## Глава 3

## Характеристики рассеяния некоторых воздушных и наземных объектов

Эта глава носит справочный характер и, по сути дела, подытоживает теоретические исследования, проведенные в первых двух главах. В ней приводятся результаты математического моделирования радиолокационных характеристик рассеяния образцов воздушной и наземной техники, полученные на основе предложенных в предыдущих главах методов.

Приводятся следующие радиолокационные характеристики: круговые диаграммы мгновенной ЭПР, средние и медианные значения ЭПР в конкретных диапазонах ракурсов облучения. Указанные характеристики рассчитаны для ряда воздушных (бомбардировщика В-2, дальнего бомбардировщика Ту-22МЗ, пассажирского самолета Boeing-737, транспортного самолета Ан-26, истребителя МиГ-29, истребителя F-16, крылатой ракеты AGM-86 ALCM при зондировании на углах места, близких к плоскости крыла) и наземных (основного боевого танка российского производства – Т-90, немецкого танка – Leopard-2, американского танка – M1A1 Abrams при зондировании под разными углами места) объектов.

Кроме того, рассчитаны круговые диаграммы такой радиолокационной характеристики, как "некогерентная" ЭПР. Под некогерентной ЭПР радиолокационного объекта (так же, как и в главе 2) будем понимать сумму ЭПР участков эллипсоидов и кромочных участков, из которых формируется модель поверхности объекта.

Поскольку ракурс радиолокационной цели можно считать случайным, то и величина ЭПР в каждый отдельный момент времени является случайной. Законы распределения этой случайной величины можно определить по рассчитанным (или экспериментально снятым) диаграммам мгновенной ЭПР. Наравне с ЭПР  $\sigma$  в радиолокации часто используется величина  $\sqrt{\sigma}$ , которая пропорциональна амплитуде отраженного от цели сигнала. Поэтому в данной главе приведены гистограммы распределения амплитудного множителя отраженного сигнала  $\sqrt{\sigma}$  при зондировании объектов с основных ракурсов. Из ряда распределения, Г -распределения) были выбраны наиболее согласующиеся с эмпирическими распределения и в соответствии с критерием Колмогорова-Смирнова (при этом определялись параметры теоретических распределений).

В радиолокации при расчетах дальности обнаружения цели с вероятностью 0,5 необходимо иметь медианное значение ЭПР цели. Поэтому для всех рассматриваемых в данной главе радиолокационных целей приведены медианные значения ЭПР для конкретных азимутальных секторов облучения. Под медианным значением ЭПР в конкретном секторе углов облучения понимается некоторое неслучайное значение ЭПР, вероятности превышения и непревышения которого случайной величиной ЭПР в заданном секторе углов равны 0,5.

Все перечисленные выше характеристики приведены для случая совмещенного приема.

## 3.1. Характеристики рассеяния воздушных объектов

Для воздушных объектов результаты расчетов приведены для следующих частот облучения: 10 ГГц (длина волны 3 см), 3 ГГц (длина волны 10 см), 1 ГГц (длина волны 30 см), 166 МГц (длина волны 1,8 м). Параметры облучения принимались следующими. Шаг изменения азимута зондирования 0,02°, азимут β (рис.3.1) отсчитывается от носового ракурса (0° соответствует зондированию в нос самолета, 180° – зондирование в хвост). Учитывая, что ракурс самолета в угломестной плоскости может флюктуировать во время его полета, угол места зондирования выбирался случайным, равномерно распределенным в диапазоне -3°±4° относительно плоскости крыла (угол места -3° соответствует зондированию из нижней полусферы (рис. 3.1)). Результаты получены для случая совмещенного приема для двух ортогональных поляризаций зондирующего сигнала: горизонтальной – вектор напряженности электрического поля падающей волны  $\vec{p}_{r}^{0}$  лежит в плоскости крыла; вертикальной – вектор напряженности электрического поля падающей волны  $\vec{p}_{\rm B}^0$  ортогонален  $\vec{p}_{\rm F}^0$  и лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости крыла и проходящей через вектор направления падающей плоской волны. Далее, на всех рисунках синим цветом обозначен случай горизонтальной поляризации падающей волны, малиновым цветом – случай вертикальной поляризации.



Рис. 3.1. Геометрия облучения воздушного объекта

Гистограммы распределения амплитудного множителя отраженного сигнала (квадратного корня из ЭПР) приведены для диапазона азимутов облучения –20°...+20° ("носовые" ракурсы

воздушных радиолокационных объектов) и случая горизонтальной поляризации падающей электромагнитной волны.

Приведены теоретические функции плотности вероятности распределения амплитудного множителя отраженного сигнала (из ряда распределений, указанных выше), наиболее согласующиеся с полученными эмпирическими распределениями по критерию Колмогорова-Смирнова. На рисунках с изображением гистограмм амплитудного множителя черной линией изображены плотности распределения (указанные на полях рисунков), домноженные на площади соответствующих гистограмм.

Следует отметить, что в ряде случаев, несмотря на удовлетворительное согласие по критерию Колмогорова-Смирнова, кривые теоретических плотностей распределения могут заметно отличаться от огибающих гистограмм. В этом случае пользователь может попытаться найти другие теоретические распределения, плотности которых точнее согласуются с приведенными гистограммами, либо непосредственно использовать гистограммы.

## 3.1.1. Характеристики рассеяния стратегического бомбардировщика В-2

Контракт на создание бомбардировщика-"невидимки" под кодовым обозначением АТВ был подписан с компанией Northrop в 1981 году [47]. Кроме фирмы Northrop в программе принимали участие следующие компании: Boeing (создание радиоэлектронного оборудования), Ling-TeamCo Wout (новые материалы и конструкции) и General Electric (двигатели). Первый полет самолета, который получил в 1987 году официальное обозначение В-2, состоялся в 1989 году. В 1993 году первый самолет В-2 поступил на вооружение BBC США. В настоящее время из 21 самолета В-2 16 находятся в строю, четыре используются в качестве тренировочных и один в качестве летающей лаборатории для отработки перспективных высокоточных систем вооружения. Общая стоимость выпущенных В-2 (без учета созданной для их испытаний и эксплуатации инфраструктуры) составляет 46,4 миллиардов долларов. При этом в настоящее время продолжаются работы по модернизации самолета, завершение которых намечено на 2014 год.

Самолет В-2 выполнен по схеме "летающее крыло" и не имеет вертикального оперения (рис.3.2). Функцию рулей направления выполняют расцепляющиеся щитки, установленные на концах крыла. Форма В-2 в плане образована 12 прямыми линиями, что позволяет сконцентрировать все отражения в горизонтальной плоскости в нескольких основных узких секторах. Используется "четырехлепестковая" схема: параллельные передние и задние кромки корпуса и кромки люков, створок ниш шасси и отсеков двигателей, а также обечаек воздухозаборников формируют Х-образно расположенные четыре основных сектора отражения (по два сектора в передней и задней полусферах). С боковых и фронтальных ракурсов самолет практически не имеет прямых линий и плоских поверхностей. Носок крыла имеет внутреннюю шиловидую радиопоглощающую конструкцию с сотовым заполнителем.

Планер самолета построен в основном из титановых и алюминиевых сплавов с широким использованием углепластиков [49]. Основным несущим компонентом конструкции служит однолонжеронный титановый кессон, расположенный в передней центральной части корпуса и в соседних промежуточных секциях, к которым крепятся углепластиковые консоли крыла, не имеющие сужения.

В соответствии с имеющимися данными о конструкции самолета B-2 для проведения расчетов вторичного излучения была построена модель его поверхности (рис. 3.3), параметры которой представлены в таблице ниже. Рассмотрена модель B-2 с предполагаемым распределением радиопоглощающего материала по ее поверхности. Отметим, что поскольку реальные значения параметров покрытия неизвестны, в качестве РПМ использован материал с неизменными относительными диэлектрической и магнитной проницаемостями:  $\varepsilon' = 1 + j5$ ,  $\mu' = 1 + j5$ . Эти значения соответствуют поглощающему покрытию зоммерфельдовского типа и

соответствуют некоторым типам реальных ферромагнитных покрытий [84, 85]. Передняя кромка крыла (обозначенная черным цветом на рис. 3.3) является передней границей области, представляющей в конструкции реального самолета набор длинных металлических трубок, заполненных радиопоглощающим материалом. При построении модели последнее учитывалось следующим образом. Тангенциальные составляющие поля  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в точках на поверхности крыла, выделенной черным цветом на рис. 3.3, приближенно принимались такими же, как на границе подстроенного в соответствующей точке крыла полупространства из материала заполнения трубок ( $\varepsilon' = 1 + j5$ ,  $\mu' = 1 + j5$ ). В модели с неидеально отражающей поверхностью толщина моделируемого покрытия была переменной и составляла: 3 мм для передней части фюзеляжа, 2,5 мм для задней части фюзеляжа, 2 мм для остальной поверхности модели. Кроме того, поверхность остекления кабины экипажа и верхняя кромка крыла за соплами двигателей в модели предполагались идеально проводящими.



52,4 м

464,5 кв.м

Количество прямых кромочных

участков в модели

22

Размах крыла

Площадь крыльев



Рис. 3.4. Круговые диаграммы мгновенной ЭПР при зондировании на частоте 10 ГГц (длина волны 3 см)



Рис. 3.5. Диаграммы средней и медианной ЭПР в трех диапазонах азимутальных углов при зондировании на горизонтальной поляризации и частоте 10 ГГц (длина волны 3 см)



Рис. 3.6. Диаграммы средней и медианной ЭПР в трех диапазонах азимутальных углов при зондировании на вертикальной поляризации и частоте 10 ГГц (длина волны 3 см)



Рис. 3.7. Диаграммы средней и медианной ЭПР в двадцатиградусных диапазонах азимута при зондировании на горизонтальной поляризации и частоте 10 ГГц (длина волны 3 см)



Рис. 3.8. Диаграммы средней и медианной ЭПР в двадцатиградусных диапазонах азимута при зондировании на вертикальной поляризации и частоте 10 ГГц (длина волны 3 см)



Рис. 3.9. Круговые диаграммы некогерентной ЭПР при зондировании на частоте 10 ГГц (длина волны 3 см)



Рис. 3.10. Круговые диаграммы мгновенной ЭПР при зондировании на частоте 3 ГГц (длина волны 10 см)



Рис. 3.11. Диаграммы средней и медианной ЭПР в трех диапазонах азимутальных углов при зондировании на горизонтальной поляризации и частоте 3 ГГц (длина волны 10 см)



Рис. 3.12. Диаграммы средней и медианной ЭПР в трех диапазонах азимутальных углов при зондировании на вертикальной поляризации и частоте 3 ГГц (длина волны 10 см)



Рис. 3.13. Диаграммы средней и медианной ЭПР в двадцатиградусных диапазонах азимута при зондировании на горизонтальной поляризации и частоте 3 ГГц (длина волны 10 см)



Рис. 3.14. Диаграммы средней и медианной ЭПР в двадцатиградусных диапазонах азимута при зондировании на вертикальной поляризации и частоте 3 ГГц (длина волны 10 см)



Рис. 3.15. Круговые диаграммы некогерентной ЭПР при зондировании на частоте 3 ГГц (длина волны 10 см)



Рис. 3.16. Круговые диаграммы мгновенной ЭПР при зондировании на частоте 1 ГГц (длина волны 30 см)



Рис. 3.17. Диаграммы средней и медианной ЭПР в трех диапазонах азимутальных углов при зондировании на горизонтальной поляризации и частоте 1 ГГц (длина волны 30 см)



Рис. 3.18. Диаграммы средней и медианной ЭПР в трех диапазонах азимутальных углов при зондировании на вертикальной поляризации и частоте 1 ГГц (длина волны 30 см)



Рис. 3.19. Диаграммы средней и медианной ЭПР в двадцатиградусных диапазонах азимута при зондировании на горизонтальной поляризации и частоте 1 ГГц (длина волны 30 см)



Рис. 3.20. Диаграммы средней и медианной ЭПР в двадцатиградусных диапазонах азимута при зондировании на вертикальной поляризации и частоте 1 ГГц (длина волны 30 см)



Рис. 3.21. Круговые диаграммы некогерентной ЭПР при зондировании на частоте 1 ГГц (длина волны 30 см)



Рис. 3.22. Круговые диаграммы мгновенной ЭПР при зондировании на частоте 166 МГц (длина волны 180 см)



Рис. 3.23. Диаграммы средней и медианной ЭПР в трех диапазонах азимутальных углов при зондировании на горизонтальной поляризации и частоте 166 МГц (длина волны 180 см)



Рис. 3.24. Диаграммы средней и медианной ЭПР в трех диапазонах азимутальных углов при зондировании на вертикальной поляризации и частоте 166 МГц (длина волны 180 см)



Рис. 3.25. Диаграммы средней и медианной ЭПР в двадцатиградусных диапазонах азимута при зондировании на горизонтальной поляризации и частоте 166 МГц (длина волны 180 см)



Рис. 3.26. Диаграммы средней и медианной ЭПР в двадцатиградусных диапазонах азимута при зондировании на вертикальной поляризации и частоте 166 МГц (длина волны 180 см)



Рис. 3.27. Круговые диаграммы некогерентной ЭПР при зондировании на частоте 166 МГц (длина волны 180 см)



Рис. 3.28. Распределение амплитудного множителя отраженного на частоте 10 ГГц сигнала в случае горизонтальной поляризации



Рис. 3.29. Распределение амплитудного множителя отраженного на частоте 3 ГГц сигнала в случае горизонтальной поляризации



Рис. 3.30. Распределение амплитудного множителя отраженного на частоте 1 ГГц сигнала в случае горизонтальной поляризации



Рис. 3.31. Распределение амплитудного множителя отраженного на частоте 166 МГц сигнала в случае горизонтальной поляризации

В таблице 3.1 приведены выражения и параметры распределений, наиболее согласующихся с эмпирическими распределениями корня квадратного из ЭПР для различных частот и поляризаций зондирующего сигнала.

Таблица 3.1. Параметры законов распределения амплитуд отраженного сигнала

Длина	Поляризация	Тип	Параметры
волны		распределения	распределения
3 см	горизонталь-	β - распределение:	
	ная	$\Gamma(\nu + \omega) = \Gamma(\nu + \omega)$	v = 2,4491
		$p(x) = \frac{1}{\Gamma(v)\Gamma(\omega)} x^{-1} (1-x)^{-1} ,$	$\omega = 14,612$
		где Г(v) – гамма-функция	
3 см	вертикальная	β - распределение	v = 2,39636
			ω=13,48536
10 см	горизонталь-	Распределение Вейбулла:	
	ная	$\left( \sum_{c=1}^{c-1} \left( x \right)^{c}$	b = 0,1854
		$p(x) = \frac{c}{b} \left(\frac{x}{b}\right)  e^{-\left(\frac{b}{b}\right)}$	<i>c</i> = 1,7822
10 см	вертикальная	β - распределение	v = 2,37642
			ω=10,81251
30 см	горизонталь-	Распределение Вейбулла	<i>b</i> = 0,36701
	ная		<i>c</i> = 2,344988
30 см	вертикальная	Распределение Вейбулла	<i>b</i> = 0,37423
			<i>c</i> = 2,306958
180см	горизонталь-	Г-распределение:	
	ная	$(x) (x)^{c-1} (-\frac{x}{b}) = 1$	<i>b</i> = 0,15556
		$p(x) = \left(\frac{b}{b}\right)  e^{(-b)} \frac{1}{b\Gamma(c)},$	<i>c</i> = 4,63433
		где Г $(c)$ – гамма-функция	
180см	вертикальная	Г-распределение	<i>b</i> = 0,148842
			<i>c</i> = 4,987962