах, используемых при конструировании БпЛА «Eitan», при проведении электродинамического моделирования их свойства не учитывались. Кроме того, как и в [8], в работе [9] не рассматривался вопрос адекватности результатов электродинамического моделирования, на основе которого получены оценки ЭПР многоцелевого средневысотного БпЛА «Eitan» в С-диапазоне частот.

Из вышеизложенного следует, что актуальной задачей является разработка адекватных компьютерных методов расчета характеристик ЭПР сложных объектов с учетом свойств их материалов и проверки адекватности полученных результатов.

Таким образом, целью статьи является обоснование метода оценивания характеристик ЭПР сложных объектов на основе компьютерного моделирования с этапом проверки сходимости результатов моделирования по данным контрольных натурных экспериментов.

## 1. Этапы метода

Предлагаемый метод включает ряд взаимоувязанных этапов, позволяющих при их последовательном выполнении получить достоверную информацию о закономерностях характеристик ЭПР сложных объектов (рис. 1).

1) Вначале осуществляется сбор сведений об объекте исследования, необходимых для разработки и создания трехмерной модели его конструкции, а также проведения электродинамического моделирования ее вторичного излучения.

В состав таких сведений могут быть включены: назначение объекта, его технические характеристики и особенности конструкции, внешний вид и чертежи составных частей, состав материалов, из которого они изготовлены, их свойства (электрические и магнитные) и другие сведения, полученные из доступных источников.

2) Разработка и создание трехмерной модели конструкции объекта.

Разработка модели должна осуществляться на основе теории подобия и моделирования (ТПМ) [10]. Ключевыми требованиями здесь являются геометрическое подобие модели и всех ее подсистем реальному объекту [10].

При этом необходимо соблюдать определенный компромисс между сложностью (детализацией) модели и ее простотой для последующего использования в программе электродинамического моделирования.

Для разработки и создания трехмерной модели конструкции объекта возможно использование различных современных систем компьютерного автоматизированного проектирования и моделирования, например, таких как КОМПАС-3D, AutoCAD, SolidWorks, Autodesk Inventor и других.

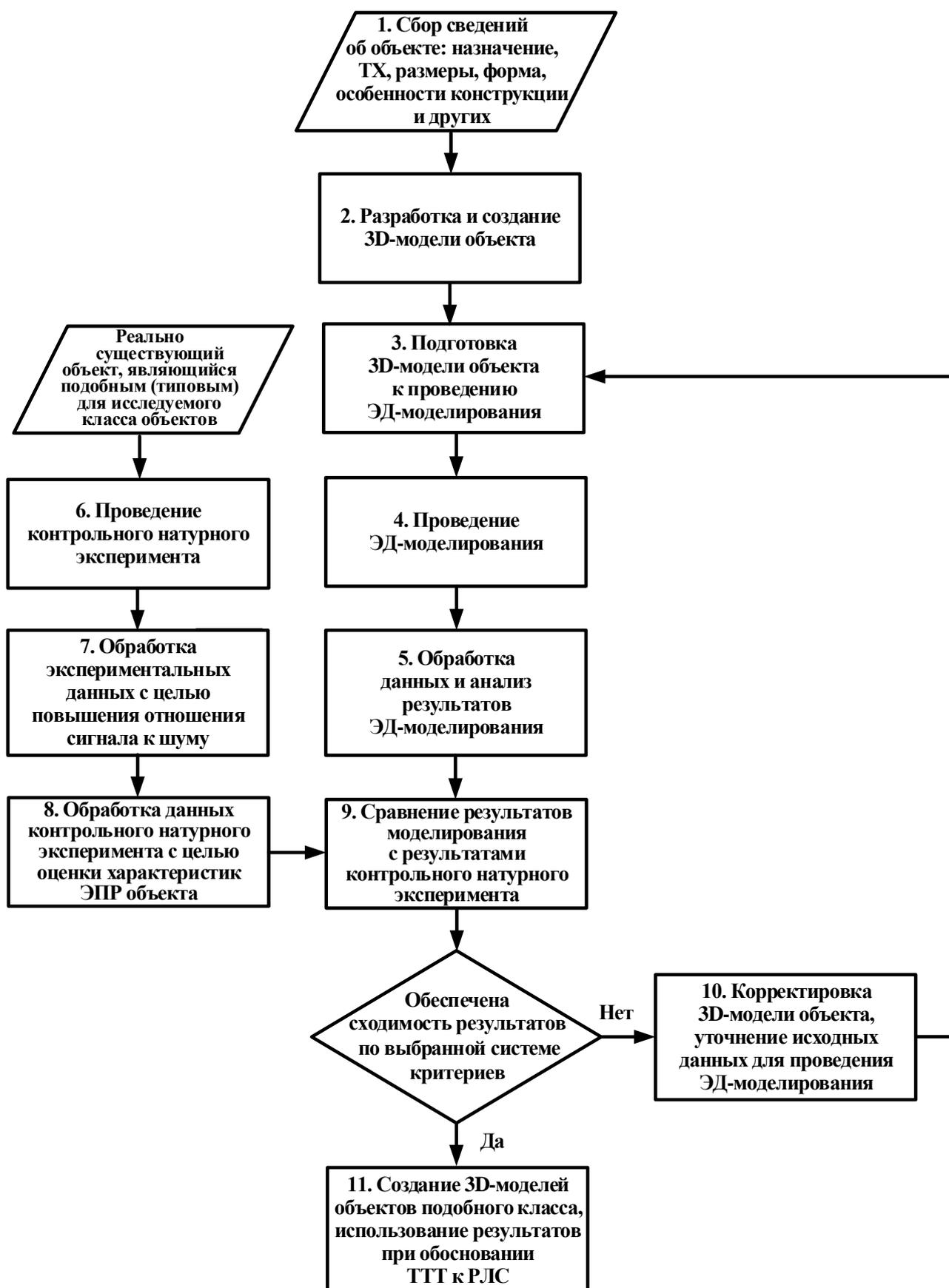


Рис. 1. Метод оценивания характеристик ЭПР сложных объектов на основе сочетания компьютерного моделирования и экспериментальных данных.

3) Подготовка трехмерной модели объекта к проведению электродинамического моделирования.

Под подготовкой здесь понимается процесс рационального упрощения поверхности трехмерной модели объекта, обеспечивающий при проведении электродинамического моделирования компромисс между скоростью и точностью расчетов, а также имеющимися вычислительными ресурсами.

Трехмерная модель конструкции объекта не должна быть перегружена излишней детализацией конструктивных элементов, особенно тех, которые практически не оказывают влияние на интенсивность ее вторичного излучения. Излишняя детализация, как показывает опыт, приводит к появлению различных артефактов модели, многократному увеличению времени моделирования без получения значимых количественных результатов или даже невозможности выполнения электродинамического моделирования.

На данном этапе метода осуществляется также экспорт разработанной и подготовленной трехмерной модели объекта в программу для выполнения электродинамического моделирования.

4) Проведение электродинамического моделирования для получения оценок характеристик ЭПР объекта в зависимости от различных факторов: углов наблюдения, длины волны, поляризации облучающей ЭМВ и других. При этом возможно применение следующих современных систем электродинамического моделирования: Altair FEKO, Ansys HFSS, Microwave Studio CST и других.

Выбор конкретного программного обеспечения для проведения электродинамического моделирования определяется его доступностью, навыками и удобством работы, а также имеющимися у исследователя вычислительными ресурсами.

5) На данном этапе метода осуществляются обработка и анализ результатов электродинамического моделирования, выполненного с разработанной трехмерной моделью сложного объекта, с целью их дальнейшего сравнения с результатами контрольного натурального эксперимента.

б) Важным этапом предлагаемого метода является проведение контрольного натурального эксперимента по оценке характеристик ЭПР объекта.

Контрольный натуральный эксперимент необходимо проводить с реально существующим физическим объектом, являющегося подобным (типовым) представителем для исследуемого класса объектов. С использованием результатов, полученных в ходе проведения контрольного натурального эксперимента, производится корректировка трехмерной модели и исходных данных для выполнения электродинамического моделирования (см. этап 10 метода).

7) На данном этапе выполняется обработка экспериментальных данных с целью повышения отношения сигнала к шуму на основе известных эффективных алгоритмов фильтрации сигналов. Этот этап необходим для повышения точности измерений ЭПР объектов при проведении экспериментальных исследований.

8) Далее следует этап обработки данных контрольного натурального эксперимента для оценивания характеристик ЭПР объекта.

Существует достаточно большое количество методов оценивания ЭПР объектов при проведении натуральных экспериментов [2]. В предлагаемом методе оценивание ЭПР сложного объекта предлагается осуществлять с использованием эталонного объекта с известным значением ЭПР. Точность таких измерений составляет от пяти до десяти процентов [11].

В качестве эталонных объектов целесообразно использовать металлические объекты простой конфигурации (сферу, пластину, цилиндр, конус) с точно известными размерами, для которых ЭПР можно рассчитать аналитически. Сравнение результатов натуральных экспериментов, моделирования и аналитических расчетов подтверждает, что для указанных металлических объектов простой конфигурации оценки характеристик ЭПР всеми тремя подходами достаточно адекватны [8].

При этом, можно предположить, что подход по оцениванию характеристик ЭПР сложных объектов с использованием эталонного объекта с известным значением ЭПР был бы эффективен и для методов компьютерного

моделирования. Однако это не так. Причина заключается в том, что перед проведением компьютерного моделирования трехмерную модель объекта необходимо разработать и создать. Насколько адекватно она будет создана для выполнения компьютерного электродинамического моделирования ее вторичного излучения зависит от многих факторов. В настоящее время создание качественной трехмерной модели сложного объекта, позволяющей получить достоверные результаты по оценке характеристик его ЭПР, есть сложный итеративный процесс, результат тесного взаимодействия специалистов по радиолокации, трехмерному и электродинамическому моделированию. В натурном же эксперименте сложный объект уже есть сам по себе, разрабатывать и создавать его не требуется.

Таким образом, адекватные количественные результаты по оценке характеристик ЭПР металлических объектов простой конфигурации, полученные аналитически и с помощью электродинамического моделирования, отнюдь не гарантируют подобного для сложных объектов. Поэтому необходимым этапом метода является этап сравнения результатов моделирования с результатами контрольного натурального эксперимента [1].

9) Сравнение результатов моделирования с результатами контрольного натурального эксперимента.

Для проведения такого сравнения определяется система критериев сходимости результатов, т.е. показателей и правил, по которым будет устанавливаться соответствие результатов натурального эксперимента и моделирования.

Определение системы критериев связано с последующими решаемыми прикладными задачами и требуемой точностью проведения моделирования. Например, в работе [1] для решения задач радиолокационного распознавания воздушных целей система показателей (правил) сходимости включала: совпадение средних значений ЭПР (с точностью до 2,5 дБ), угловых и частотных корреляционных функций (с точностью 10-30 %), а также коэффициентов корреляции дальностных портретов (с точностью 0,88-0,97).

Необходимо отметить, что этапы 6-9 предлагаемого метода являются принципиально необходимыми. Их выполнение позволяет утверждать, что если результаты контрольного натурального эксперимента обеспечивают сходимость с результатами моделирования по выбранной системе критериев, то подход к созданию трехмерных моделей сложных объектов подобного класса и процесс электродинамического моделирования их вторичного излучения в целом являются адекватными.

10) Корректировка трехмерной модели и уточнение исходных данных для выполнения электродинамического моделирования.

При невыполнении критериев сходимости результатов контрольного натурального эксперимента и моделирования осуществляется анализ результатов моделирования, выявление причин расхождения, а также корректировка трехмерной модели и уточнение исходных данных для выполнения электродинамического моделирования. Затем снова осуществляется моделирование. Указанный процесс продолжается до обеспечения сходимости результатов моделирования с результатами контрольного натурального эксперимента по определенной системе критериев.

11) При обеспечении сходимости результатов моделирования и контрольного натурального эксперимента возможно приступить к созданию других трехмерных моделей сложных объектов подобного класса, получению статистических характеристик оценок их ЭПР, а также обоснованию ГТТ к РЛС.

Разработка трехмерных моделей сложных объектов подобного класса должна осуществляться на основе ТПМ [10]. В соответствии с ней признаками подобия физических систем, кроме геометрического подобия, являются подобие отношений свойств материалов, сил и энергий. Для получения статистических характеристик оценок ЭПР сложных объектов ключевым является подобие геометрических размеров, формы и физических свойств материалов. Кроме того, для сложных систем должны быть подобны все составляющие их подсистемы.

## 2. Пример практической реализации метода

Практическую реализацию метода рассмотрим на примере оценивания ЭПР распространенного типа коммерческого малоразмерного БПЛА типа Chimera 7 Pro V2. Связано это с тем, что достоверной информации о закономерностях изменения характеристик ЭПР малоразмерных БПЛА в различных диапазонах длин волн пока нет. Одной из причин этого является бурное развитие малоразмерных БПЛА, появление их огромного разнообразия по типам, формам исполнения и летно-техническим характеристикам. Как следствие, получить такие характеристики в ходе проведения натуральных экспериментальных исследований для всех типов малоразмерных БПЛА в сопоставимых условиях весьма затруднительно.

Современные малоразмерные БПЛА с точки зрения характеристик вторичного излучения относятся к сложным объектам. Это обусловлено особенностями их конструкции, которая обладает многочисленными выпукловогнутыми поверхностями и деталями, размеры которых находятся в произвольном соотношении с длиной облучающей их электромагнитной волны (ЭМВ). Вторичное излучение таких объектов может охватывать рэлеевскую, резонансную и квазиоптическую области рассеяния ЭМВ одновременно. Отдельного исследования требуют свойства материалов, которые используются в составе конструкции БПЛА. Как правило, в современных БПЛА широко применяются легкие магниевые сплавы и композитные материалы типа углеволокна (карбона), стеклопластика, кевлара и других с различными электрическими и магнитными свойствами.

Очевидно, что для таких сложных объектов аналитический расчет ЭПР невозможен в принципе. Поэтому целесообразно воспользоваться рассмотренным выше методом оценивания характеристик ЭПР малоразмерных БПЛА.

Рассмотрим последовательно практическую реализацию этапов предложенного метода.

1) Малоразмерный БПЛА Chimera 7 Pro V2 является коммерческим аппаратом и предназначен для выполнения любительской и профессиональной воздушной кино и фотосъемки.

Отдельные характеристики БПЛА приведены в таблице 1. Внешний вид БПЛА представлен на рис. 2, а его трехмерная модель – на рис. 3.

2) Полноразмерная модель конструкции БПЛА была построена с применением отечественной системы компьютерного автоматизированного проектирования и моделирования КОМПАС-3D. Моделирование выполнялось методом обратного проектирования – реверс инжинирингом.

Разработка трехмерной модели БПЛА включала: сбор визуального материала, работа с реальной физической моделью для снятия размеров и оценки последовательности сборки изделия, обработка данных; создание конструкторской документации и чертежей, построение 3D-деталей в виде частных цифровых трехмерных моделей; формирование сборочной единицы, компоновка 3D-деталей в виде частных цифровых трехмерных моделей в единую структуру, представленную на рис. 3.

Таблица 1. Характеристики БПЛА Chimera 7 Pro V2

Характеристика, единица измерения	Описание характеристики
Тип БПЛА	Квадрокоптер типа FPV
Размеры: длина×ширина×высота×диагональ, мм	270×199×34×327 мм
Материал корпуса	Карбон (углеродное волокно)
Конфигурация корпуса	С асимметричной компоновкой двигателей
Относительная диэлектрическая проницаемость материала корпуса	3,5
Металлические элементы конструкции	Электрические двигатели, аккумулятор, элементы аппаратуры в корпусе, крепления
Размеры электрических двигателей: диаметр×высота, мм	35,3×21,7
Аккумуляторная батарея (АКБ)	литий полимерная
Размеры АКБ: длина×ширина×высота, мм	134×44×39,3 мм
Диаметр винтов, мм	190,5
Количество лопастей	3
Материал винтов	Карбон (поликарбонат)

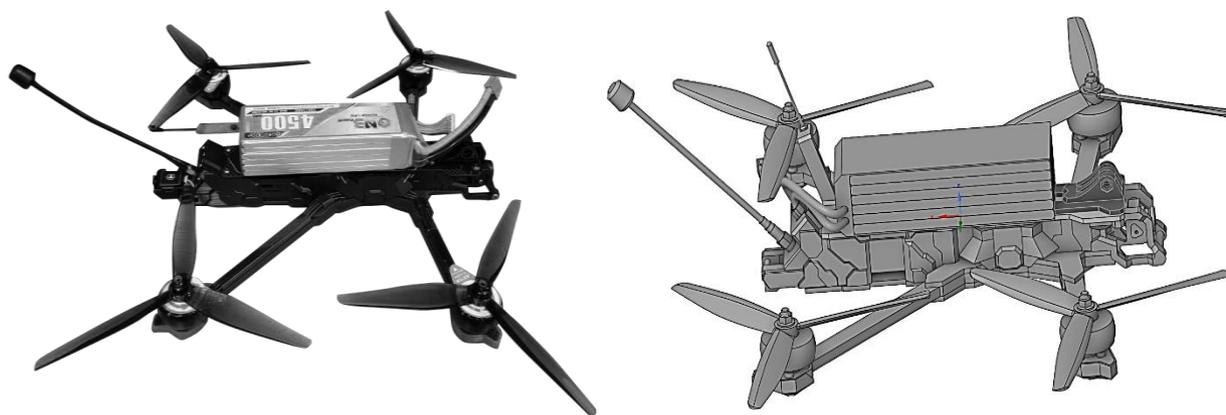


Рис. 2. Внешний вид БПЛА типа FPV Chimera7 Pro V2  
Рис. 3. Созданная 3D-модель БПЛА типа FPV Chimera7 Pro V2.

3) Подготовка трехмерной модели БПЛА к проведению электродинамического моделирования заключалась в упрощении формы или исключении из точно созданной модели некоторых незначительных элементов конструкции, которые очевидно не оказывают существенного влияния на интенсивность вторичного излучения в S-диапазоне частот. К таковым в данном случае были отнесены: миниатюрные винты крепления, различные пазы и углубления на корпусах электродвигателей, фото и видеокамер, а также некоторые другие элементы.

Экспорт трехмерной модели БПЛА производился в программу электродинамического моделирования Ansys High Frequency Structure Simulation (HFSS).

4) Расчет поля вторичного излучения созданной модели БПЛА выполнялся для диапазона частот 2-3 ГГц, горизонтальной и вертикальной поляризаций ЭМВ, углов ориентации объекта от 0 до 360 градусов в горизонтальной  $\varphi$  и 0 градусов в вертикальной  $\theta$  плоскости сферической системы координат, начало которой было совмещено с геометрическим центром объекта. Указанные угловые положения выбраны как представляющие наибольший практический интерес с точки зрения наблюдения БПЛА наземными активными РЛС.

Отличительной особенностью проведенного компьютерного электродинамического моделирования вторичного излучения модели БПЛА в программе Ansys HFSS являлось то, что при задании исходных данных для

моделирования была учтена относительная диэлектрическая проницаемость элементов его конструкции, в частности корпуса (см. таблицу 1).

5) Далее были выполнены обработка и анализ результатов электродинамического моделирования, выполненного с трехмерной моделью малоразмерного БПЛА Chimera 7 Pro V2, с целью их дальнейшего сравнения с результатами контрольного натурального эксперимента.

6) Контрольный натуральный эксперимент был проведен в сопоставимых с электродинамическим моделированием условиях с использованием реального образца малоразмерного БПЛА Chimera 7 Pro V2.

7) Обработка экспериментальных данных с целью повышения отношения сигнала к шуму с осуществлялась с использованием вейвлет-фильтрации. Это было связано с тем, что в контрольном натурном эксперименте в качестве зондирующего использовался сверхширокополосный сигнал, форма которого была близка к форме ортогональных вейвлетов с компактным носителем типа Добеши и симлетов. Для вейвлетов данного типа, кроме того, существуют быстрые алгоритмы дискретного вейвлет-преобразования, реализованные в пакете MATLAB R2019b для удаления шума из сигнальной смеси [12].

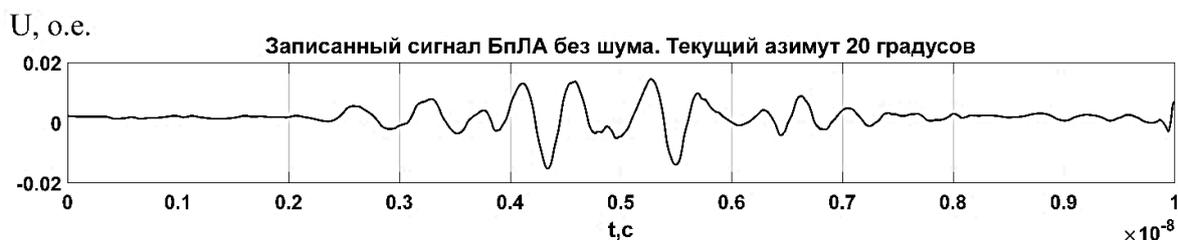
Для примера на рис. 4 представлены графики мгновенных значений эхосигналов БПЛА, полученных до (рис. 4а) и после удаления шума (рис. 4б). В алгоритме удаления шума был использован вейвлет Добеши четвертого порядка.

8) Обработка данных контрольного натурального эксперимента для оценивания характеристик ЭПР БПЛА производилась с использованием эталонного объекта, в качестве которого использовалась металлическая сфера известного радиуса.

Достоверность оценивания ЭПР в контрольном натурном эксперименте была подтверждена сходимостью результатов аналитических расчетов и экспериментальных данных при исследовании ЭПР металлической пластины и сферы следующим образом.



а) исходный эхосигнал БПЛА



б) эхосигнал БПЛА после удаления шума

Рис. 4. Результат обработки экспериментальных данных с целью повышения отношения сигнала к шуму.

Вначале рассчитывалась ЭПР металлической сферы  $\sigma_{\text{ЭТ}}(f)$  согласно выражению [4]:

$$\sigma_{\text{ЭТ}}(f) = \sigma_{\text{max}} U(2\pi Rf/c),$$

где  $\sigma_{\text{max}} = \pi R^2$  – асимптотическая ЭПР сферы радиусом  $R$ ;  $U(\bullet)$  – безразмерная энергетическая функция моностатического рассеяния, значения которой табулированы [4];  $f = c/\lambda$ ;  $\lambda$  – длина волны;  $c$  – скорость света.

Далее рассчитывалось асимптотическое значение ЭПР металлической пластины известных размеров согласно выражению  $\sigma_{\text{пл}}(f) = 4\pi(ab)^2 / (c/f)^2$ , где  $a$ ,  $b$  – размеры сторон пластины. Затем экспериментальным путем определялась оценка асимптотического значения ЭПР пластины  $\hat{\sigma}_{\text{пл}}(f)$ , при условии, что в качестве эталонного объекта выступала сфера.

Результаты расчетов  $\sigma_{\text{пл}}(f)$  и экспериментальных данных  $\hat{\sigma}_{\text{пл}}(f)$  по оценке ЭПР пластины сравнивались между собой и делался вывод об их сходимости. При этом вычислялось отношение их ЭПР в децибелах.

На рис. 5а представлены результаты экспериментальной оценки и расчетов асимптотических значений ЭПР металлической пластины для

следующих исходных данных: диапазон частот анализа  $f$  от 2 до 3 ГГц; радиус сферы  $R = 0,2$  м; размеры сторон пластины  $a = b = 0,19$  м; поляризация зондирующего сигнала – линейная (горизонтальная и вертикальная); количество проведенных экспериментов – 10. На рис. 5б представлены графики отношений расчетных к измеренным асимптотическим значениям ЭПР пластины для горизонтальной и вертикальной поляризаций ЭМВ.

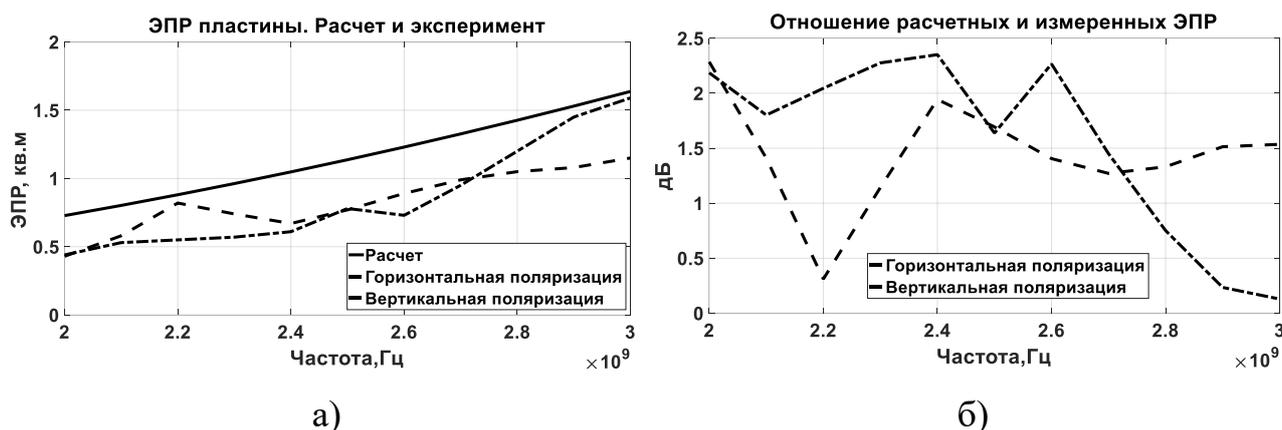


Рис. 5. Сравнительные результаты расчетов и экспериментальной оценки ЭПР пластины для горизонтальной и вертикальной поляризаций ЭМВ.

Как следует из рис. 5б отношение расчетных асимптотических значений и экспериментальных оценок ЭПР металлической пластины не превышает по величине 2,5 дБ, что позволило считать результаты оценивания ЭПР металлической пластины в контрольном натурном эксперименте удовлетворительными [1].

При оценивании характеристик ЭПР БпЛА производилось измерение и запись эхосигналов фона, а также сферы и БпЛА, расположенных в дальней зоне, под углами облучения  $\varphi$ ,  $\theta$ . Затем проводилось вычитание эхосигналов фона из эхосигналов сферы и БпЛА, а также процедура повышения отношения сигнала к шуму с использованием вейвлет-фильтрации (см. п. 7 способа). Далее над полученными в результате такой обработки сохраненными сигналами сферы и БпЛА осуществлялось быстрое преобразование Фурье, т.е. создавался массив измерительной информации в виде комплексных гармонических составляющих спектров сигналов сферы  $\dot{S}_{\text{ст}}(f)$  и БпЛА  $\dot{S}(f, \varphi, \theta)$ .

Оценка ЭПР БпЛА  $\hat{\sigma}(f, \varphi, \theta)$  рассчитывалась согласно выражению

$$\hat{\sigma}(f, \varphi, \theta) = \sigma_{\text{эт}}(f) \frac{|\dot{S}(f, \varphi, \theta)|^2}{|\dot{S}_{\text{эт}}(f)|^2}.$$

9) Для определения сходимости результатов моделирования и натуральных экспериментов была определена следующая система критериев: закон опытного распределения ЭПР и оценка медианного значения ЭПР. Выбор в качестве одного из критериев медианного значения ЭПР связан с тем, что большая часть распределений ЭПР сложных объектов являются асимметричными.

Под критерием в работе понималась взаимоувязанная пара: показатель плюс правило, в соответствии с которыми осуществлялась проверка сходимости.

Правило и показатель для каждого из критериев определялись следующим образом: для первого – совпадение гипотез о согласии теоретического и опытного распределений по результатам моделирования  $f(x)$  и натурального эксперимента  $f(y)$ ; для второго – модуль отношения оценок медианных значений ЭПР по результатам моделирования  $x_{\text{мед}}$  и натурального эксперимента  $y_{\text{мед}}$ , вычисленный согласно выражению  $L = |10 \lg(x_{\text{мед}}/y_{\text{мед}})|$ , должен быть не хуже 3 дБ.

Законы опытного распределения ЭПР БпЛА по результатам моделирования  $f(x)$  и натурального эксперимента  $f(y)$  определялись в соответствии с правилами проверки согласия опытных распределений с теоретическими на основе критерия Колмогорова-Смирнова.

В качестве возможных распределений ЭПР БпЛА были проверены следующие распределения: экспоненциальное, Вейбулла, логарифмически-нормальное (логнормальное), Райса, Рэлея, бета и гамма.

Оценка медианного значения ЭПР БпЛА при моделировании  $x_{\text{мед}}$  и натурном эксперименте  $y_{\text{мед}}$  рассчитывалась для того закона опытного распределения, достоверность гипотезы которого, согласно критерию согласия, не отклонялась.

Статистическая обработка данных моделирования и натурального эксперимента выполнялась в пакете MATLAB R2019b.

На рис. 6, 7 в полярной системе координат показаны ДОВИ БпЛА Chimera 7 Pro V2 на частотах 2,0 ГГц и 3,0 ГГц, полученные по результатам моделирования и натурального эксперимента для горизонтальной (рис. 6) и вертикальной (рис. 7) поляризаций ЭМВ, углов облучения  $\varphi = 0-360$  и  $\theta = 0$  градусов.

Из анализа рис. 6, 7 следует, что ДОВИ указанного БпЛА в диапазоне частот 2,0-3,0 ГГц имеют изрезанный вид. Это характеризует БпЛА как достаточно сложный объект с точки зрения формирования вторичного излучения, флуктуации интенсивности которого могут достигать 10-15 дБ. Кроме того, ДОВИ обладают ярко выраженными направленными свойствами: их вид близок к зеркально-симметричному относительно направления 0-180 градусов. Последнее подчеркивает проявление специфической X-образной симметрии профиля БпЛА Chimera 7 Pro V2. Анализ ДОВИ позволяет также заключить, что для горизонтальной поляризации ЭМВ ширина лепестков ДОВИ уже, чем для вертикальной (см. рис. 6, 7). Аналогичная тенденция наблюдается и с повышением частоты сигнала при одинаковой поляризации ЭМВ (см. рис. 6а и 6б, 7а и 7б). Это закономерно, поскольку длина корпуса БпЛА значительно больше его высоты (см. таблицу 1). Как следствие, с повышением частоты сигнала отношение длины волны к соответствующему размеру корпуса БпЛА, определяющее ширину лепестков ДОВИ, снижается.

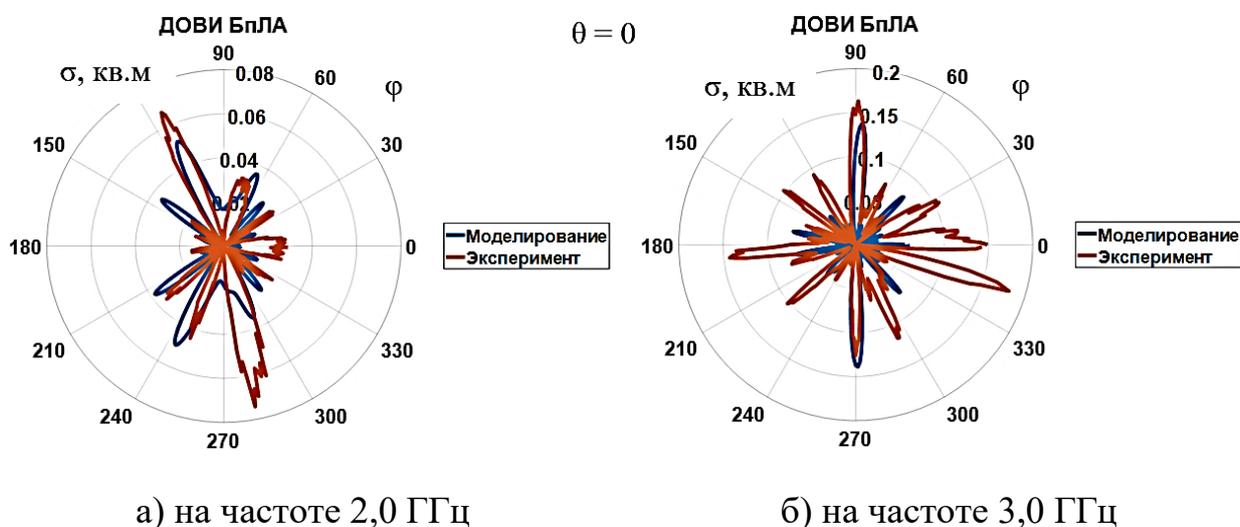
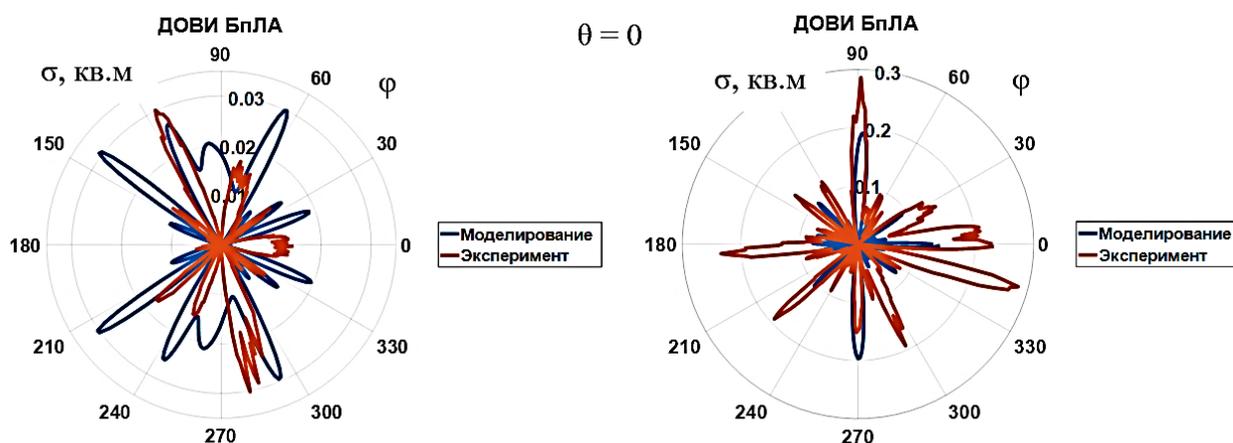


Рис. 6. ДОВИ БпЛА типа FPV Chimera7 Pro V2 для горизонтальной поляризации ЭМВ.



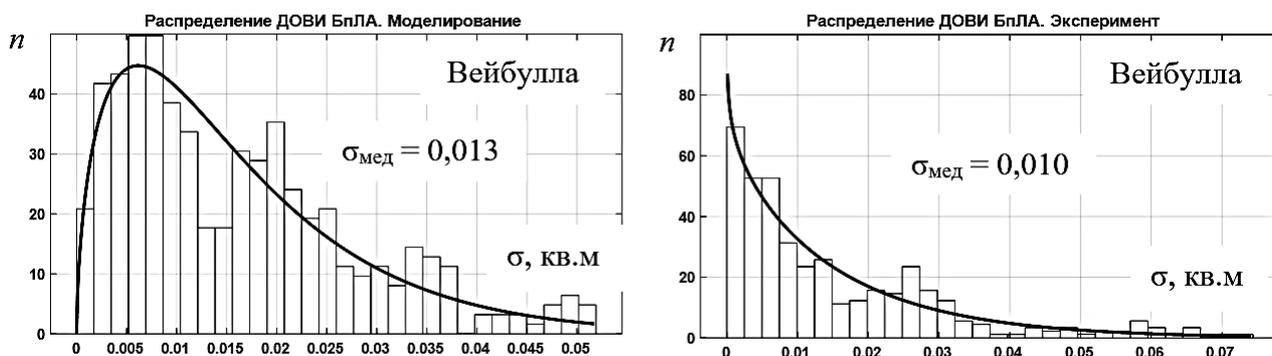
а) на частоте 2,0 ГГц

б) на частоте 3,0 ГГц

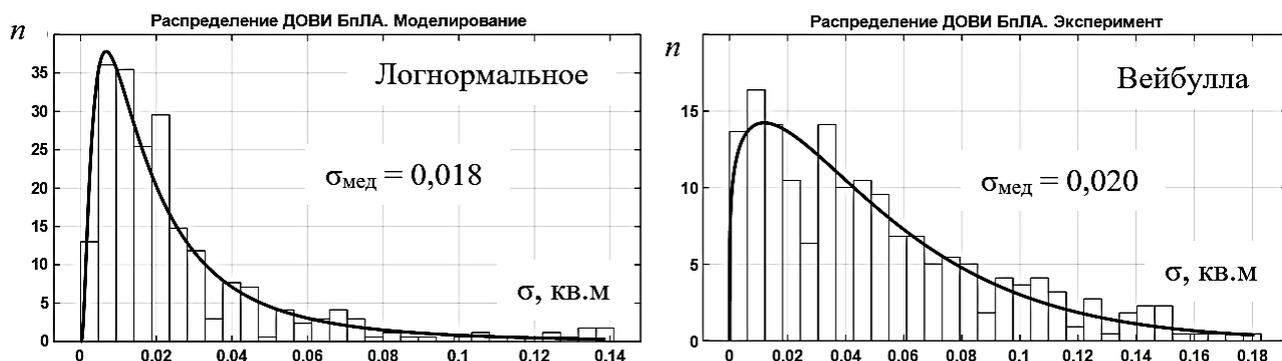
Рис. 7. ДОВИ БпЛА типа FPV Chimera7 Pro V2 для вертикальной поляризации ЭМВ.

На рис. 8, 9 показаны гистограммы и принятые, в соответствии с критерием согласия, аппроксимации законов опытных распределений ЭПР БпЛА Chimera 7 Pro V2 в диапазоне частот 2,0-3,0 ГГц, полученные по результатам моделирования (слева) и натурального эксперимента (справа) для горизонтальной (рис. 8) и вертикальной (рис. 9) поляризации ЭМВ. Оценивание характеристик производилось для углов облучения  $\varphi = 0-360$  и  $\theta = 0$  градусов.

По оси абсцисс на графиках рис. 8, 9 отложена величина ЭПР в квадратных метрах, а по оси ординат – количество значений ЭПР  $n$ , попавших в соответствующий интервал гистограммы из выборки объемом  $N = 360$ . Непрерывной сплошной линией показаны законы аппроксимации опытных распределений ЭПР БпЛА.



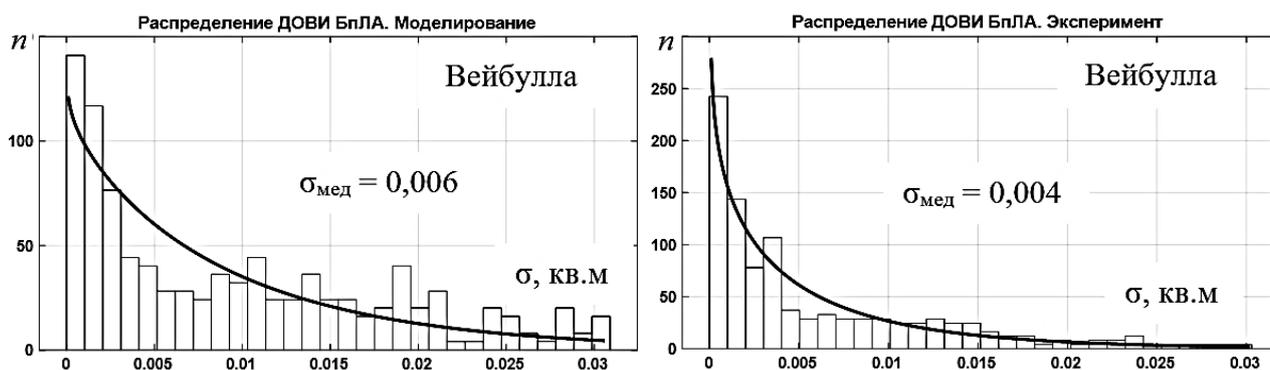
а) на частоте 2,0 ГГц



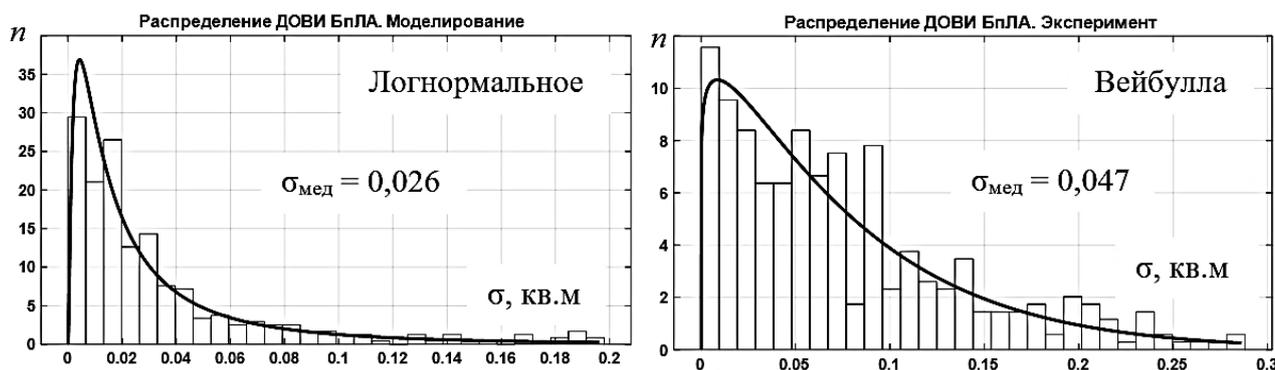
б) на частоте 3,0 ГГц

Рис. 8. Гистограммы и принятые законы опытных распределений ЭПР БПЛА Chimera 7 Pro V2 по результатам моделирования (слева) и натурального эксперимента (справа) для горизонтальной поляризации ЭМВ.

Обобщенные результаты статистической обработки данных моделирования и натурального эксперимента представлены в таблице 2. Их анализ позволяет заключить, что результаты электродинамического моделирования вторичного излучения в диапазоне частот 2–3 ГГц выбранного типа малоразмерного БПЛА с целью оценки характеристик его ЭПР для горизонтальной и вертикальной поляризаций ЭМВ показали удовлетворительную сходимость с результатами натурального эксперимента.



а) на частоте 2,0 ГГц



б) на частоте 3,0 ГГц

Рис. 9. Гистограммы и принятые законы опытных распределений ЭПР БПЛА Chimera 7 Pro V2 по результатам моделирования (слева) и натурального эксперимента (справа) для вертикальной поляризации ЭМВ.

Совпадение законов опытных распределений по результатам моделирования и натурального эксперимента произошло в 90 % случаев. При этом совпадение медианных значений ЭПР обеспечено с точностью не хуже 3 дБ.

В связи с этим подход к оцениванию характеристик ЭПР БПЛА Chimera 7 Pro V2 на основе сочетания компьютерного моделирования и экспериментальных данных был признан адекватным, а полученные с его применением результаты – достаточно корректными.

Таблица 2. Обобщенные результаты обработки данных для БпЛА Chimera 7 Pro V2.

Частота, ГГц	Моделирование				Эксперимент				Показатель $L$ , дБ	
	Горизонтальная		Вертикальная		Горизонтальная		Вертикальная		Гориз.	Верт.
	$f(x)$	$x_{мед}$ , М <sup>2</sup>	$f(x)$	$x_{мед}$ , М <sup>2</sup>	$f(y)$	$y_{мед}$ , М <sup>2</sup>	$f(y)$	$y_{мед}$ , М <sup>2</sup>		
2,0	Вейбул.	0,013	Вейбул.	0,006	Вейбул.	0,010	Вейбул.	0,004	1,1	1,8
2,2	Вейбул.	0,014	Вейбул.	0,017	Вейбул.	0,028	Вейбул.	0,010	3,0	2,2
2,4	Вейбул.	0,018	Вейбул.	0,035	Вейбул.	0,027	Вейбул.	0,018	1,8	2,8
2,6	Вейбул.	0,015	Вейбул.	0,027	Вейбул.	0,019	Вейбул.	0,014	1,0	2,8
2,8	Вейбул.	0,017	Вейбул.	0,034	Вейбул.	0,031	Вейбул.	0,043	2,6	1,0
3,0	Логнор.	0,017	Логнор.	0,026	Вейбул.	0,020	Вейбул.	0,047	0,7	2,6

В целом, анализ полученных результатов, представленных на рис. 8, 9 и в таблице 2 позволяет сформулировать следующее.

Гипотеза о том, что в диапазоне частот 2-3 ГГц как для горизонтальной, так и для вертикальной поляризации ЭМВ распределение ЭПР БпЛА Chimera 7 Pro V2 может быть аппроксимировано семейством двухпараметрических распределений Вейбулла, не может быть отвергнута.

Распределение Вейбулла тесно связано с экспоненциальным (есть его частный случай) и гамма-распределением (получается из него заменой переменных), которые в общем случае хорошо описывают распределения ЭПР от объектов без доминирующих и с доминирующими (превосходящими по интенсивности отражения) элементами [13].

Анализ показал, что для семейства распределений ЭПР БпЛА параметр масштаба распределения Вейбулла лежит в диапазоне 0,005-0,053, а параметр формы – 0,838-1,405. Их значения указывают на то, что семейства распределений не соответствуют экспоненциальному распределению, хотя в некоторых случаях и близки к нему. На основании этого можно заключить, что в диапазоне частот 2-3 ГГц при формировании вторичного излучения БпЛА в его конструкции начинают проявляться отдельные доминирующие элементы. При этом распределение ЭПР БпЛА в указанном диапазоне частот интерполирует между экспоненциальным и гамма-распределением.

Можно предположить, что в диапазоне частот 2-3 ГГц (длины волн  $\lambda = 0,10-0,15$  м) в качестве возможных доминирующих элементов вторичного излучения БПЛА могут выступать грани его металлизированной аккумуляторной батареи (АКБ) при нормальном падении на них ЭМВ.

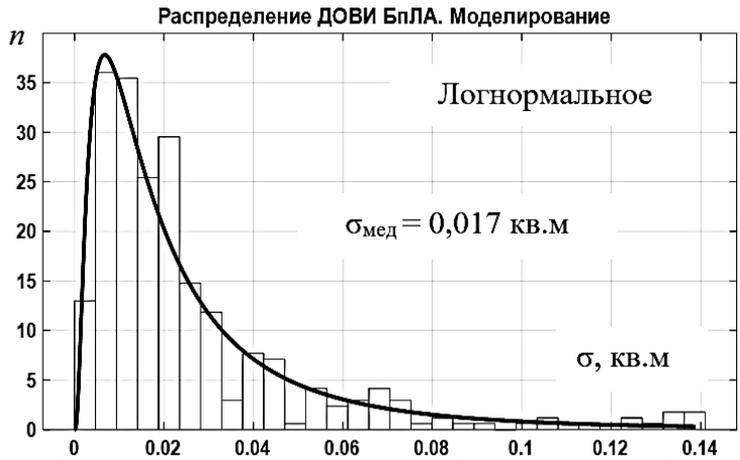
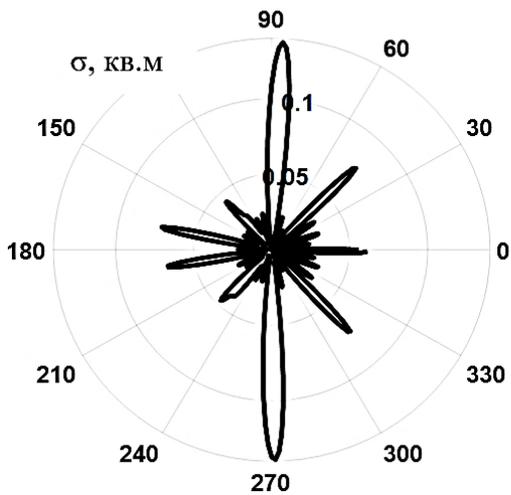
Объясняется это тем, что в отличие от некоторых других типов БПЛА в квадрокоптере FPV типа Chimera 7 Pro V2 АКБ не закрыта корпусом. Кроме того, размеры, используемой на БПЛА АКБ, составляют  $0,134 \times 0,044 \times 0,039$  м (см. таблицу 1). При этом отношение размеров АКБ к длинам используемых в исследованиях волн  $\lambda = 0,10-0,15$  м укладываются в диапазон  $0,5 < ka < 50$  ( $k = 2\pi/\lambda$ ,  $a$  – характерный размер АКБ), что приводит к резонансному характеру вторичного излучения [4]. Как следствие, это приводит к достаточно резкому росту интенсивности вторичного излучения при ракурсах облучения БПЛА, близких к нормальному падению ЭМВ на грани АКБ.

В целом, медианные значения ЭПР БПЛА Chimera 7 Pro V2 в диапазоне частот 2-3 ГГц составляют примерно 0,010-0,031 кв.м для горизонтальной поляризации и 0,004-0,047 кв.м – вертикальной.

На рис. 10, 11 представлены ДОВИ БПЛА Chimera 7 Pro V2 (слева), а также гистограммы и принятые законы опытных распределений ЭПР БПЛА (справа) по результатам моделирования для горизонтальной (рис. 10) и вертикальной (справа) поляризаций ЭМВ на частотах: 3,0 ГГц (рис. 10а и 11а); 5,0 ГГц (рис. 10б и 11б) и 10,0 ГГц (рис. 10в и 11в). Моделирование выполнялось для углов облучения  $\varphi = 0-360$  и  $\theta = 0$  градусов.

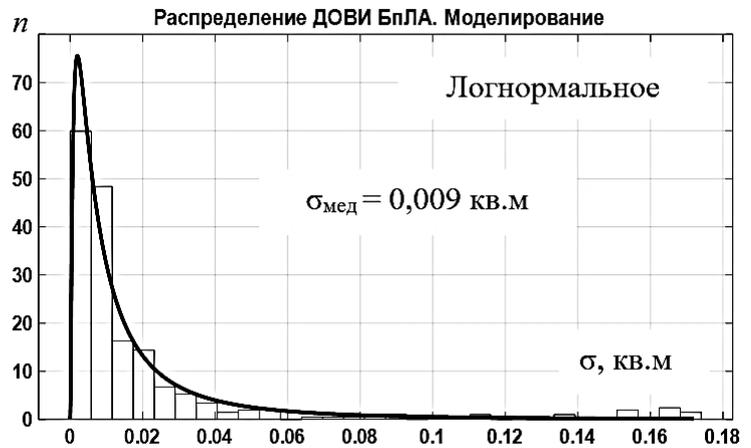
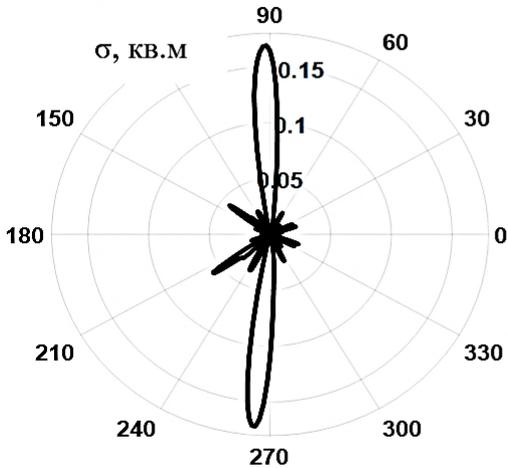
Из графиков на рис. 10 видно, что для горизонтальной поляризации с увеличением частоты сигнала происходит существенное уменьшение ширины лепестков ДОВИ БПЛА. Кроме того, наблюдается достаточно сильное проявление эффекта зеркального отражения от протяженных в горизонтальной плоскости граней АКБ для углов облучения БПЛА, близких к 90 и 270 градусам. Как следствие, это приводит к трансформации законов распределения ЭПР БПЛА от распределения Вейбулла (для частот 2-3 ГГц) к логарифмически-нормальному (для частот 3-10 ГГц).

ДОВИ БПЛА. Моделирование



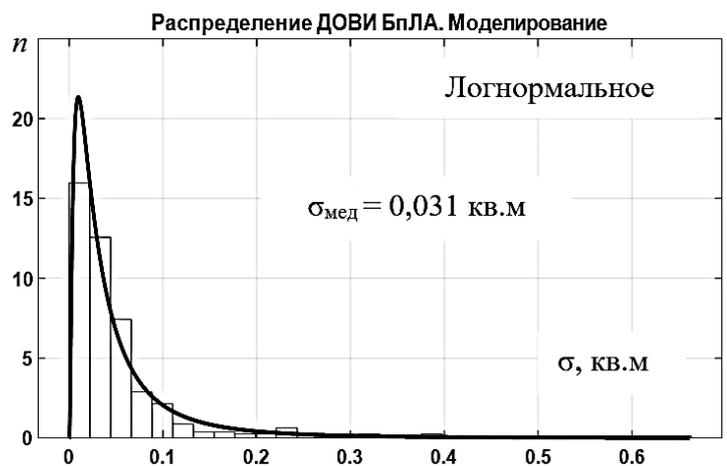
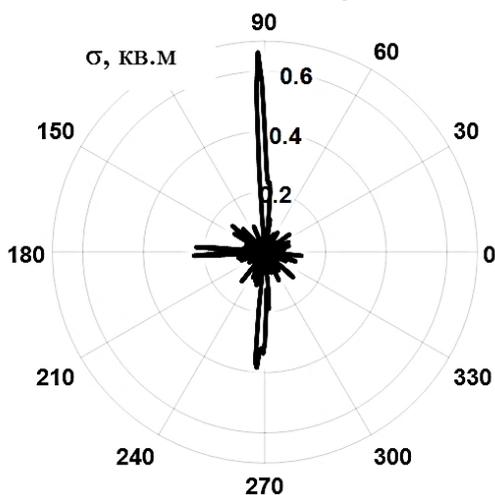
а) на частоте 3,0 ГГц

ДОВИ БПЛА. Моделирование



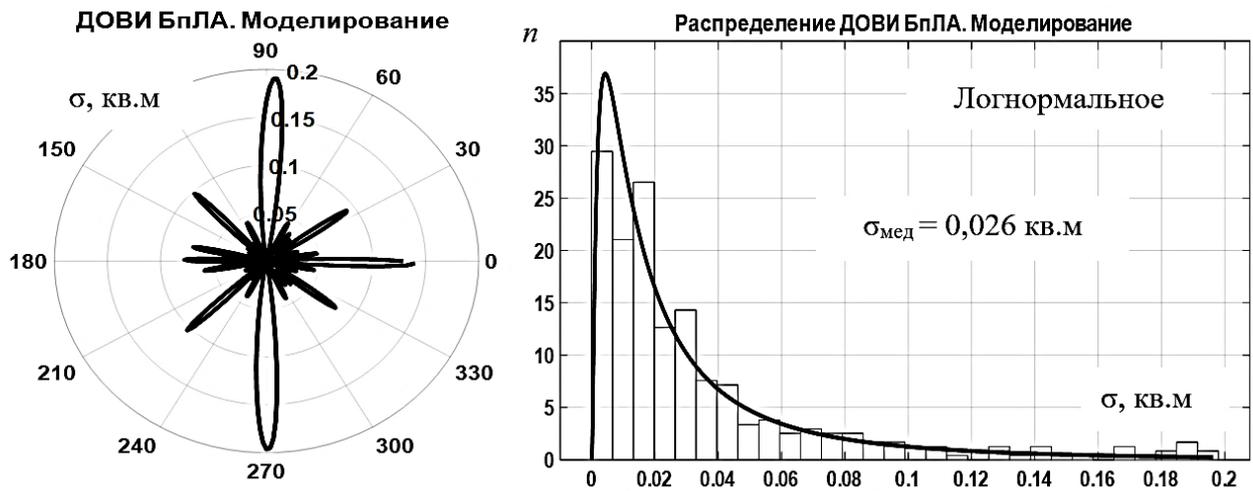
б) на частоте 5,0 ГГц

ДОВИ БПЛА. Моделирование

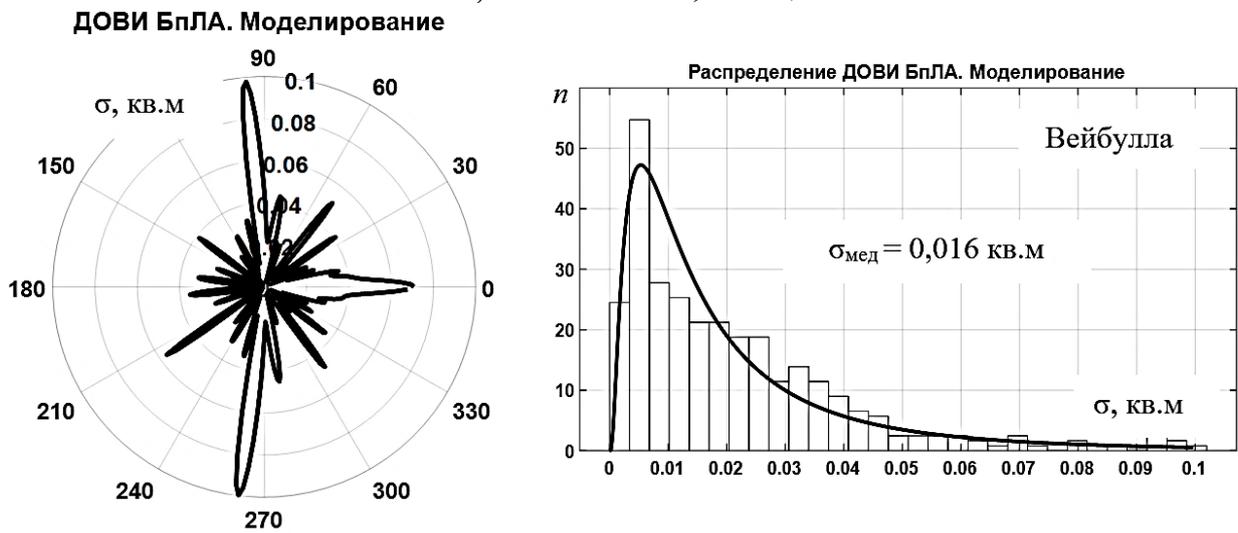


в) на частоте 10,0 ГГц

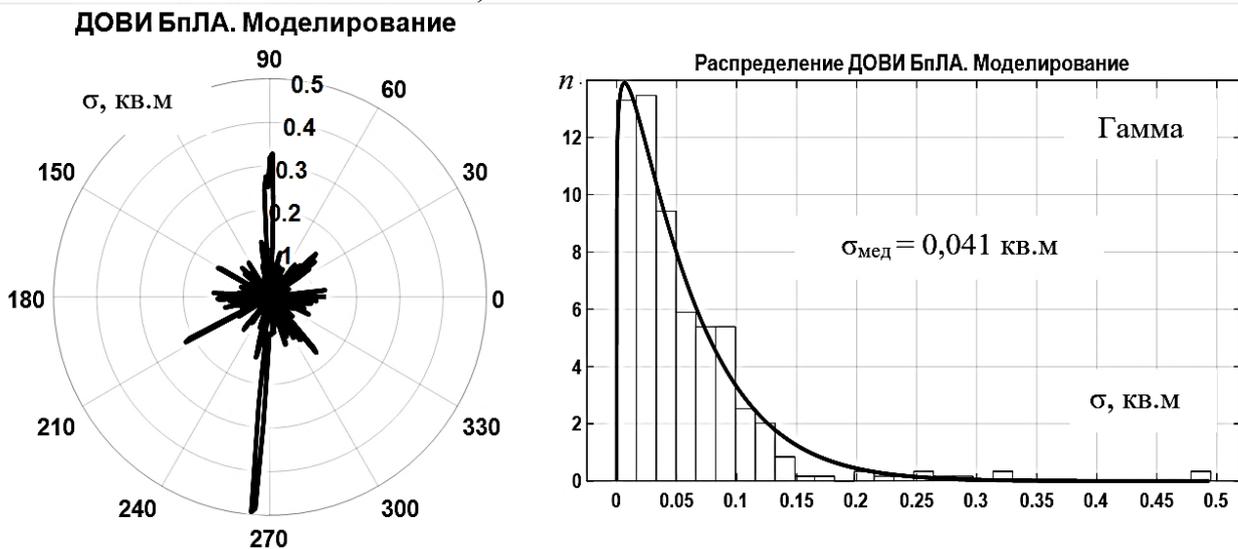
Рис. 10. ДОВИ БПЛА Chimera 7 Pro V2 в горизонтальной плоскости (слева), гистограммы и принятые законы опытных распределений ЭПР БПЛА (справа) для горизонтальной поляризации ЭМВ.



а) на частоте 3,0 ГГц



б) на частоте 5,0 ГГц



в) на частоте 10,0 ГГц

Рис. 11. ДОВИ БПЛА Chimera 7 Pro V2 в горизонтальной плоскости (слева), гистограммы и принятые законы опытных распределений ЭПР БПЛА (справа) для вертикальной поляризации ЭМВ.

В диапазоне частот облучения 3-10 ГГц принятый закон опытного распределения ЭПР БпЛА Chimera 7 Pro V2 остается постоянным, но изменяются его параметры. Такая трансформация законов распределения ЭПР БпЛА достаточно закономерна, поскольку логарифмически-нормальное распределение хорошо описывает распределение ЭПР от объектов с элементами, отражающими при некоторых углах падения почти зеркально [13]. К таковым в конструкции БпЛА Chimera 7 Pro V2 можно отнести протяженные грани его АКБ в горизонтальной плоскости, поскольку она не закрыта корпусом. При этом по результатам моделирования медианные значения ЭПР БпЛА Chimera 7 Pro V2 для горизонтальной поляризации ЭМВ и частот 5 и 10 ГГц соответственно составили 0,009 и 0,031 кв.м.

Из графиков на рис. 11 видно, что для вертикальной поляризации с увеличением частоты сигнала также происходит существенное уменьшение ширины лепестков ДОВИ. Кроме того, наблюдается также и проявление эффекта зеркального отражения ЭМВ. Это подтверждают и принятые законы аппроксимации опытных распределений, которые описывают распределение ЭПР с зеркальным отражением (логарифмически-нормальное для частоты 3 ГГц) и с доминирующими элементами (Вейбулла и Гамма распределения для частот 5 и 10 ГГц). Такая трансформация законов распределения ЭПР БпЛА для вертикальной поляризации ЭМВ объяснима. Связано это с тем, что с повышением частоты отношение  $ka$  возрастает и, во вторичном излучении наряду с резонансным, которое с ростом  $ka$  ослабевает, начинают усиливаться механизмы формирования рассеяния, характерные для квазиоптической области с доминирующими по интенсивности элементами отражения. При этом по результатам моделирования медианные значения ЭПР БпЛА Chimera 7 Pro V2 для вертикальной поляризации ЭМВ и частот 5 и 10 ГГц соответственно составили 0,016 и 0,041 кв.м.

## Заключение

В статье обоснован метод оценивания характеристик ЭПР сложных объектов на основе сочетания компьютерного моделирования и экспериментальных данных, полученных на этапе выполнения контрольного натурального эксперимента.

Предложенный метод от известных аналогов отличается следующим.

Во-первых, учет при проведении электродинамического моделирования диэлектрических свойств отдельных элементов сложных объектов, например, применительно к малоразмерному БПЛА – корпуса, винтов электрических двигателей и других элементов.

Во-вторых, этапом проверки сходимости результатов электродинамического моделирования с результатами контрольного натурального эксперимента по заданной системе критериев.

В-третьих, применением вейвлет-фильтрации при обработке экспериментальных данных с целью повышения отношения сигнала к шуму.

Практическая реализация метода, рассмотренная на примере оценивания характеристик ЭПР малоразмерного БПЛА Chimera 7 Pro V2 в S-диапазоне частот, показала, что совпадение законов опытных распределений по результатам моделирования и натуральных экспериментов произошло в 90 % случаев. Совпадение медианных значений эффективной площади рассеяния было обеспечено с точностью не хуже 3 дБ.

В связи с этим предложенный метод оценивания характеристик ЭПР сложных объектов может быть признан адекватным, а получаемые с его применением результаты – корректными.

Опираясь на теорию подобия и моделирования (ТПМ) [12], таким образом, возможно переходить к разработке и созданию моделей сложных объектов подобного класса и проводить исследования по установлению закономерностей их вторичного излучения.

В частности, в соответствии с теоремой подобия ТПМ признаками подобия физических систем, кроме геометрического подобия, являются

подобие отношений свойств материалов, сил и энергий [12]. Например, в случае малоразмерных БПЛА, ключевым является подобие геометрических размеров, формы и физических свойств материалов. Кроме того, в соответствии с первым дополнением к теореме подобия сложные системы подобны, если подобны все составляющие их подсистемы. Таким образом, можно заключить, что для конструкций малоразмерных БПЛА признаки подобия соблюдаются в достаточно полной мере.

Достоинством предложенного метода является возможность получения большого объема достоверных статистических данных по закономерностям вторичного излучения сложных объектов без проведения натурных экспериментов, влекущих за собой большие экономические и организационные затраты.

### Литература

1. Ширман Я.Д. и др. Радиолокационное распознавание и методы математического моделирования // Научно-технические серии. М.: ИПРЖР. – 2000.
2. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
3. Майзельс Е.Н., Торгованов В.А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей / Под. Ред. М.А. Колосова. М.: Сов. радио, 1972. – 232 с.
4. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. М.: Сов. радио. – 1975 – 248 с.
5. Сколник М.И. Справочник по радиолокации: в 2 т.; пер. с англ. / под ред. В.С. Вербы. Москва: Техносфера. – 2014.
6. Антипов С.А., Володько А.В., Ищенко Е.А. и др. Исследование влияния диэлектрической проницаемости материала на ЭПР // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16. – № 5. – С. 98-101.

7. Борзов А.Б., Быстров Р.П., Соколов А.В. Анализ радиолокационных характеристик объектов сложной пространственной конфигурации // Журнал радиоэлектроники. – 1998. – № 1.
8. Парнес М. Расчет эффективной поверхности рассеяния малых объектов // СВЧ электроника. – 2017. – № 2. – С. 22-24.
9. Разиньков С.Н., Борисов Д.Н., Богословский А.В. и др. Оценка эффективной площади рассеяния беспилотного летательного аппарата // Вестник РГРТУ. – 2022. – № 80. – С. 32-45.
10. Варламов Р.Г. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / Под ред. Р.Г. Варламова. М.: Сов. радио. – 1980. – 480 с.
11. Львова Л.А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов. Снежинск: РФЯЦ ВНИИТФ. – 2003. – 232 с.
12. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс. – 2005. – 304 с.
13. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь. – 1981. – 416 с.

**Для цитирования:**

Климов С.А., Обысов А.В., Битаев Е.С., Калачева А.А. Метод оценивания характеристик эффективной площади рассеяния сложных объектов на основе сочетания компьютерного моделирования и экспериментальных данных // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.7.7>