

文章编号: 2095-4980(2022)03-0218-10

## 钝角二面角全极化双基地 RCS 统计建模

朱义奇<sup>1</sup>, 赵艳丽<sup>2</sup>, 艾小锋<sup>1</sup>, 徐志明<sup>1</sup>, 赵 锋<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;  
2. 中国人民解放军 63891 部队, 河南 洛阳 471003)

**摘 要:** 钝角二面角结构在目标的隐身特性中发挥着重要作用, 但其双基地特性尚不明确。采用电磁仿真与统计建模相结合的方法, 从频域、空域、极化域和统计分布角度对其双基地散射特性进行分析。研究表明, 在电尺寸较小时, 双基地散射增强特性并不明显, 单/双基地 RCS 概率密度分布差异大, 共极化的双基地 RCS 概率密度分布呈现双峰特性, 为此提出了双对数正态分布模型, 取得了理想拟合效果; 在电尺寸较大时, 共极化的双基地前向散射特性增强明显, 单/双基地 RCS 概率密度分布相似, 符合对数正态分布和卡方分布。所揭示规律对钝角二面角结构的利用具有参考意义。

**关键词:** 双基地 RCS; 二面角; 统计建模; 双对数正态分布

**中图分类号:** TN974

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2022002

## Full polarization bistatic RCS statistical modeling of obtuse dihedral structures

ZHU Yiqi<sup>1</sup>, ZHAO Yanli<sup>2</sup>, AI Xiaofeng<sup>1</sup>, XU Zhiming<sup>1</sup>, ZHAO Feng<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China; 2.Unit 63891 of PLA, Luoyang Henan 471003, China)

**Abstract:** The obtuse dihedral structure plays an important role in the stealth characteristics of the target, but its bistatic characteristics are still unclear. The method of combining electromagnetic simulation and statistical modeling is utilized to analyze its bistatic scattering characteristics from the perspective of frequency domain, space domain, polarization domain and statistical distribution. Studies have shown that when the electrical size is small, the bistatic scattering enhancement characteristics are not obvious, and the probability density distributions of monostatic/bistatic Radar Cross Section(RCS) are very different; the bistatic RCS probability density distribution of co-polarization exhibits bimodal characteristics. For this reason, the Bimodal Lognormal Distribution Model(BLDM) is proposed. This distribution model has achieved an ideal fitting effect. When the electrical size is large, the co-polarized bistatic forward scattering characteristics are significantly enhanced, and the monostatic/bistatic RCS probability density distributions are similar, which conforms to the lognormal distribution and the chi-square distribution. The law revealed has reference significance for the utilization and detection of obtuse dihedral structures.

**Keywords:** bistatic Radar Cross Section(RCS); dihedral corner; statistical model; Bimodal Lognormal Distribution Model(BLDM)

双基地雷达具有反隐身和抗干扰等多种优势, 所观测的雷达散射截面(RCS)也称为双基地 RCS。前向散射特性指当双基地角超过 150°时, 目标的双基地 RCS 将急剧增加, 目标的双基地 RCS 比单基地 RCS 大 20~40 dB, 对于探测隐身目标具有明显优势。对于静态目标, 固定双基地雷达的入射方向, 从不同的散射角观测, 得到目标的双基地 RCS 起伏剧烈, 建立合适的分布模型对于研究目标的散射特性具有重要的实际意义。

针对目标单基地 RCS, 已发展出 Swerling 模型、卡方分布、对数正态分布和 K 分布等统计模型, 这些模型基本能涵盖所有的单基地 RCS 起伏规律<sup>[1]</sup>。而针对目标双基地 RCS, 目前尚未形成一套完整的统计分布体系, 大多数双基地体制下的统计分析主要体现在杂波的幅度分布方面。胡程教授团队在大量测量前向散射雷达(Forward

Scatter Radar, FSR)地表植被的杂波数据后指出,在风速较低时,杂波幅度服从K分布;风速较高时,杂波幅度服从对数正态分布<sup>[2-3]</sup>。Hugh D Griffiths通过测量低海状态和高海状态下的海杂波数据指出,用于拟合单基地海杂波的幅度统计模型也可用于拟合双基地海杂波,在大多数情况下,卡方分布拟合实现了最佳拟合<sup>[4-5]</sup>。文献[6]通过分析空载双基地雷达杂波的幅度统计特性和功率谱,探讨了对地杂波的仿真和抑制方法。文献[7]仿真了目标全空域下的单基地RCS统计数据,提出高斯混合密度模型,得到了比经典统计模型更高的拟合精确度。双基地体制下,RCS统计建模的研究较少。文献[8]实测了双基地无源雷达的RCS统计数据,将RCS建模为非平稳随机过程,同时得到了较Swerling模型更为平滑的统计结果。文献[9]对比分析了全极化条件下飞机目标的单基地与双基地RCS统计分布,表明双基地体制下4种极化的RCS统计特性相近,而单基地体制下共极化和交叉极化存在较大差异。

二面角结构是组成复杂目标的常见结构,其在目标的隐身特性中发挥着重要作用。特别是钝角二面角,二次散射和多次散射后的回波方向偏离电磁波入射方向,后向散射强度减弱,单基地RCS减小,常用于隐身结构的设计中。如F-117A战斗机采用多面体结构,整体呈楔状,由多个平面构成大多数表面与垂直面的夹角大于30°,能有效地把雷达波散射出去<sup>[10]</sup>,这种几何隐身方法实际应用了变形二面角实现RCS缩减。文献[11]分析了二面角改进对坦克散射特性的影响,在重点角域实现了RCS缩减。冯德军等人发明了一种基于Salisbury屏的新型二面角结构,改变了普通二面角的散射特性,实现了单基地RCS缩减<sup>[12]</sup>。文献[13]通过研究直角、钝角和锐角二面角在双基地观测下的散射特性,给出了三种二面角的散射机理,同时指出利用双基地雷达的前向散射特性,能够实现变形二面角的有效探测,但未研究二面角结构双基地RCS统计分布特性。

本文针对钝角二面角,通过电磁仿真与统计建模相结合的方式,研究其随电尺寸变化的空域分布和统计分布,采用多种统计模型进行拟合,针对电尺寸较小时的双基地RCS提出了双对数正态分布模型,电尺寸较大时的双基地RCS采用对数正态分布和卡方分布进行拟合,达到了比较理想的拟合效果。

## 1 常见RCS统计模型

针对目标的单基地RCS,经典统计模型有瑞利分布、莱斯分布、Swerling模型、卡方分布、对数正态分布和K分布等。瑞利分布通常用来描述许多小散射体的雷达回波幅度;Swerling模型和莱斯分布可以描述一个主散射体和许多小散射体组合的情形;卡方分布是Swerling模型更普遍的形式,有着更高的自由度;对数正态分布和K分布对RCS概率密度分布拖尾较长的目标有着很好的表述。下面简要介绍对数正态分布、卡方分布和K分布模型。

### 1.1 对数正态分布

对数正态分布的概率密度函数为<sup>[14-15]</sup>:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma r} \exp\left[-\frac{(\ln r - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

式中: $r$ 为RCS值; $\mu$ 为 $\ln r$ 的均值; $\sigma$ 为 $\ln r$ 的标准差。使用该模型进行估计的RCS概率密度有较长的拖尾。在单基地雷达探测中,通常用于估计电大尺寸下,多个不规则散射体组合的目标。该模型的优点在于其只与统计参数有关,参数估计过程简单。

### 1.2 卡方分布

卡方分布的概率密度函数为<sup>[16]</sup>:

$$f(r) = \frac{k}{\Gamma(k)\bar{r}} \left(\frac{kr}{\bar{r}}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{kr}{\bar{r}}\right) \quad (2)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 是伽马函数; $\bar{r}$ 为RCS的均值; $k$ 为卡方分布的双自由度,反映了RCS的起伏情况, $k$ 值越小,RCS起伏越剧烈。同时由于 $k$ 可以不为正整数,因而能够达到较高的精确度。当 $k$ 取值分别为 $1, N, 2N, \infty$ 时,分别对应经典的Swerling I, II, III, V分布模型。

### 1.3 K分布

K分布的概率密度函数为<sup>[6]</sup>:

$$f(r) = \frac{2}{a\Gamma(v)} \left(\frac{r}{2a}\right)^v K_{v-1}\left(\frac{r}{a}\right) \quad (r > 0, v > 0) \quad (3)$$

式中： $\nu$ 为形状参数； $a$ 为尺度参数； $K_\nu(\cdot)$ 是第二类修正  $\nu$ 阶 Bessel 函数。K 分布适用的条件范围很宽，在不同雷达分辨力和雷达视角下都能很好地适应。

### 2 钝角二面角结构建模与电磁仿真

测定目标 RCS 通常有电磁仿真和实际测量两种方法。对于大型目标进行 RCS 测定时，往往要受到多种场地因素的影响，有较高的测量难度。同时，双基地雷达收发分置的特点使其对雷达目标进行电磁计算的参数维度进一步提高，自变量复杂度进一步增加，利用计算机仿真更加经济、方便和灵活，具有明显的优势<sup>[17]</sup>。

表1 二面角的尺寸参数

Table1 Parameters of the dihedral corner

parameter	length/m	width/m	depth/m	angle
dihedral corner	0.075	0.075	0.007 5	120°

表2 电磁仿真参数范围

Table2 Range of electromagnetic simulation parameters

parameter	$f/\text{GHz}$	frequency interval/GHz	elevation of incidence	azimuth of incidence	elevation of scattering	azimuth of scattering	angular interval	polarization mode
dihedral corner	0.25~10	0.25	-90°~90°	90°	0°~180°	0°~360°	1°	full polarization

论文采用成熟商用电磁仿真软件 FEKO 计算双基地 RCS，通过几何建模、参数设置、网格剖分、选择算法和运算求解 5 个步骤进行<sup>[18]</sup>。二面角尺寸参数及电磁仿真参数设置见表 1 和表 2。电磁计算方法采用矩量法(Method of Moments, MoM)，MoM 是 FEKO 中的核心算法，通过精细的网格划分实现对电大尺寸目标的仿真精确度要求<sup>[19]</sup>。电磁仿真示意图 1，红色曲线表示入射角的变化范围，蓝色区域表示散射角度范围，目标结构上的白色曲线是剖分细化后的网格。坐标原点位于二面角的中心， $xoy$  平面垂直于二面角， $y$  轴位于二面角的角平分线上，方位角定义为在  $xoy$  平面内顺时针转到  $x$  轴的角度，俯仰角定义为与  $z$  轴的夹角。

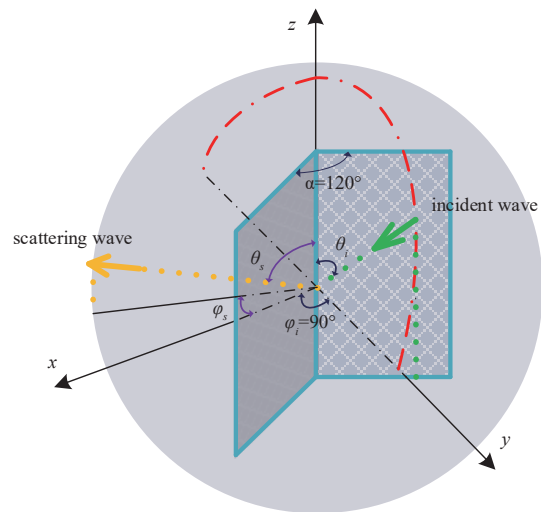


Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic simulation of dihedral corner  
图1 二面角电磁仿真示意图

### 3 电磁计算数据统计建模与分析

#### 3.1 空域特性分析

主要从空域角度出发，分析二面角双基地 RCS 的空域特性在不同的入射角度下随频率的变化关系，包括极值、极值分布及前向散射区的主瓣宽度等特性。前向散射区的主瓣宽度是指，在电磁波照射下，目标的前向散射区所产生的辐射场类似于一个天线，该“天线”的主瓣宽度定义为前向散射区的主瓣宽度，同时其前向波瓣图可表示雷达散射截面，示意图 2。

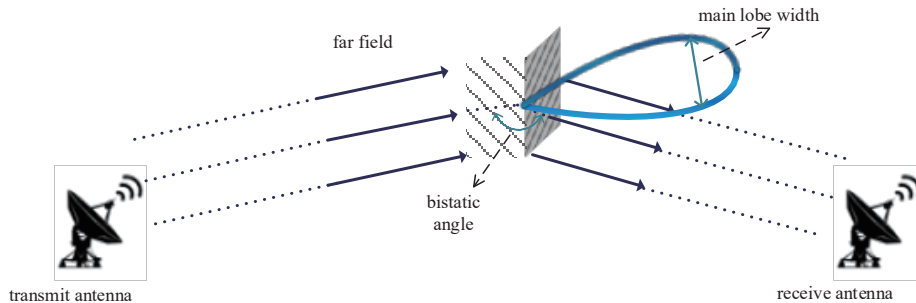


Fig.2 Schematic diagram of the forward scatter radar cross-section lobe  
图2 前向散射雷达截面波瓣示意图

设置极化方式为入射水平极化和接收水平极化(HH 极化)，入射视角为水平照射(俯仰角 90°，方位角 90°)和斜照射(俯仰角 60°，方位角 90°)，在不同的电尺寸下，二面角双基地 RCS 的空域分布结果见图 3。

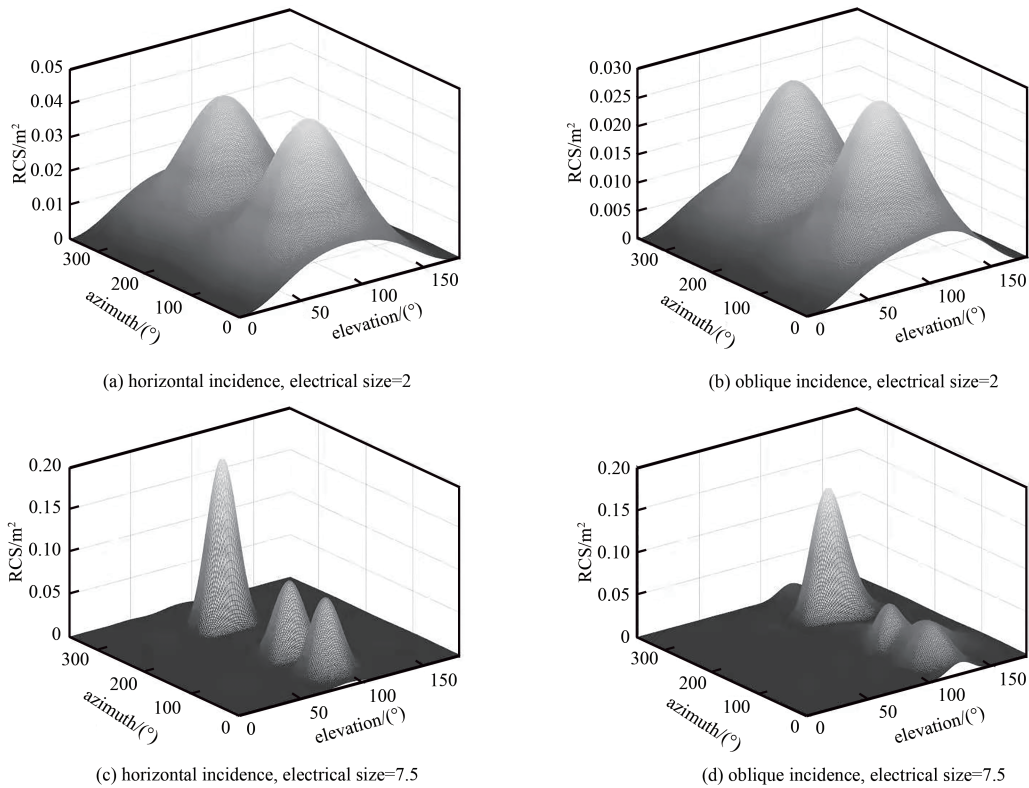


Fig.3 Airspace distribution of dihedral bistatic RCS

图3 二面角双基地 RCS 的空域分布

当电磁波水平照射时，二面角双基地 RCS 的极大值及其分布和前向散射主瓣宽度见表 3。结果显示，在电尺寸较大时，双基地角位于  $150^\circ \sim 180^\circ$  时，目标的双基地 RCS 迅速增大，随着频率增大，前向散射区的主瓣宽度减小，即满足前向散射特性的双基地角的范围逐渐减小，能量分布越来越集中；在电尺寸较小，即波长远大于目标尺寸时，双基地前向散射特性并未增强，后向 RCS 大于前向 RCS，此时的双基地 RCS 极大值远小于高频区的双基地 RCS 极大值，不利于目标的探测。电尺寸较大时，后向 RCS 随着频率增大逐渐减小，能量分布逐渐分散；当雷达视角为斜入射时，后向 RCS 进一步减小，其能量主要分布在非后向散射区。

表3 二面角双基地 RCS 的空域特性  
Table3 Airspace characteristics of dihedral bistatic RCS

electrical size	maximum/dBsm	elevation/(°)	azimuth/(°)	main lobe width of forward scatter/(°)
0.5	-33.174 8	90	90	85
1.0	-18.687 5	90	90	83
2.0	-13.572 0	90	90	75
2.5	-13.434 4	90	90	71
3.0	-12.781 0	90	270	63
5.0	-9.872 5	90	270	39
7.5	-6.324 2	90	270	25
10.0	-3.895 3	90	270	19

3.2 统计分布拟合分析

分析二面角双基地 RCS 统计参数及概率密度分布随电尺寸和视角的变化规律，同时与单基地 RCS 进行对比分析。其中，双基地 RCS 概率密度是在固定入射视角情况下，遍历所有散射角的双基地 RCS 得到的概率密度分布；单基地 RCS 的概率密度是遍历所有入射角的单基地 RCS 得到的概率密度分布。

表 4 给出了单/双基地 RCS 统计参数的对比结果。其中，双基地入射为水平照射，单/双基地雷达的极化方式为 HH，统计参数包括极大值、极小值、极差、均值和标准差。对比单/双基地 RCS 的统计参数可以发现，两者随电尺寸的变化规律基本一致，但存在差异：相同电尺寸下，双基地 RCS 的极差明显大于单基地 RCS 的极差，动态范围更大，对接收机的动态范围要求更高；电尺寸较大时，双基地 RCS 的极大值和均值更大，若其工作在前向散射区，更利于目标探测。

表4 单/双基地 RCS 的统计参数  
Table4 Statistical parameters of mono/bistatic RCS

system	electrical size	maximum/dBsm	minimum/dBsm	extreme difference/dB	mean/dBsm	standard deviation/dB
monostatic	2.0	-12.742 7	-74.705 3	61.962 6	-22.305 9	-20.771 0
bistatic	2.0	-13.572 0	-77.460 6	63.888 5	-18.952 0	-19.663 1
monostatic	7.5	-8.495 8	-85.462 2	76.966 4	-24.569 8	-19.621 6
bistatic	7.5	-6.324 2	-115.350 8	109.026 5	-21.547 5	-16.802 0

全极化条件下的双基地 RCS 统计参数随电尺寸的变化关系见图 4。结果显示,极大值、均值和标准差随电尺寸增大而增大,三者具有相似的变化规律;而极小值随电尺寸振荡变化,参考意义不大。对比不同极化下的结果发现,两种共极化(HH 极化与 VV 极化)的结果随电尺寸变化规律基本一致,在同一电尺寸下,两者的统计参数几乎相同。两种交叉极化(VH 极化与 HV 极化)的结果在电尺寸较小时差异较大,而在电尺寸较大时相似;电尺寸较小时, HV 极化的极大值明显大于 VH 极化的极大值,其与共极化下的统计参数相近,随着电尺寸增大, HV 极化的统计参数减小并逐渐接近 VH 极化的统计参数。同时,共极化的极大值明显大于交叉极化的极大值和均值更利于目标检测。

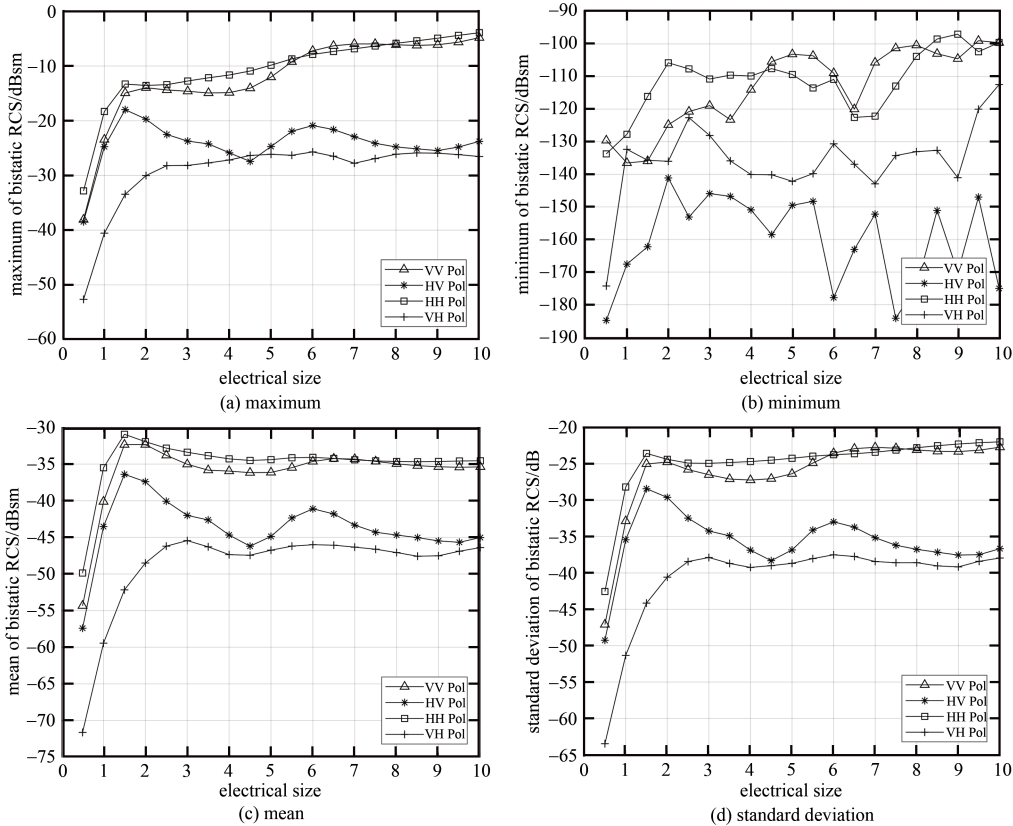


Fig.4 Variation of bistatic RCS statistical parameters with electrical sizes under four polarizations

图 4 四种极化下,双基地 RCS 统计参数随电尺寸变化关系

下面统计全极化条件下的双基地 RCS 概率密度分布,并使用对数正态分布、卡方分布和 K 分布进行拟合。电尺寸为 2 和 7.5 时结果分别见图 5 和图 6。

结果显示,在相同的电尺寸下,共极化(VV 极化与 HH 极化)具有相同的分布规律,交叉极化(HV 极化与 VH 极化)具有相同的分布规律。为了判定 3 种模型的拟合优度,计算均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE),即:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2} \quad (4)$$

式中:  $n$  为数据点的个数;  $y'_i$  为第  $i$  个数据点的拟合值;  $y_i$  为第  $i$  个数据点的数值。由于得到的 RMSE 在  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  量级,最终结果由  $n \times RMSE$  表示,以提高数据精确度和直观性。在不同的电尺寸下,HH 极化和 VH 极化下的拟合 RMSE 见图 7。

对于共极化,在电尺寸较小(电尺寸 0.5~3)时,概率密度分布呈现双峰特性;在电尺寸较大(电尺寸 > 3)时,分布集中在极小值附近。在宽范围的电尺寸下,对数正态分布和卡方分布得到了较好的拟合效果,除个别电尺寸外, RMSE 在 0.5 以下,而 K 分布拟合随电尺寸变化并不稳定,在电尺寸为 5~7 时, RMSE 超过了 1.5。

对于交叉极化,概率密度分布在不同电尺寸下的分布规律相似,相较于共极化,分布相对分散。3 种模型均得到了较好的拟合效果, RMSE 小于 1,而对数正态分布在电尺寸较小时的拟合效果最好。同时,对数正态分布模型相较于其他 2 种模型更为简洁,参数估计过程简单,所以应首选对数正态分布模型对不同极化下、不同电尺寸下的二面角 RCS 进行统计分析。

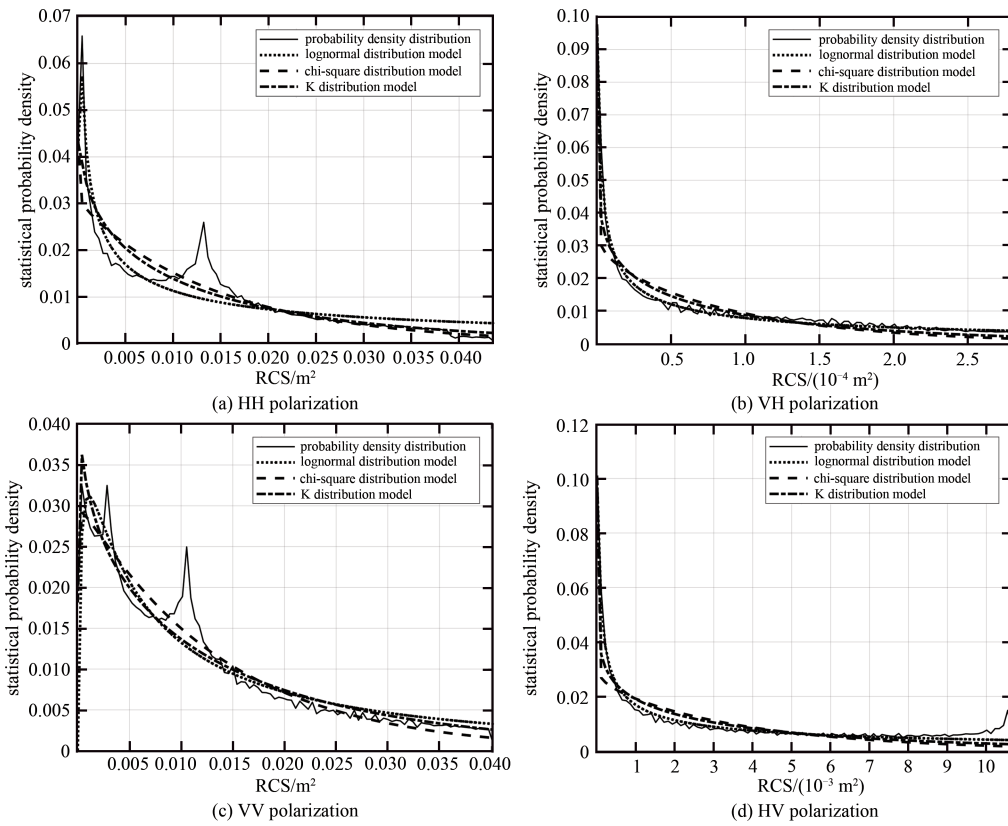


Fig.5 Probability density distribution and fitting results of bistatic RCS with the electrical size of 2  
图 5 电尺寸为 2 时, 双基地 RCS 概率密度分布及拟合结果

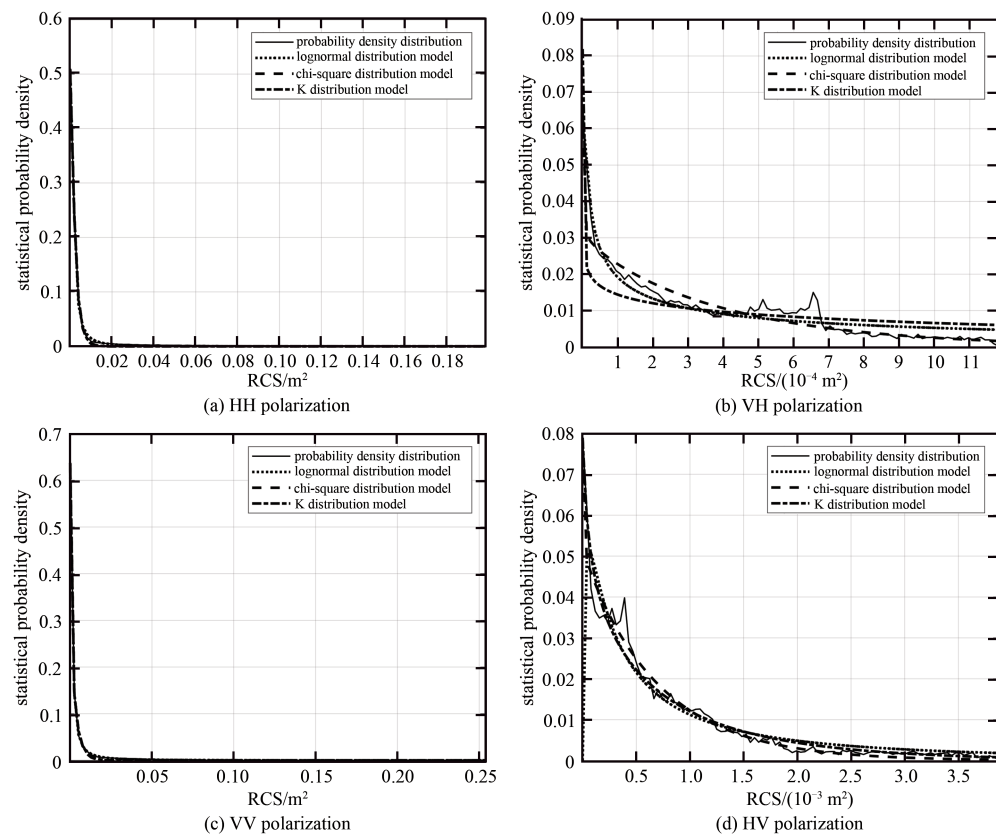


Fig.6 Probability density distribution and fitting results of bistatic RCS with the electrical size of 7.5  
图 6 电尺寸为 7.5 时, 双基地 RCS 概率密度分布及拟合结果

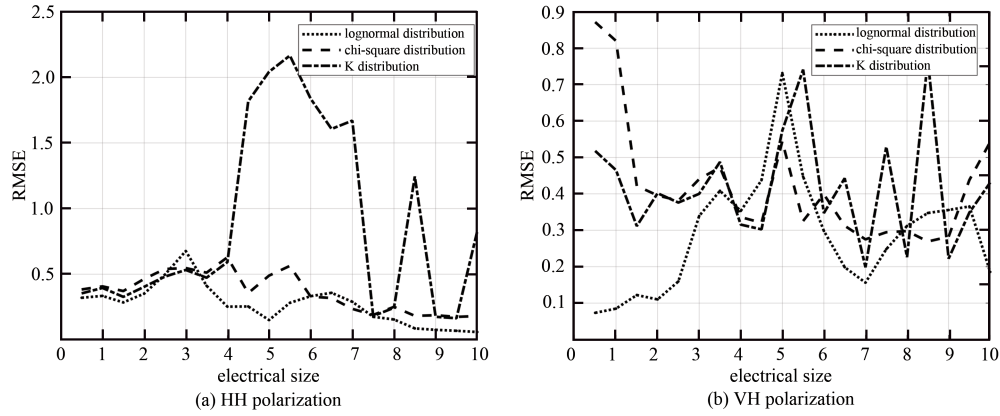


Fig.7 RMSE of three distribution models  
图7 三种分布模型的RMSE

值得注意的是，在电尺寸较小时，共极化下，3种模型的RMSE虽然小于0.5，但未能表征概率密度分布的双峰特性。同时，这样的双峰特性在不同的入射视角下同样具备，即随视角变化不敏感，见图8。且这样的特性在单基地RCS中是不具备的，而电尺寸较大时，单/双基地RCS概率密度分布相似，见图9。

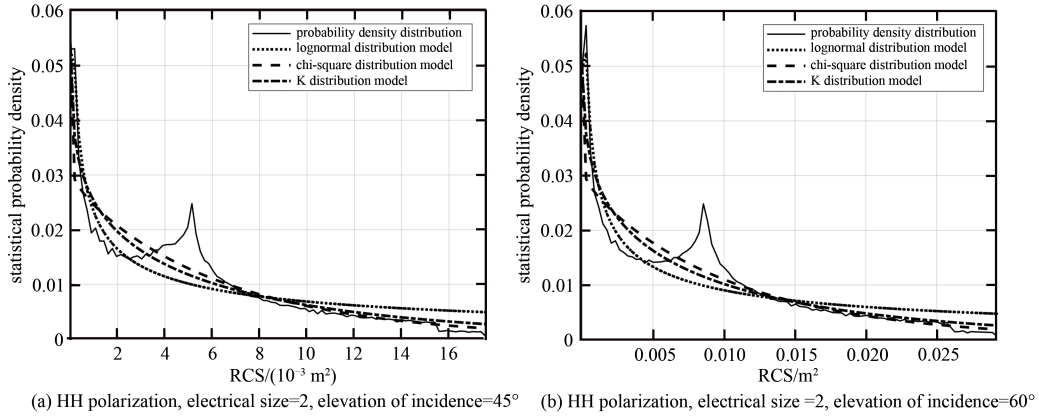


Fig.8 Probability density distribution and fitting results of bistatic RCS at different incident angles

图8 不同入射角时,双基地RCS概率密度分布及拟合结果

### 3.3 统计分布拟合改进

针对双基地RCS在电尺寸较小时概率密度分布的双峰特性，以及传统分布模型难以拟合的问题，提出双对数正态分布模型(Bimodal Lognormal Distribution Model, BLDM)。其概率密度函数表达式为：

$$f(r) = \frac{A_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1 r} \exp\left[-\frac{(\ln r - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] + \frac{A_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2 r} \exp\left[-\frac{(\ln r - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right] \quad (5)$$

式中： $r$ 为RCS值； $A_1$ 和 $A_2$ 分别为2个对数正态分布的幅度； $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 分别为2个对数正态分布的标准差； $\mu_1$ 和 $\mu_2$ 分别为2个对数正态分布的均值。与对数正态分布类似，改变参数 $\mu$ 和 $\sigma$ ，可以改变峰在坐标轴上的位置；改变参数 $\sigma$ 和 $A$ ，可以改变峰的高度。调整6个参数，可以完成大多数具有双峰特点数据的拟合。

设置雷达视角为水平照射，使用该模型的拟合结果见图10，并与对数正态分布模型进行对比。设置极化为HH极化，表5给出了不同入射视角下2种分布模型的RMSE。结果显示，双对数正态分布很好地表征了共极化双基地RCS概率密度分布在电尺寸较小时的双峰特性，拟合优度相较于对数正态分布有了进一步提升，在入射俯仰角分别为 $90^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $45^\circ$ 时，RMSE分别平均下降了0.239 2、0.233 1和0.233 7。证明了在电尺寸较小时，该模型针对钝角二面角的双基地RCS概率密度分布有着更好的适用性。

与多项式逼近的思想相似，将双对数正态分布模型推广至多对数正态分布模型<sup>[20]</sup>，其概率密度函数为：

$$f(r) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_i r} \exp\left[-\frac{(\ln r - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (6)$$

式中： $n$ 为多对数正态分布的阶数； $A_i$ 、 $\mu_i$ 和 $\sigma_i$ 分别为第 $i$ 个对数正态分布的幅度、均值和标准差。当阶数 $n$ 不断增大时，理论上能够不断提高对复杂分布的逼近精确度。

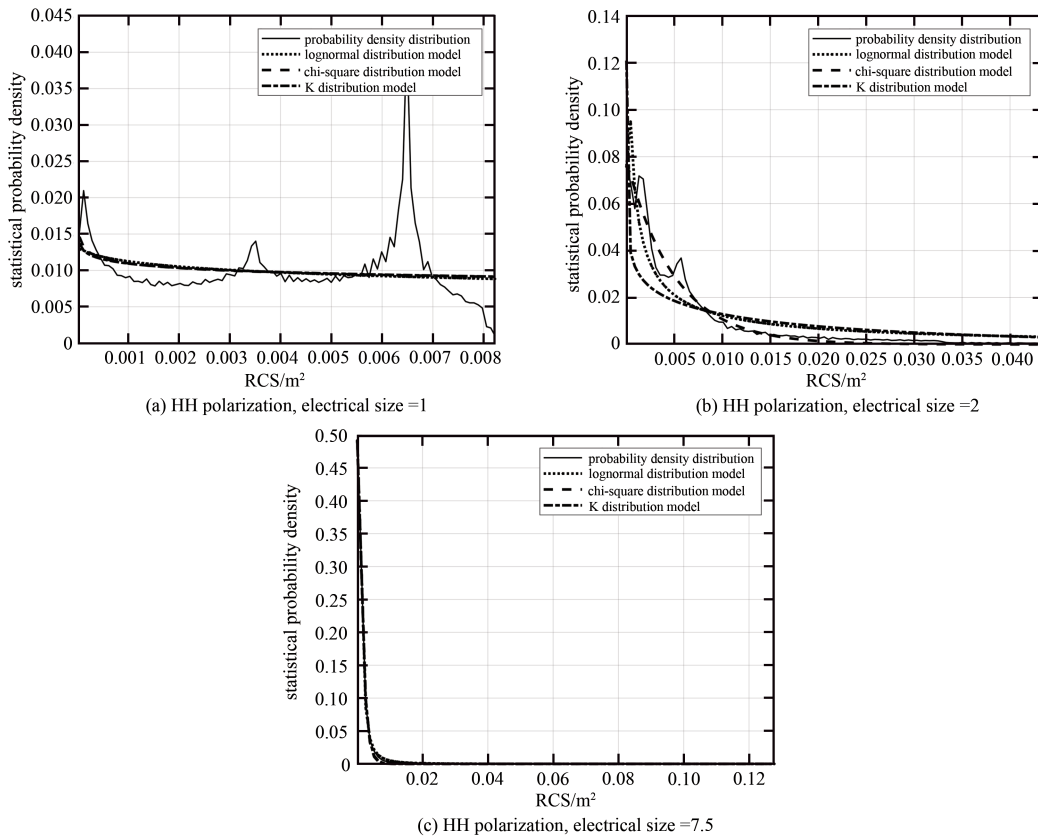


Fig.9 Probability density distribution and fitting results of monostatic RCS under different electrical sizes  
图 9 不同电尺寸下,单基地 RCS 概率密度分布及拟合结果

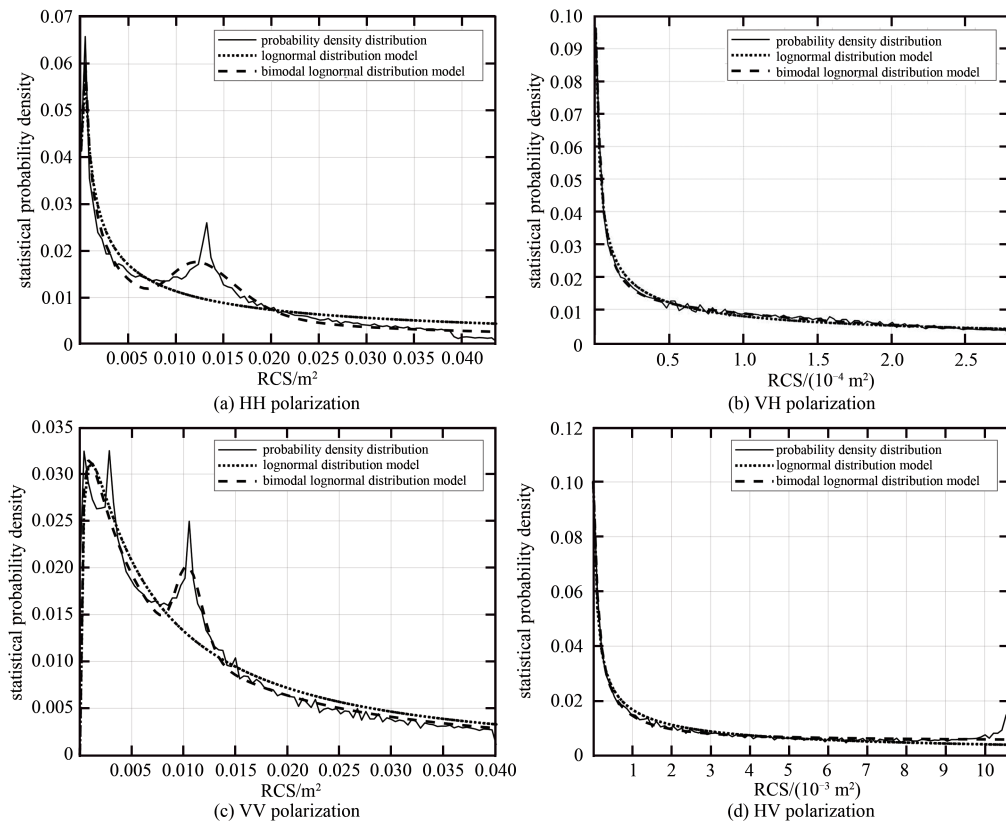


Fig.10 Fitting results of bimodal lognormal distribution with the electrical size of 2  
图 10 电尺寸为 2 时,双对数正态分布拟合结果



表 5 两种分布模型的 RMSE  
Table 5 RMSE of two distribution models

electrical size	lognormal distribution			bimodal lognormal distribution		
	elevation of incidence=90°	elevation of incidence=60°	elevation of incidence=45°	elevation of incidence=90°	elevation of incidence=60°	elevation of incidence=45°
0.5	0.320 8	0.304 9	0.293 7	0.165 8	0.152 1	0.152 0
1.0	0.335 1	0.331 9	0.339 2	0.164 1	0.154 8	0.158 8
1.5	0.285 4	0.294 8	0.308 5	0.134 8	0.142 4	0.152 1
2.0	0.352 1	0.348 8	0.360 2	0.171 3	0.144 3	0.134 8
2.5	0.497 4	0.734 9	0.692 0	0.231 1	0.212 5	0.207 2
3.0	0.676 8	0.376 8	0.372 3	0.165 2	0.18766	0.159 0

使用该模型对概率密度分布再次进行拟合分析, 当电尺寸为 2 时, HH 极化下的拟合结果见表 6 和图 11。

结果显示, 当阶数大于 2 时, 多对数正态分布模型同样表征了概率密度分布的双峰特性, 同时 RMSE 有了一定的下降; 当阶数大于 4 时, RMSE 不再变化, 拟合精确度无法进一步提高。同时, 阶数的增加带来了拟合复杂度不断增大的问题。双对数正态分布在表征双峰特性的前提下, 能够在拟合精确度和拟合复杂度之间取得较好的折衷。

#### 4 结论

通过电磁计算数据分析了不同电尺寸下钝角二面角的双基地 RCS 空域分布特性和统计分布特性, 研究表明钝角二面角双基地 RCS 的极差远大于单基地 RCS 的极差, 电尺寸较小时的双基地 RCS 极大值并不比单基地 RCS 极大值大, 电尺寸较大时的双基地 RCS 增强区域随着频率增加而减小。电尺寸较大时, 4 种极化双基地 RCS 统计分布通过现有的概率密度函数可以很好地拟合, 但电尺寸较小时, 由于双峰特性的存在, 其余统计模型失效, 采用新提出的双对数统计模型可以得到很好的拟合效果。后续进一步通过实测数据验证低频阶段的统计特性。

#### 参考文献:

- [1] 黄坦,徐振海,戴崇,等. 隐身目标雷达散射截面最优分布模型选择[J]. 电波科学学报, 2014,29(5):899-904. (HUANG Tan,XU Zhenhai,DAI Chong,et al. Optimal distribution model selection of stealth target RCS[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(5):899-904.)
- [2] 胡程,刘长江,曾涛,等. 双基地前向散射雷达杂波分析与模拟方法[J]. 信号处理, 2013,29(3):293-303. (HU Cheng,LIU Changjiang,ZENG Tao,et al. Statistical analysis and simulation method of forward scattering clutter in bistatic radar[J]. Journal of Signal Processing, 2013,29(3):293-303.)
- [3] HU C, LONG T, ZENG T. Statistic characteristic analysis of forward scattering surface clutter in bistatic radar[J]. Science China Information Sciences, 2010,53(12):2675-2686.
- [4] AL-ASHWAL W A, KHENCHAF A, GRIFFITHS H D, et al. Comparison between measurement and simulation of monostatic and bistatic sea clutter[C]// 2014 International Radar Conference. [S.l.]:IEEE, 2014:1-6.
- [5] AL-ASHWAL W A, WOODBRIDGE K, GRIFFITHS H D. Analysis of bistatic sea clutter-part II: amplitude statistics[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014,50(2):1293-1303.
- [6] 段锐. 机载双基地雷达杂波仿真与抑制技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009. (DUAN Rui. The study on airborne bistatic radar clutter simulation and cancellation techniques[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.)

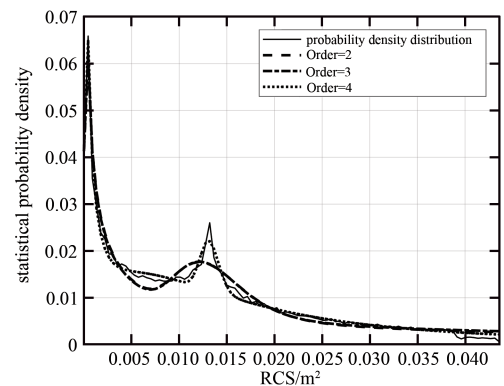


Fig.11 Fitting results of multimodal lognormal distribution  
图 11 多对数正态分布拟合结果

表 6 多对数正态分布拟合在各阶数下的 RMSE

Table 6 RMSE of multimodal lognormal distribution model at various orders

order	number of parameters	RMSE
1	3	0.352 1
2	6	0.171 3
3	9	0.167 3
4	12	0.130 8
5	15	0.130 8
6	18	0.130 8

- [7] WANG L,XIE G,QIAN F,et al. A novel model for analyzing the statistical properties of targets RCS[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2021:1-5.
- [8] MELLER M,WIELGO M,MALANOWSKI M,et al. A new method and a case study in statistical modeling of bistatic radar cross section[C]// 2020 IEEE Radar Conference(RadarConf20). [S.l.]:IEEE, 2020:1-6.
- [9] 艾小锋,曾勇虎,高磊,等. 飞机目标全极化双基地散射特性研究[J]. 雷达学报, 2016,5(6):639-646. (AI Xiaofeng,ZENG Yonghu,GAO Lei,et al. Research on full-polarization bistatic Scattering characteristics of aircraft[J]. Journal of Radars, 2016,5(6):639-646.)
- [10] 顾月清,陶宝祺. 隐身技术在飞机上的应用[J]. 物理, 1996(11):679-684. (GU Yueqing,TAO Baoqi. Application of stealth technology in aircraft[J]. Physics, 1996(11):679-684.)
- [11] 刘战合,罗明强,郭乐,等. 外形隐身改进对坦克目标电磁散射特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2021,21(5):1865-1870. (LIU Zhanhe,LUO Mingqiang,GUO Le,et al. Influence of shape stealth improvement on electromagnetic scattering characteristics of tanks[J]. Science Technology and Engineering, 2021,21(5):1865-1870.)
- [12] 张然,冯德军,徐乐涛. 基于 Salisbury 屏的二面角设计及其极化特性分析[J]. 雷达学报, 2016,5(6):658-665. (ZHANG Ran,FENG Dejun,XU Letao. Design and polarization characteristics analysis of dihedral based on Salisbury screen[J]. Journal of Radars, 2016,5(6):658-665.)
- [13] 胡程,敖东阳,曾涛,等. 二面角的双基地散射特性分析[J]. 数据采集与处理, 2016,31(4):60-62. (HU Cheng,AO Dongyang,ZENG Tao,et al. Bistatic scattering characteristic analysis of dihedral corner reflector[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016,31(4):60-62.)
- [14] HEIDBREDER G R,MITCHELL R L. Detection probabilities for log-normally distributed signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010,3(1):5-13.
- [15] 史伟强,徐乐,史小卫,等. 基于完备对数正态分布模型的隐形飞行器动态 RCS 统计特性研究[J]. 电子与信息学报, 2013,35(9):2121-2125. (SHI Weiqiang,XU Le,SHI Xiaowei,et al. Dynamic RCS statistic characterization of stealth aircraft using complete lognormal distribution[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013,35(9):2121-2125.)
- [16] SWERLING P. Radar probability of detection for some additional fluctuating target cases[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997,33(2):698-709.
- [17] 艾小锋,赵锋,刘晓斌,等. 双/多基地雷达目标探测与识别[M]. 北京:电子工业出版社, 2020. (AI Xiaofeng,ZHAO Feng,LIU Xiaobin,et al. Bi/multistatic radar target detection and recognition[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2020.)
- [18] 蒋彦雯,邓彬,王宏强,等. 基于 FEKO 和 CST 的太赫兹目标 RCS 仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(5):684-689. (JIANG Yanwen,DENG Bin,WANG Hongqiang,et al. RCS simulation in THz band based on FEKO and CST[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(5):684-689.)
- [19] 刘源,焦金龙,王晨,等. FEKO 仿真原理与工程应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2017. (LIU Yuan,JIAO Jinlong,WANG Chen,et al. FEKO simulation principle and engineering application[M]. Beijing:China Machine Press, 2017.)
- [20] 张晨新,林存坤,周成,等. 通用的雷达目标 RCS 统计建模方法[J]. 现代防御技术, 2017,45(5):114-119. (ZHANG Chenxin,LIN Cunkun,ZHOU Cheng,et al. General approach for statistical modeling of radar target RCS[J]. Modern Defence Technology, 2017,45(5):114-119.)

#### 作者简介:

朱义奇(1999-),男,河南省洛阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为双基地雷达特征提取 .email: zhuyiqi1213@163.com.

艾小锋(1983-),男,四川省安岳县人,副研究员,博士,主要研究方向为双基地雷达成像、特征提取.

赵锋(1978-),男,南京市人,副教授,博士,主要研究方向为电子信息系统仿真建模评估.

赵艳丽(1977-),女,河南省南阳市人,博士,主要研究方向为导弹攻防对抗和雷达电子战建模与仿真.

徐志明(1995-),男,山东省潍坊市人,在读博士研究生,主要研究方向为双基地雷达目标特性与特征提取.