

# РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЯНИЯ МАЛЫХ ОБЪЕКТОВ

В статье рассматривается вопрос аналитического и численного расчета эффективной поверхности рассеяния таких объектов, как поражающие металлические предметы (пули и снаряды), а также малые летательные аппараты (квадрокоптеры Phantom3 и беспилотный самолет RQ-11 Raven). Расчет ЭПР позволяет определить дальность их обнаружения радиолокатором.

Эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) тела — это параметр, который показывает соотношение плотности мощности отраженной и падающей на цель мощности. Зная мощность излучения и это соотношение, можно определить мощность сигнала, вернувшегося в приемник РЛС.

В литературе имеются многочисленные данные по ЭПР крупных объектов: машин, самолетов, кораблей, но в разделе для малых объектов (например, беспилотников) указывается, что ЭПР близка к нулю. Для нового поколения радаров ставится задача обнаружения таких объектов для предупреждения поражения ими вертолета или самолета. Поэтому точное определение ЭПР малых объектов позволит конструировать радары для средств предупреждения нападения и защиты от него, а также для информирования о приближении нежелательных дронов, несущих камеры или опасные предметы на охраняемую территорию.

В статье рассматриваются малые объекты, поверхность рассеяния которых существенно меньше 1 кв. м. Статья не претендует на полноту описания всех малых летательных аппаратов и поражающих предметов стрелкового и реактивного оружия, но в каждом классе будет рассмотрен типичный образец для проведения расчетов и анализа его видимости в двух основных радиодиапазонах X и Ku (10 ГГц и 16 ГГц) при различных ракурсах наблюдения

и поляризации. В статье рассмотрены следующие поражающие предметы: пули АКМ и бронебойная Б-32, граната подствольного гранатомета РПГ, баллистический оперенный подкалиберный снаряд БОПС, а также беспилотные летательные аппараты: квадрокоптер Phantom3 и беспилотный самолет RQ-11 Raven.

ЭПР используется в основном уравнении радиолокации для определения потенциала радара, то есть дальности обнаружения объектов. В связи с неопределенностью рабочей частоты и типа поляризации радиосигнала целесообразно провести расчеты для двух перспективных диапазонов радиоволн X и Ku. Отражение от цели как результат решения электродинамической задачи зависит от геометрии цели, ракурса наблюдения из точки расположения антенны радара, длины волны и типа используемой поляризации. Если условие наблюдения за целью заранее неизвестно, целесообразно для полноты информации решать задачи отражения для двух ортогональных поляризаций. Эти данные позволят в последующем выбрать оптимальную поляризацию, исходя из свойств рассеяния пеленгуемого объекта и условий распространения радиоволн. Например, для цели на фоне неба можно работать как с линейной, так и с круговой поляризацией, а для цели над земной поверхностью и на фоне лесного массива лучшие результаты будут

достигнуты для линейной вертикально поляризованной волны.

Данные по ЭПР необходимы для выполнения расчетов обнаружения цели по основному уравнению радиолокации, в котором кроме таких параметров радиоаппаратуры, как мощность передатчика и усиление антенны, необходимо знать статистические величины: ЭПР и отношение сигнал/шум. Соотношение сигнал/шум определяет такие свойства радара, как вероятность ложных тревог и правильных обнаружений, а главное, определяет дальность обнаружения. При этом ЭПР является статистической функцией, меняющейся от угла наблюдения, и определяется формой цели и отражающими свойствами ее поверхности. Будем считать, что рассматриваемые в статье объекты, состоящие из металлических и диэлектрических деталей, не имеют покрытий, снижающих радиолокационную заметность.

Аналитически ЭПР  $\sigma$  можно рассчитать только для самых простых геометрических фигур. Соотношения для расчета  $\sigma$  простых тел в случае  $\lambda \ll r$  следующие:

шар: 
$$\sigma = \pi r^2, \quad (1)$$

цилиндр: 
$$\sigma = \frac{\pi d h^2}{\lambda}, \quad (2)$$

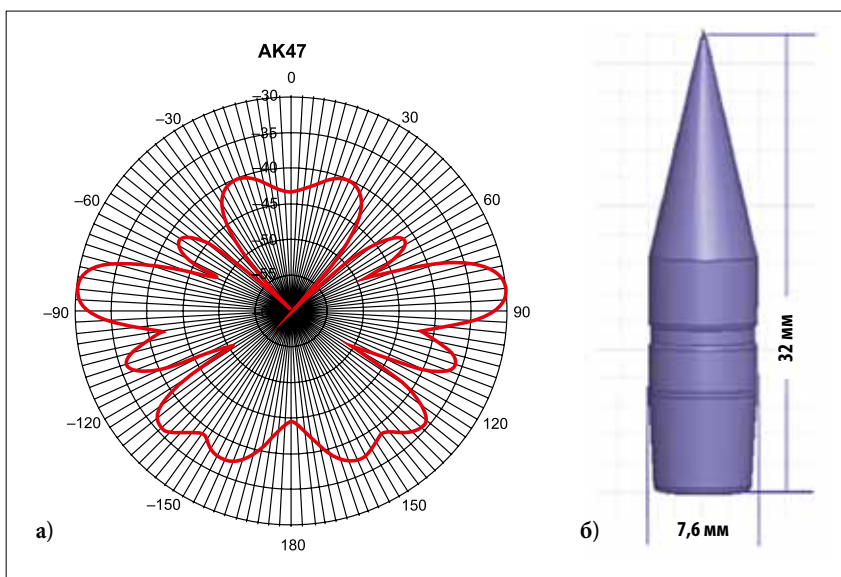
металлическая пластина: 
$$\sigma = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2}, \quad (3)$$

где:  $\lambda$  — длина волны,  $r$  — радиус,  $d$  — диаметр,  $h$  — высота,  $S$  — площадь пластины.

Рассматриваемые малые объекты соизмеримы с длиной волны, поэтому формулы (1–3) дают значительную ошибку, так как размеры тел находятся в Рэлеевской зоне Ми [1]. В ряде случаев ЭПР удобно измерять не в  $m^2$ , а в децибелах от  $m^2$ , обозначаемых  $dBm^2$ . Например, для металлической сферы радиусом 5 мм по формуле (1) получается значение  $-41$   $dBm^2$ , а полноволновый расчет в X-диапазоне дает существенно другую величину  $-35,5$   $dBm^2$ . Объекты, у которых размеры неизвестны, измеряются экспериментально, для этого требуется специализированный измерительный стенд. В зависимости от размеров объекта это делается либо в безэховой камере, либо в свободном пространстве на открытых полигонах. Для сложных тел, у которых известны размеры и диэлектрические свойства составляющих деталей, успешно используются численные компьютерные методы.

На рис. 1 приведены результаты расчета ЭПР пули АКМ в главном сечении трехмерной диаграммы рассеяния. Для полноты предоставления поляризационной информации цель облучается плоской E-волной с двумя ортогональными компонентами сферической системы координат E-Phi и E-Theta. По круговой диаграмме можно определить ЭПР в носовом и боковом направлении, то есть в направлении вдоль линии полета и в перпендикулярном. Можно найти максимальное и минимальное значения в диапазоне углов  $0-360^\circ$ , но для последующего использования в уравнении радиолокации интерес представляет усредненное значение, для чего в программе EXCEL создается массив из 360 отсчетов и находятся их среднеарифметическое и медианное значения.

Обнаружение малых объектов является наиболее сложной проблемой при реализации радара. Для работы с малыми целями целесообразно использовать РЛС со сложным когерентным широкополосным сигналом со скважностью  $q = 5$  и устройство обработки с когерентным накоплением результатов зондирования, что позволяет обеспечить обнару-



▲ Рис. 1. ЭПР (в  $dBm^2$ ) пули АКМ в X-диапазоне для горизонтальной поляризации (а) и ее эскиз (б)

жение пули при малой средней мощности. При этом приемопередатчик может быть твердотельным.

Рассмотрим РЛС, работающую в Ku-диапазоне волн ( $l = 2$  см) с импульсной мощностью  $P_{имп} = 20$  Вт, и определим ее способность запеленговать пулю калибром 7,62 мм. Для этих исходных данных можно рассчитать минимальную мощность  $P_{мин}$ , обнаруживаемую приемником РЛС, для передатчика с мощностью  $P_{имп}$ , предполагая, что РЛС должна обнаруживать объект диаметром  $d = 7,62$  мм на расстоянии около  $R = 200$  м при коэффициенте усиления антенны  $G = 23$  дБ, соответствующем ширине диаграммы направленности  $4 \times 30^\circ$ .

Минимальная мощность обнаруживаемого сигнала в приемном тракте РЛС (пороговая чувствительность) определяется из выражения [1]:

$$P_{мин} = \frac{P_{имп} \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{q \cdot R^4 \cdot (4\pi)^3} \cdot (4) \quad (4)$$

Для определения требуемой мощности передатчика в рассматриваемом случае  $P_{имп}$  необходимо учитывать ЭПР пули. Диаграмма обратного рассеяния объекта в зависимости от угла наблюдения обрабатывается и усредняется как стати-

стическая функция. В табл. 1 приводятся среднее арифметическое  $\sigma_{cp}$  значение ЭПР для двух линейных типов поляризации. Медианное значение  $\sigma_m$  примерно в 1,5 раза меньше среднего арифметического  $\sigma_{cp}$ . Эти значения требуются для расчета потенциала радара по флуктуационным моделям Сверлинга [2].

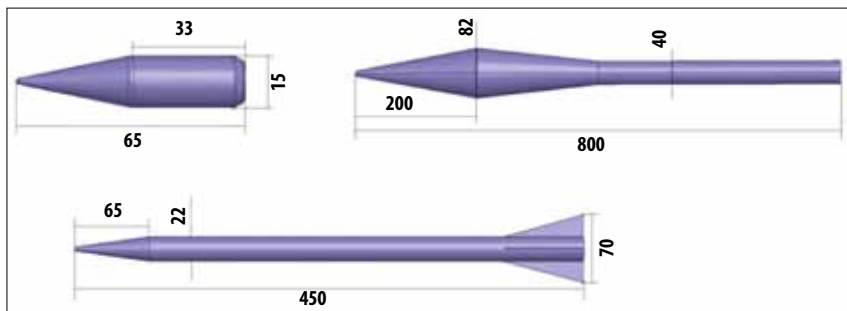
Результаты математического моделирования пули для пули АКМ представлены на рис. 1, при этом среднее значение ЭПР составляет  $\sigma_{cp} = 2 \cdot 10^{-4} m^2$ . При подстановке этого значения в (4) величина минимальной чувствительности РЛС составит  $P_{мин} = 3,2 \cdot 10^{-15}$  Вт или  $-115$   $dBm$ . Это значение достижимо при использовании современного маломощного усилителя с коэффициентом шума 3 дБ при мощности передатчика  $P_{имп} = 20$  Вт, при этом соотношение сигнал/шум будет не менее 200, что позволяет обнаружить пулю с вероятностью 0,99.

Аналогичные расчеты ЭПР других поражающих объектов: пули Б-32, подкалиберного снаряда БОПС и гранаты РПГ, выполненные численными методами, представлены в табл. 1. При расчете использовались размеры этих объектов, показанные на рис. 2.

Анализ полученных результатов по объектам, приведенным на рис. 2,

Таблица 1. Расчетные значения ЭПР для малых поражающих объектов

Объект	Размеры объекта (длина×диаметр), мм	ЭПР в X-диапазоне, $m^2$		ЭПР в Ku-диапазоне, $m^2$	
		$\sigma_{cp}$ (горизонтальная поляризация)	$\sigma_{cp}$ (вертикальная поляризация)	$\sigma_{cp}$ (горизонтальная поляризация)	$\sigma_{cp}$ (вертикальная поляризация)
Пуля АКМ	32×7,6	0,0003	0,0001	0,0002	0,0001
Пуля Б-32	66×15	0,0008	0,0004	0,0006	0,0004
БОПС 1М1	450×22	0,013	0,077	0,06	0,02
Заряд РПГ	88×40	0,02	0,02	0,03	0,03



▲ Рис. 2. Эскизы пули Б-32, гранаты РПГ и оперенного снаряда «ИМ»

показывает закономерность, связанную с их удлиненной по оси X геометрической формой: ЭПР в горизонтальной поляризации в несколько раз больше ЭПР в вертикальной поляризации. Использование круговой поляризации будет проигрывать в потенциале по сравнению с горизонтальной поляризацией, так как круговая поляризация состоит из двух ортогональных квадратурных составляющих, а расчеты показывают, что ЭПР по круговой волне больше, чем для вертикальной, но меньше, чем для горизонтальной. Выбор поляризации РЛС, исходя из отражающих свойств объекта, является предварительным, так как условия радиовидимости на фоне неба и на фоне земли различны, но эти соображения выходят за рамки статьи.

Поражающие объекты, приведенные в табл. 1, представляют собой цельнометаллические тела вращения с одним граничным условием на поверхности, а легкие беспилотные летательные аппараты (БЛА) состоят из множества деталей, как металлических, так и диэлектрических. Полная трехмерная модель БЛА состоит из нескольких сотен элементов.

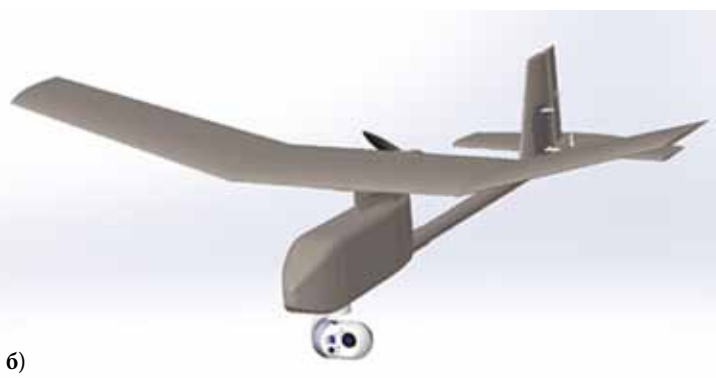
Всего несколько из них металлические: аккумулятор, двигатели, камера, электрические провода, а остальные — пластиковые элементы, в основном из полистирола с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2,2$  и стеклопластика с  $\epsilon = 4,5$ . Размер квадрокоптера Phantom3 по диагонали составляет 590 мм, включая пропеллеры, а высоту 200 мм. Беспилотный самолет RQ-11 Raven имеет размах крыльев 1230 мм и длину 1100 мм. Используемые для численных расчетов трехмерные модели показаны на рис. 3.

Для тел такой сложной геометрической формы, как квадрокоптер и БЛА, нет преимущественных размеров вдоль оси X, Y или Z. По этой причине рассчитанные величины ЭПР падающей волны примерно одинаковы для двух линейных поляризаций (табл. 2), а значит, и для круговой поляризации.

Полученные данные по ЭПР квадрокоптера и БЛА, сведенные в табл. 2, позволяют по соотношению (4) сделать расчет РЛС для обнаружения таких объектов. Расчеты показывают, что при мощности передатчика в 20 Вт и антенне с усилением 25 дБ дальность надежного обнаружения составит 1,5–2 км.

Таблица 2. Расчетные значения ЭПР для квадрокоптера и беспилотного самолета

Объект	ЭПР в X-диапазоне, м <sup>2</sup>			ЭПР в Ku-диапазоне, м <sup>2</sup>		
	$\sigma_{\varphi}$ горизонтальная поляризация	$\sigma_{\varphi}$ вертикальная поляризация	$\sigma_m$ медианное значение	$\sigma_{\varphi}$ горизонтальная поляризация	$\sigma_{\varphi}$ вертикальная поляризация	$\sigma_m$ медианное значение
Phantom3	0,06	0,06	0,03	0,09	0,09	0,05
RQ-11 Raven	0,08	0,07	0,011	0,13	0,13	0,013



▲ Рис. 3. Трехмерные модели квадрокоптера Phantom 3 (а) и БЛА RQ-11Raven, построенные в программе «Компас-3D» (б)

## ВЫВОДЫ

Современные средства компьютерного моделирования позволяют проводить надежные расчеты ЭПР металлических объектов, что подтверждается сравнением численных и аналитических расчетов для простых геометрических фигур. Калибровку численных программ расчета ЭПР целесообразно и надежно проводить по шару, аналогично тому, как это делается в натуральных испытаниях. При этом следует выбирать соотношение диаметра шара и рабочей длины волны так, чтобы не находиться в зоне Ми, то есть чтобы диаметр был больше нескольких длин волн.

Увеличение рабочей частоты пеленгования не приводит к существенному пропорциональному увеличению ЭПР, то есть можно говорить о слабой частотной зависимости поверхности рассеяния в диапазонах X и Ku.

Анализ полученных данных по ЭПР пуль и снарядов показал преимущество использования в радаре горизонтальной поляризации, а для объектов более сложной формы возможно использование как линейной, так и круговой поляризации.

Проведенные расчеты и полученные данные ЭПР малых объектов показывают, что при использовании когерентных зондирующих сигналов радаром с мощностью передатчика в несколько десятков ватт возможно обнаружение малых квадрокоптеров и даже пуль. —

## ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника. Том 1. Основы радиолокации. М.: Сов. радио, 1976.
2. Ingo Harre. RCS in radar range calculation for Maritime Target. Bremen, Germany. <http://www.mar-it.de>.