

DOI 10.30898/1684-1719.2020.3.11

УДК 621.396

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ В ТЕЛЕСНЫХ УГЛАХ ВЕРХНЕЙ ПОЛУСФЕРЫ

В. С. Грибков

Центральный научно-исследовательской институт ВКС Минобороны России

Статья поступила в редакцию 24 января 2020 г.

Аннотация. В работе предложена методика определения значений эффективной площади рассеяния (ЭПР) радиолокационных объектов в телесных углах верхней полусферы. Значения ЭПР радиолокационных объектов в произвольных телесных углах верхней полусферы определяются за счет совместной комплексной обработки экспериментальных и расчетных данных с учетом ограничений по условиям локации, точности и времени их получения.

Ключевые слова: эффективная площадь рассеяния, радиолокационный объект, телесный угол, верхняя полусфера.

Abstract. The paper describes a method for determining the values of the effective scattering area of radar objects in the solid corners of the upper hemisphere. The methodology uses experimental and calculated data. The values are determined due to joint integrated data processing and taking into account restrictions on the conditions of location, time and accuracy. The methodology organized an iterative verification of the convergence of the functions of probability distribution of values. All data is organized into arrays. Formulas for the distribution of data over solid angles are given. The paper presents the results of processing and comparing the known and new proposed methods.

Key words: effective scattering area, radar object, solid angle, upper hemisphere.

Данные по отражательным характеристикам радиолокационных объектов получают преимущественно с носовых ракурсов и в узких телесных углах, что

соответствует условиям наблюдения целей наземными радиолокационными станциями. В интересах оценки возможности создания радиолокационной информационной системы космического базирования для наблюдения за целями с ракурсов верхней полусферы необходимы соответствующие исходные данные по отражательным характеристикам различных радиолокационных объектов, которых в настоящее время недостаточно.

Это предопределяет цель работы – обеспечить возможность получения значений эффективной площади рассеяния (ЭПР) объектов в телесных углах верхней полусферы.

Данные по ЭПР радиолокационных объектов получают экспериментальными и теоретическими методами. Среди экспериментальных методов высокую точность результатов измерений обеспечивает метод физического моделирования [1].

Однако для определения ЭПР радиолокационных объектов методом физического моделирования с любого ракурса наблюдения верхней полусферы необходимо провести неприемлемо большое число экспериментов с различным сочетанием двух углов ориентации, что требует значительных временных затрат. При этом не все условия измерений технически осуществимы. Например, на открытых полигонах с гибкой системой подвеса [2] в зависимости от типа, габаритов и массы объектов согласно требованиям техники безопасности существуют ограничения на выставляемый угол тангажа (угол между строительной осью объекта и плоскостью земли), который не должен превышать $\pm 30^\circ$.

Развитие современной компьютерной техники и специализированных программ электродинамического моделирования, применение новых графических процессоров для обработки больших массивов информации, оптимизация алгоритмов и методов вычислений потенциально позволяют выполнять расчеты ЭПР радиолокационных объектов по их цифровым трехмерным моделям для любых длин волн, поляризаций и ракурсов наблюдения [3]. Однако основными недостатками теоретических методов

остаются длительное время расчета и необходимость проведения обязательной верификации результатов вычислений по экспериментальным данным.

Таким образом, известные экспериментальные и теоретические методы не позволяют получить необходимый объем данных по ЭПР радиолокационных объектов в телесных углах верхней полусферы при ограничениях по условиям локации, времени и точности. Это предопределяет задачу работы, состоящую в разработке методики определения значений ЭПР радиолокационных объектов в телесных углах верхней полусферы, обеспечивающей получение указанных характеристик на основе совместного использования экспериментальных и теоретических данных с учетом ограничений при проведении измерений и расчетов.

В силу угловой неопределенности условий наблюдения ЭПР представляют случайной величиной, которая описывается функцией распределения вероятности своих значений (законом распределения). Функции распределений вероятности значений ЭПР объектов получают путем статистической обработки их угловых диаграмм обратного отражения (ДОО) в области неопределенности угловых параметров с учетом вероятности распределения углов.

Предлагаемая методика предназначена для получения функций распределений вероятности значений ЭПР радиолокационных объектов в произвольных телесных углах верхней полусферы. При проведении статистической обработки в качестве исходных данных используются экспериментальные ДОО объектов исследования и расчетные ДОО их цифровых трехмерных моделей.

Суть предлагаемой методики состоит в следующем.

1. Существующие в методе физического моделирования ограничения по условиям локации и временным затратам можно уменьшить путем проведения экспериментальных исследований при нулевом угле тангажа и фиксированных углах крена (углы между плоскостью земли и плоскостью, в которой

расположен объект, повернутый вокруг своей строительной оси) с минимально допустимым шагом их изменения, соответствующим возможностям измерений.

Рассмотрим декартовую систему координат $OXYZ$ с началом в центре массы объекта (в данном случае – беспилотного летательного аппарата), расположенного при нулевых углах тангажа и крена в плоскости земли OXY , как показано на рис. 1.

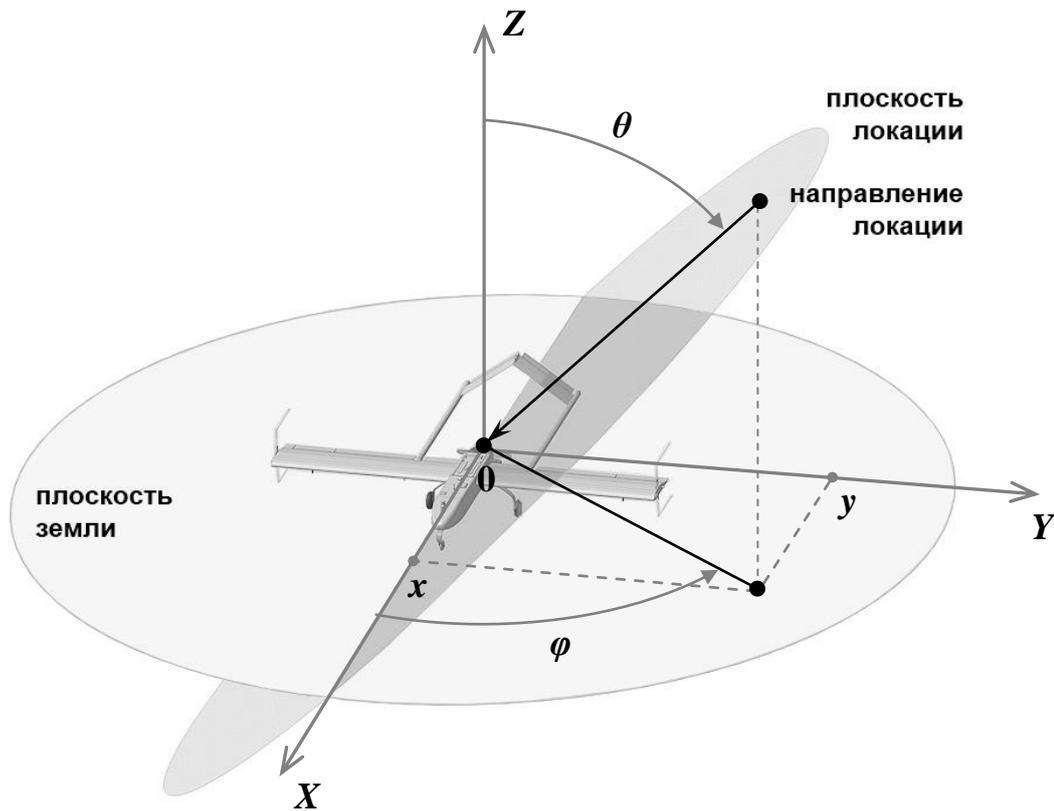


Рис. 1. Расположение объекта исследования.

Разобьем пространство верхней полусферы плоскостями локации, проходящими через ось OX . Произвольное направление локации в одной из этих плоскостей может быть задано декартовыми (x, y, z) или сферическими (θ, φ) координатами, которые связаны соотношениями:

$$x = \sin \theta \cos \varphi, \quad y = \sin \theta \sin \varphi, \quad z = \cos \theta,$$

$$\text{где } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi.$$

Вектор горизонтальной поляризации зондирующего сигнала лежит в плоскости локации, вертикальной – ортогонален к ней.

Для объекта симметричного относительно строительной оси ($0 \leq \varphi \leq \pi$) получаем:

$$y \geq 0, \varphi = \operatorname{arctg} \frac{y}{x}, \theta = \arccos z. \quad (1)$$

Повернем объект на угол крена γ так, чтобы рассматриваемая плоскость локации легла на плоскость земли (рис. 2).

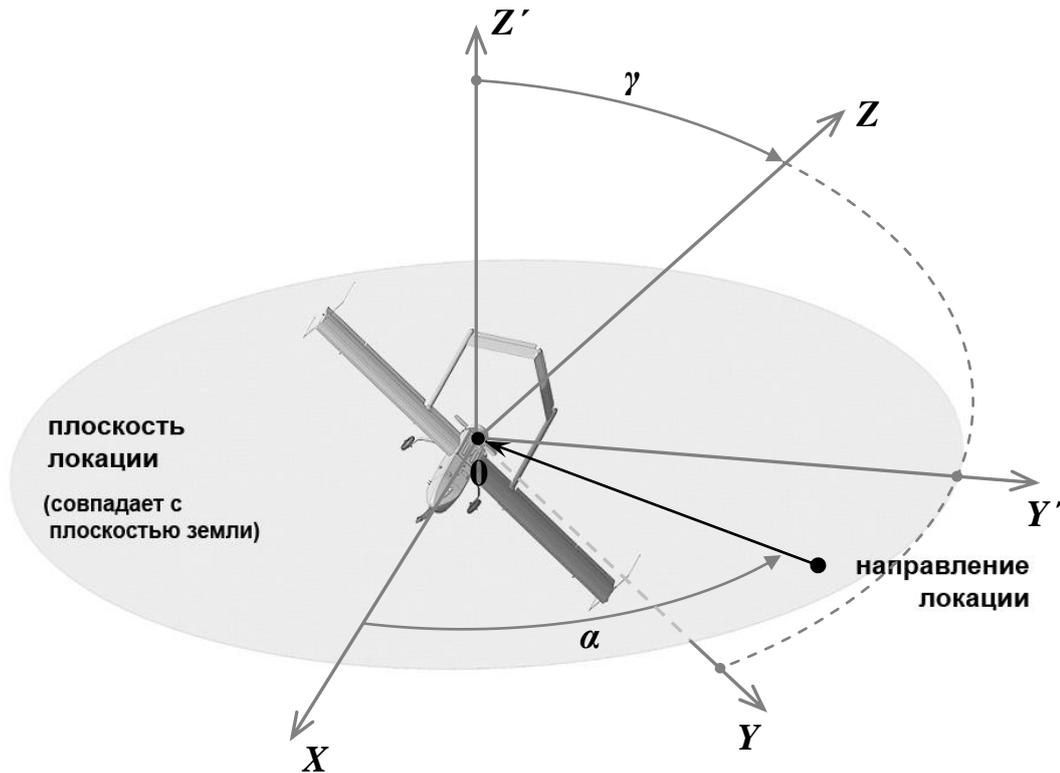


Рис. 2. Расположение объекта исследования.

Интерпретируя вращение объекта вокруг ортогональной к плоскости земли оси $0Z'$ как вращение направления локации в плоскости земли запишем вектор локации в новой системе координат $0X'Y'Z'$ в виде:

$$(\cos \alpha, \sin \alpha, 0),$$

где α – угол поворота (локации).

Вычислим декартовы координаты направления локации в первоначальной системе координат $0XYZ$ через углы крена γ и поворота α с помощью матрицы вращения:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix}$$

Откуда при $\sin \alpha \geq 0$ получаем:

$$x = \cos \alpha, \quad y = \cos \gamma \cdot \sin \alpha, \quad z = \sin \gamma \cdot \sin \alpha. \quad (2)$$

Из (1) и (2) имеем:

$$\varphi = \begin{cases} \arctg(\cos \gamma \cdot \tg \alpha), & \tg \alpha \geq 0 \\ \pi + \arctg(\cos \gamma \cdot \tg \alpha), & \tg \alpha < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\theta = \arccos(\sin \gamma \cdot \sin \alpha).$$

Для крайних значений углов крена γ направления локации следующие:

$(\cos \alpha, \sin \alpha, 0)$ при $\gamma = 0^\circ$, т.е. обход по экватору соответственно значениям сферических координат $\varphi = \alpha$ и $\theta = \pi/2$;

$(\cos \alpha, 0, \sin \alpha)$ при $\gamma = 90^\circ$, т.е. обход по меридиану начала отсчета со значениями сферических координат $\varphi = 0$ и $\theta = \pi/2 - \alpha$, если $\cos \alpha \geq 0$;

$$\varphi = \pi \text{ и } \theta = \alpha - \pi/2, \text{ если } \cos \alpha < 0.$$

2. Проведем измерения круговых ДОО объекта при нулевом угле тангажа и фиксированных углах крена с минимально допустимым шагом их изменения (порядка $3...5^\circ$ с учетом гибкой системы подвеса) в диапазоне $0...90^\circ$, если объект симметричен относительно строительной оси и $-90...90^\circ$ – если несимметричен.

3. Двигаясь с фиксированным шагом вдоль меридиан и параллелей верхней полусферы разобьем ее пространство на телесные углы (рис. 3).

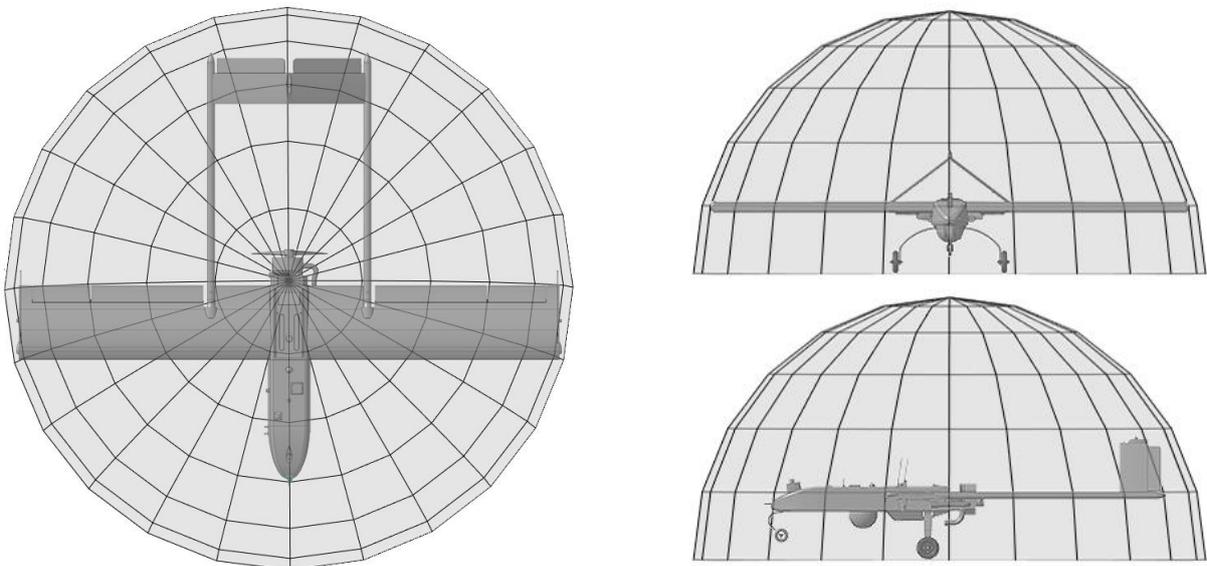


Рис. 3. Пример разбиения пространства верхней полусферы на телесные углы.

Размер шага в представленном на рис. 3 разбиении составляет 15° по меридиану и параллели.

Каждый отсчет круговых ДОО объекта однозначно определяется углами крена γ и поворота α . Последовательно просматривая угловые отсчеты измеренных ДОО, в соответствии с (3) распределяем их по телесным углам, пределы изменения которых заданы координатами (θ, φ) . При попадании отсчета в один из телесных углов, добавляем значение этого отсчета в соответствующий данному телесному углу массив экспериментальных значений ЭПР объекта.

На рис. 4 приведен пример распределения экспериментальных значений ЭПР из ДОО объекта с креном 25° по телесным углам верхней полусферы.

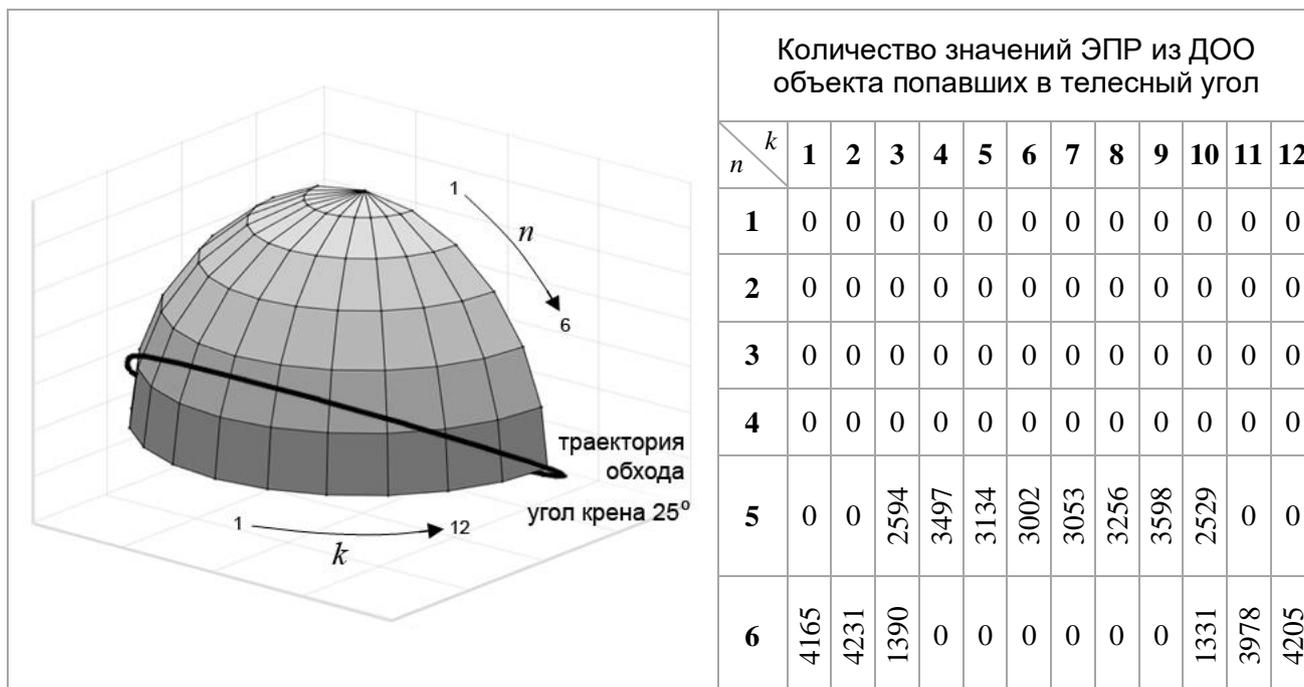


Рис. 4. Пример распределения экспериментальных данных.

Нумерация телесных углов на рисунке отсчитывается сверху вниз ($n = 1...6$) и слева направо ($k = 1...12$). Например, в телесный угол № 6.1 попало 4165 значений ЭПР объекта, а № 6.12 – 4205.

4. Для определения достаточности объема набранных данных проведем в телесных углах итерационную проверку сходимости функций распределений вероятности значений ЭПР объекта от количества обрабатываемых элементов массивов. В качестве критерия достаточности сходимости выберем

среднеквадратичное отклонение (СКО) итерационных отличий получаемых распределений вероятности.

Итерации проводим следующим образом.

Последовательно просмотрим все участки ДОО объекта, попавшие в исследуемый телесный угол и обозначенные пунктирной линией на рис. 5.



№ участка ДОО объекта	1	2	3	4	5	6	7
Угол крена объекта	33°	30°	27°	25°	22°	20°	18°
Количество значений ЭПР из ДОО объекта, попавших в телесный угол	276	2899	3368	3256	3462	3452	3531

Рис. 5. Пример участков ДОО объекта, попавших в телесный угол.

На первом шаге итерационного процесса проводим статистическую обработку элементов массива, принадлежащих участку ДОО объекта с максимальным количеством значений его ЭПР.

На следующих итерационных шагах к обрабатываемым данным добавляем значения ЭПР объекта сначала участка ДОО с максимальным их количеством из оставшихся, а затем с минимальным до объема, превышающего число элементов массива предыдущего шага в два и более раза. Проводим статистическую обработку набранных данных.

Начиная со второго шага итерационного процесса, рассчитываем СКО отличий функций распределений вероятности значений ЭПР объекта текущего и предыдущего шагов. Указанные итерации повторяем до тех пор, пока в телесном угле не останется данных со значениями ЭПР объекта. На последнем

шаге итерационного процесса проводим статистическую обработку значений ЭПР объекта из всех попавших в телесный угол участков его ДОО.

Если СКО отличий, полученных на последнем и предпоследнем шагах, в диапазоне вероятностей 0,01...0,99 не превышает 1 дБ, то объем набранных данных для оценки функции распределения вероятности значений ЭПР объекта в исследуемом телесном угле считаем достаточным.

На рис. 6 приведены результаты статистической обработки данных для одного из телесных углов исследуемого объекта и зависимость СКО отличий функций распределений вероятности значений его ЭПР от количества итераций.

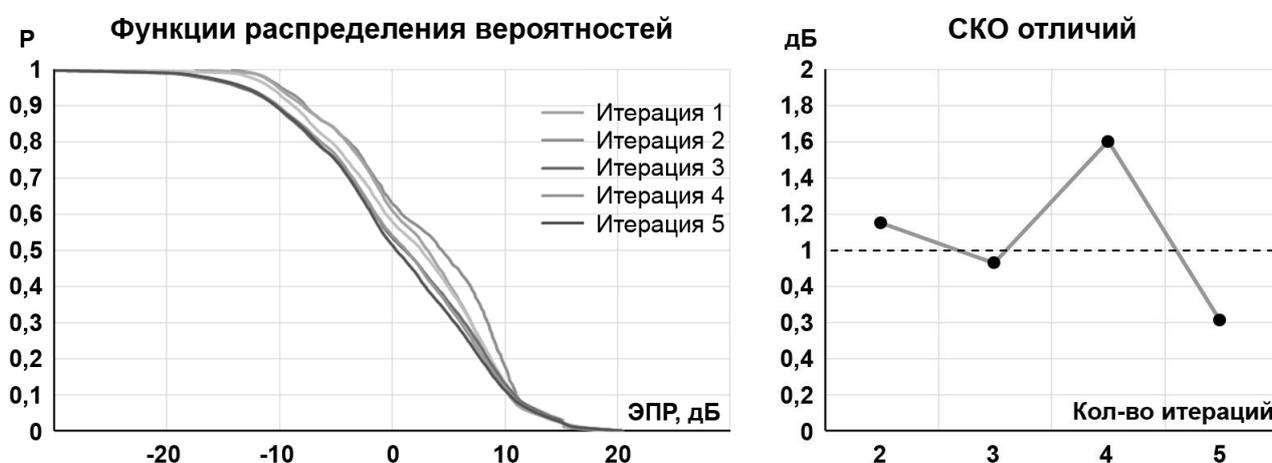


Рис. 6. Пример результатов статистической обработки данных.

В результате выполненной для всех телесных углов статистической обработки попавших в них данных, определяем телесные углы с итерационно сходящимися функциями распределений вероятности значений ЭПР объекта и углы, где данных для сходимости недостаточно (рис. 7).

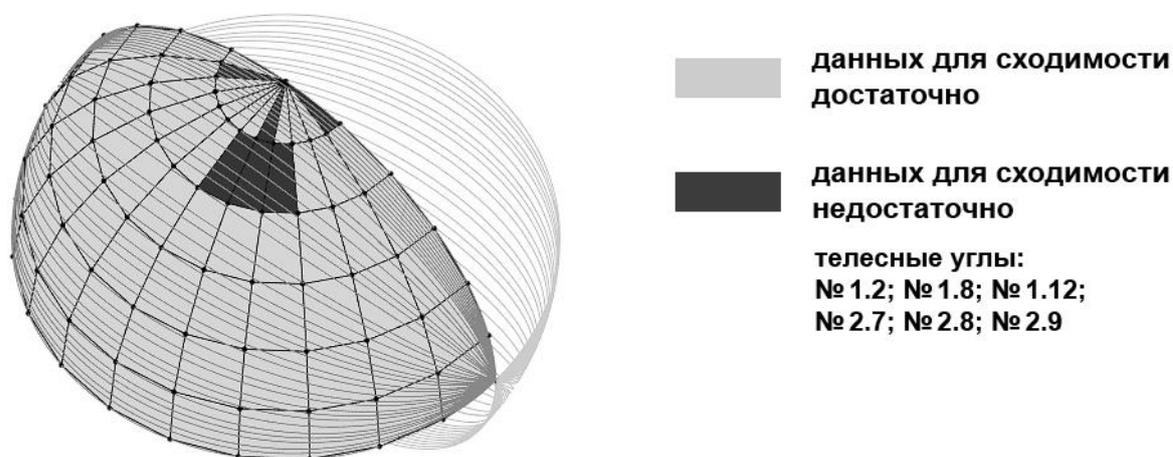


Рис. 7. Пример результатов статистической обработки данных.

5. В каждом телесном угле, где набранных данных для сходимости недостаточно, используя программу электродинамического моделирования, выполним предварительный расчет участка ДОО цифровой трехмерной модели с креном, соответствующим попавшему в этот угол участку измеренной ДОО объекта с максимальным количеством значений ЭПР.

Проведем верификацию полученных результатов расчета путем их сравнения с экспериментальными данными. Критерием проверки является оценка превышения СКО отличий функций распределений вероятности значений ЭПР объекта расчетного и измеренного участков его ДОО для исследуемого телесного угла. Если СКО отличий в диапазоне вероятностей 0,01...0,99 превышает 1 дБ, то уточняем цифровую трехмерную модель поверхности объекта и параметры ее разбиения, изменяем программные настройки и повторяем расчеты до успешного прохождения верификации.

На рис. 8 проиллюстрирован пример верификации расчета по исходной и уточненной модели поверхности объекта.

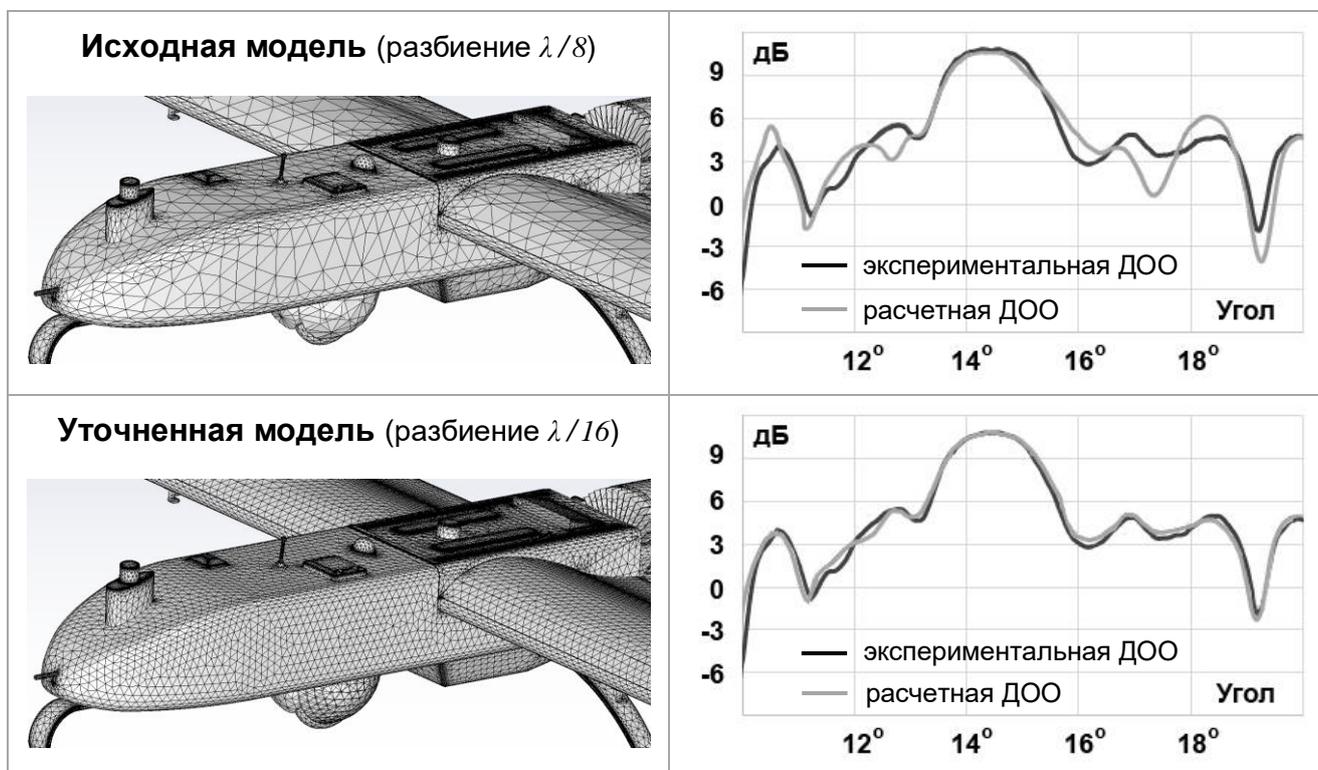


Рис. 8. Пример верификации расчета по исходной и уточненной модели.

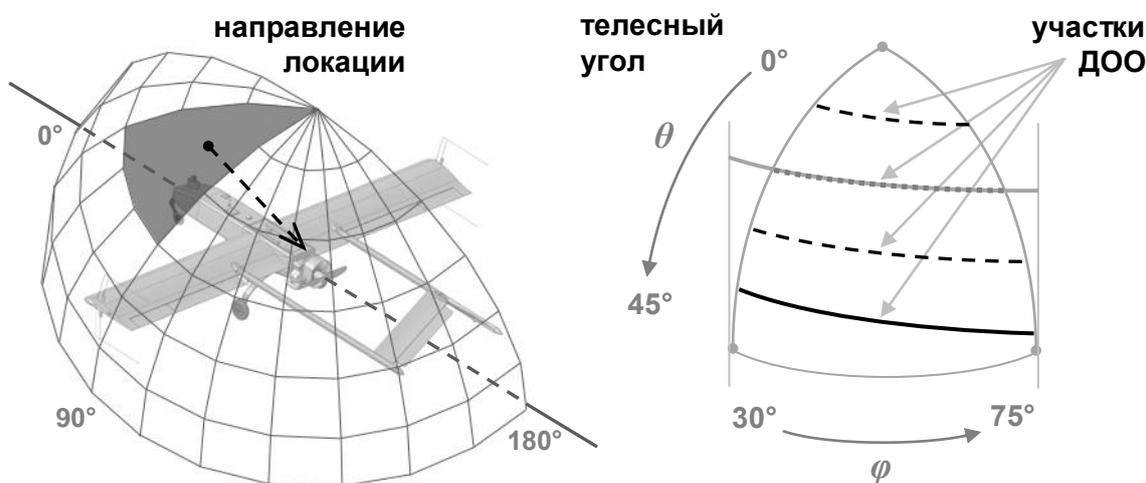
После верификации предварительных расчетов, по уточненной модели вычисляем участки ДОО для дополнительных кренов, попадающих в

исследуемый телесный угол, и добавляем их в массив данных для статистической обработки – до тех пор, пока итерационная сходимость функций распределений вероятности ЭПР объекта в этом угле не будет обеспечена.

Сравним результаты работы известной методики и предлагаемой.

Известная методика оценки ЭПР объекта в телесном угле верхней полусферы основана на измерениях указанных значений при крене, обеспечивающем прохождение плоскости локации через рассматриваемый угол. При этом статистическая обработка данных проводится даже по одной измеренной ДОО объекта, без последующей проверки сходимости статистик. Кроме того, используются участки ДОО объекта, примерно попадающие в исследуемый телесный угол, без точной привязки к его границам.

На рис. 9 изображен произвольный телесный угол верхней полусферы и представлен перечень данных, используемых известной методикой и предлагаемой.



Данные для известной методики	Данные для предлагаемой методики
— обрабатываемый участок измеренной ДОО	----- обрабатываемый участок измеренной ДОО с привязкой к границам телесного угла
	— обрабатываемый участок дополнительной измеренной ДОО с привязкой к границам телесного угла
	- - - расчетные участки дополнительных ДОО с привязкой к границам телесного угла

Рис. 9. Произвольный телесный угол и перечень данных для обработки.

Функции распределений вероятности значений ЭПР объекта в рассматриваемом телесном угле, полученные путем статистической обработки известной и предлагаемой методикой, изображены на рис. 10.

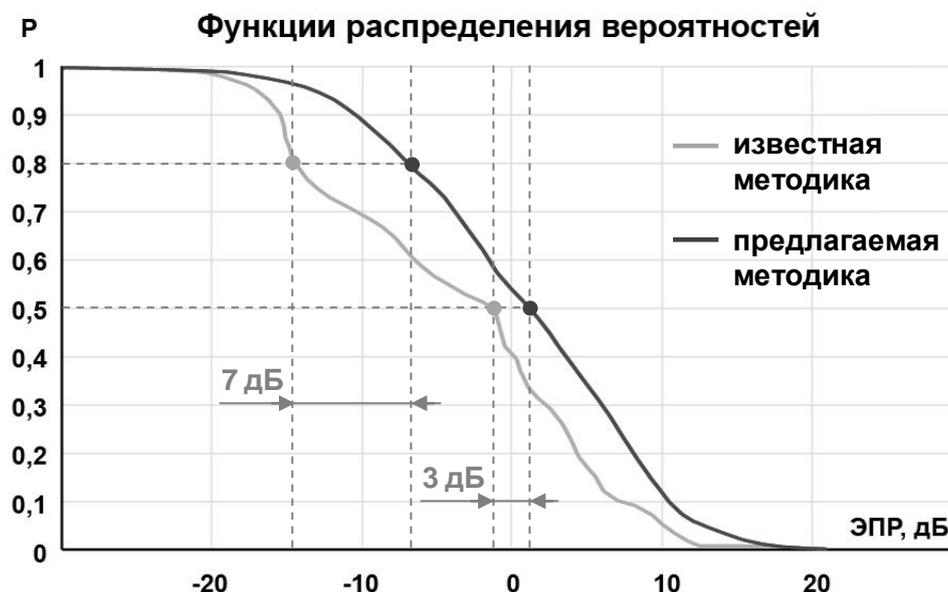


Рис. 10. Функции распределений вероятности значений ЭПР объекта.

Согласно результатам работы предлагаемой методики, уточненные значения ЭПР объекта позволяют повысить вероятность правильного его обнаружения по уровням 0,5 и 0,8 на 3 и 7 дБ соответственно. Это позволяет сделать вывод о возможности обнаружить исследуемую цель на большей (до 20%) дальности или снизить потенциал радиолокационной станции.

Таким образом, предлагаемая методика за счет совместной комплексной обработки экспериментальных и расчетных данных, обеспечивает получение значений ЭПР объектов в телесных углах верхней полусферы при ограничениях по условиям локации, времени и точности.

Литература

1. Радиолокационные характеристики объектов. Методы исследования. Монография / Под ред. С.М. Нестерова. - М.: Радиотехника, 2015.
2. Эталонный радиолокационный измерительный комплекс «ЭРИК-1» // Оружие и технологии России. Энциклопедия 21 век. Т. IX. Противовоздушная и противоракетная оборона. ИД «Оружие и технологии». 2005.

3. CST Studio Suite. 3D Electromagnetic Field Simulation Software [online]. URL:
<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>

Для цитирования:

Грибков В.С. Методика определения эффективных значений площади рассеяния радиолокационных объектов в телесных углах верхней полусферы. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar20/11/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.3.11