

文章编号: 1671-0576(2021)01-0042-07

# 飞行器太赫兹散射特性仿真及抑制方法研究

刘 健, 张玉涛, 高 伟, 岳 慧

(电磁散射重点实验室, 上海 200438)

**摘 要:** 采用弹跳射线法对典型飞行器的太赫兹后向雷达散射截面分布特性开展仿真分析, 基于仿真结果, 综合应用增大表面粗糙度和涂覆吸波材料两种措施, 抑制太赫兹散射并分析抑制效果。研究表明: 飞行器前向和后向的散射特性较强, 正后向的雷达散射截面峰值可达 60 dBsm; 采用抑制措施后, 在飞行器正后向 $\pm 10^\circ$ 范围内, 发射接收采用同向垂直(HH)极化方式下雷达散射截面平均降幅达 19.62 dBsm, 采用同向水平(VV)极化方式下雷达散射截面平均降幅达 19.35 dBsm。

**关键词:** 太赫兹雷达散射截面; 弹跳射线法; 粗糙表面; 镍包覆云母吸波材料

**中图分类号:** V221.8; TJ765

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1671-0576.2021.01.008

## Investigation on Numerical Simulation and Suppression of the Terahertz Scattering Characteristics of Aircraft

LIU Jian, ZHANG Yu-tao, GAO Wei, YUE Hui

(Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory,  
Shanghai 200438, China)

**Abstract:** The terahertz backward radar cross section distribution of a specific aircraft is simulated by shooting and bouncing rays algorithm. Based on the simulation results, the terahertz scattering is suppressed by means of increasing the surface roughness and coating the absorbing material. The suppression performance is analyzed. The results reveal that the terahertz scattering characteristics of the aircraft are remarkable in front and rear directions while the peak value of radar cross section in rear direction is up to 60 dBsm. With the suppression measures, the mean reductions of radar cross section in horizontal and vertical incidence-reception polarization at the rear angles of  $\pm 10^\circ$  are 19.62 dBsm and 19.35 dBsm, respectively.

**Key words:** terahertz radar cross section; shooting and bouncing rays; rough surface; Ni@mica absorber material

## 0 引言

太赫兹(THz)波是指频率范围(0.1~10.0) THz,对应波长范围 $30\ \mu\text{m}\sim 3\ \text{mm}$ 的电磁波。太赫兹波在长波波段与亚毫米波波段重合,在短波波段与红外波波段重合,因在电磁波谱上所处的特殊位置,使其既具有微波和红外波的优点,又能克服它们的缺点。这使得太赫兹波在目标探测领域具有广阔的应用前景,太赫兹探测技术已发展成现役飞行器的一个重要潜在威胁。为了应对太赫兹探测技术的威胁,亟需开展飞行器太赫兹散射特性抑制方法研究。

太赫兹波作为一种高频电磁波,其波长很短,目标太赫兹散射特性仿真必须要考虑表面粗糙度的影响。李昌泽等<sup>[1]</sup>采用高斯随机粗糙面模拟粗糙目标表面,使用物理光学和等效电流相结合的方法,对F-117飞机在不同频率和不同粗糙度条件下的后向雷达散射截面(radar cross section, RCS)进行仿真分析;赵华等<sup>[2]</sup>采用物理光学法研究了具有分形粗糙表面的涂覆目标太赫兹散射特性;牟媛等<sup>[3]</sup>采用稳定相位法和标量近似法计算了粗糙介质球的太赫兹相干和非相干散射特性。在目标太赫兹散射特性试验测试方面,丹麦技术大学<sup>[4]</sup>基于太赫兹时域光谱技术搭建了目标RCS测量系统,对1/150的F-16战斗机缩比模型进行了RCS测量;武亚君、黄欣等<sup>[5-6]</sup>基于微波上变频技术和太赫兹时域光谱技术研制了太赫兹目标RCS测量系统,对E-2C预警机、SH-60直升机、F-16战斗机等缩比模型的RCS进行了测量。在飞行器太赫兹散射特性抑制方法研究方面,相关研究主要聚焦于太赫兹吸波材料研制<sup>[7]</sup>。

本文基于太赫兹时域单站RCS测试系统,对弹跳射线法的计算精度进行校验;采用经校验的弹跳射线法对典型飞行器的太赫兹后向散射特性开展仿真;基于仿真结果综合,采用增大表面粗糙度和涂覆吸波材料两种措施抑制太赫兹散射特性,并对抑制方案的效果进行分析。

## 1 飞行器太赫兹散射特性仿真方法

### 1.1 弹跳射线法

弹跳射线法(shooting and bouncing rays,

SBR)是一种几何光学法和物理光学法相结合的方法。该方法使用一组射线管代替入射电磁波,采用几何光学方法追踪射线传输过程,并计算电磁波在目标表面发生多次反射时的场强及相位变化;当射线管离开目标表面时,利用物理光学方法积分计算射线对散射场的贡献,累加全部射线的散射场即可求解出目标总的散射场<sup>[8]</sup>。

电磁波入射到目标表面时,可以分为电场方向垂直于入射平面的分量——横电(transverse electric, TE)波 $E_{\perp}^i$ 和电场方向平行于入射平面的分量——横磁(transverse magnetic, TM)波 $E_{\parallel}^i$ ,则反射场的电场矢量 $E^r$ 可以表示为

$$E^r = E_{\perp}^r e_{\perp}^r + E_{\parallel}^r e_{\parallel}^r \quad (1)$$

其中

$$\begin{bmatrix} E_{\perp}^r \\ E_{\parallel}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_{\perp} & 0 \\ 0 & \Gamma_{\parallel} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\perp}^i \\ E_{\parallel}^i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $E_{\perp}^r$ 和 $E_{\parallel}^r$ 分别为反射波的TE和TM分量; $e_{\perp}^r$ 和 $e_{\parallel}^r$ 分别为反射波TE波和TM波分量的单位矢量; $\Gamma_{\perp}$ 和 $\Gamma_{\parallel}$ 分别为TE波和TM波的反射系数。

若待计算场点与目标处于远场,可以进行远场近似处理。此外,物理光学法认为被电磁波照亮的区域存在感应电磁流,而未被照亮的区域没有感应电磁流。因此,位于亮区S内的理想导体,其散射场积分公式可以表示为

$$\begin{aligned} H^s = -jk \frac{\exp(-jkR)}{4\pi R} \iint_S \mathbf{r} \times [2\mathbf{n} \times \mathbf{H}_{M-1} \times \\ \exp(-jk\mathbf{r}_s \cdot (\mathbf{r}' - \mathbf{r}'_p))] \exp(-jk\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}') ds \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $k$ 为波数; $\exp(-jkR)/4\pi R$ 为格林函数,其中 $R$ 为源点至场点的距离; $\mathbf{r}$ 为散射方向矢量; $\mathbf{n}$ 为亮区的外法线矢量; $\mathbf{H}_{M-1}$ 为前一次反射点处的散射场, $M$ 为反射次数; $\mathbf{r}_s$ 为射线管在发生反射时的入射方向; $\mathbf{r}'$ 为亮区上任意一点的位置矢量; $\mathbf{r}'_p$ 为反射点的位置矢量; $s$ 为照亮区域面积的积分微元。

基于上述方程计算出每根射线管的散射矢量,并将所有的射线管的散射矢量进行求和,可以得到目标总的RCS值。

### 1.2 仿真方法精度校验

对1/150的F-16飞机金属缩比模型的太赫

兹散射特性进行仿真和测试,对比仿真结果、太赫兹时域单站 RCS 测试系统测试结果和文献[4]中的数据,验证采用弹跳射线法计算目标太赫兹散射特性的精确度。太赫兹时域单站 RCS 测试系统主要由飞秒激光器、THz 波发生器、太赫兹分束镜、THz 波探测器、时间延迟系统等组成,如图 1 所示。该测试系统利用大焦距离轴抛物面镜对光电导天线的发散角进行扩束,在光路中加入太赫兹分束镜,实现对 F-16 飞机缩比模型的太赫兹散射特性单站时域光谱 RCS 测量。图 2 为测试用的 1/150 的 F-16 飞机金属缩比模型。

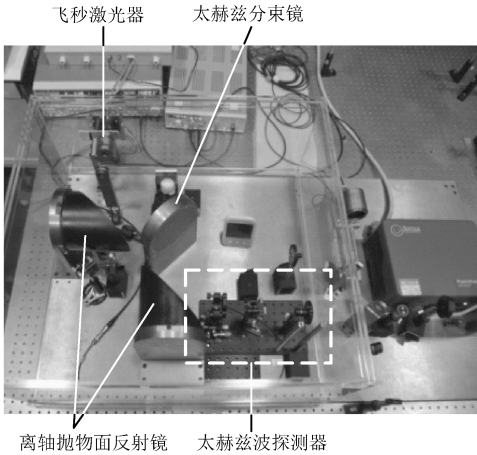


图 1 太赫兹时域单站 RCS 测试系统

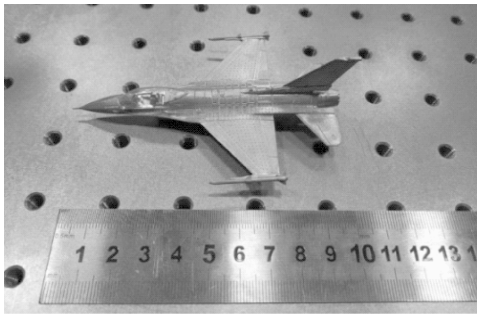


图 2 1/150 的 F-16 飞机金属缩比模型

设方位角为  $90^\circ$ ,  $-180^\circ \sim +180^\circ$  俯仰角范围内,缩比模型太赫兹 RCS 的文献数据、测试数据和仿真结果如图 3 所示。经对比可以发现,三组 RCS 曲线的变化规律相似,均在飞机背部(俯仰角  $0^\circ$ )和腹部(俯仰角  $180^\circ$ )位置出现峰值;三组 RCS 曲线的量值接近,文献数据、测试数据和仿真结果的 RCS 峰值分别为  $-9.2$ ,  $-8.4$ ,  $-10.1$  dBsm,最大误差为  $1.7$  dBsm。综合考虑测试误差等因素,可以认为采用弹跳射线法仿真

目标太赫兹散射特性的精度满足研究要求。

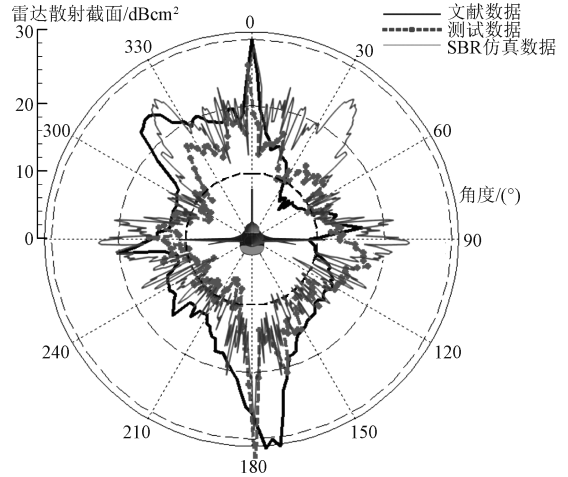


图 3 F-16 金属缩比模型 RCS 分布的文献数据、测试数据和弹跳射线法仿真数据对比

## 2 典型飞行器太赫兹散射特性仿真

### 2.1 飞行器几何模型

以某典型隐身飞行器为对象,对进气道部件和排气系统部件进行简化,采用平面代替腔体结构。同时对整个飞行器表面进行了光滑处理,消除了所有的缝隙、沟槽、台阶等不连续的细微结构,构建本文研究所需的飞行器模型,如图 4 所示。

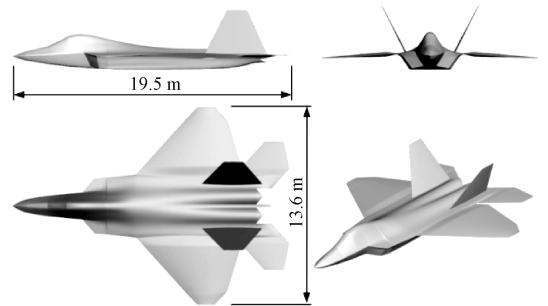


图 4 某典型隐身飞行器三维几何模型

### 2.2 仿真与结果分析

定义仿真坐标系原点  $o$  为飞行器重心, $x$  轴沿机身轴线指向机头, $z$  轴指向机背正上方, $y$  轴与  $x$  轴、 $z$  轴构成直角坐标系,太赫兹波  $\beta_0$  入射方向和  $z$  轴的夹角为  $\theta$ ,入射方向在  $xoy$  平面的投影与  $x$  轴的夹角为  $\varphi$ ,如图 5 所示。考虑到飞

飞行器前向扇区散射特性的重要性,在  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ \sim 360^\circ$  (水平面) 和  $\theta = -60^\circ \sim +60^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  (竖直面) 范围内,对飞行器在 0.22 THz 频率上的后向 RCS 进行了仿真,计算角度间隔为  $1^\circ$ 。

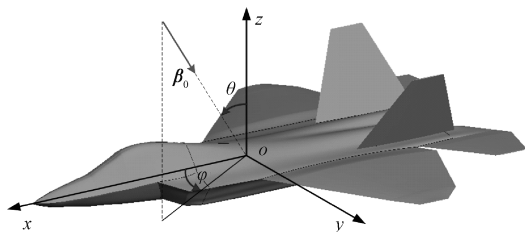


图 5 太赫兹散射特性仿真角度示意图

飞行器在 0.22 THz 频率的后向 RCS 分布如图 6 所示。其中,图 6(a) 为  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ \sim 360^\circ$  时 HH 和 VV 极化方式下的后向 RCS 分布曲线,图 6(b) 为  $\theta = -60^\circ \sim +60^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  时 HH 和 VV 极化下的后向 RCS 分布曲线。

分析图 6(a) 中的 RCS 分布曲线可以发现,该飞行器的前半球 RCS 整体小于后半球 RCS,侧向 RCS 较大。在前向 ( $\varphi = 0^\circ$ ) 和正后向 ( $\varphi = 180^\circ$ ) 范围内,RCS 幅值较大。在前向 ( $\varphi = 0^\circ$ ) 小角度范围内,RCS 峰值达到  $-3$  dBsm,这是由进气道、雷达天线舱、座舱等强散射源引起的。特别是简化后的进气道进口平面在前向表现出很强的反射特性,使得前向的 RCS 出现突增。在正后向 ( $\varphi = 180^\circ$ ) 范围内,RCS 最大,达到 60 dBsm,这是由于简化后的喷管出口平面在正后向表现出很强的反射特性。

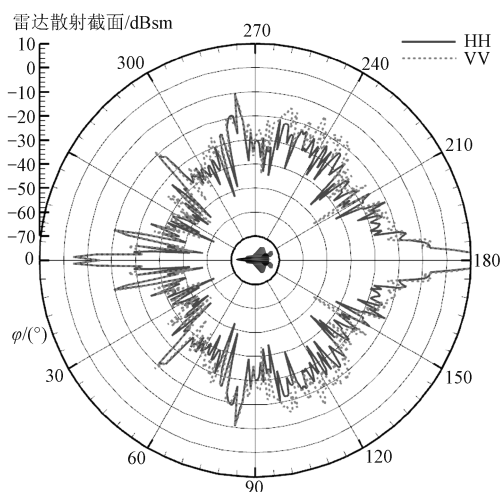
分析图 6(b) 中的 RCS 分布曲线可以发现,在竖直面内,上下半球的 RCS 不对称,且下半球的 RCS 幅值大于上半球的 RCS 幅值,这是因为简化后的进气道进口截面向下倾斜,反射能量主要集中在下半球。

综上所述,该飞行器在前向和后向的 RCS 幅值较大,主要散射源为飞行器雷达天线舱、座舱、简化后的进气道进口平面和喷管出口平面。

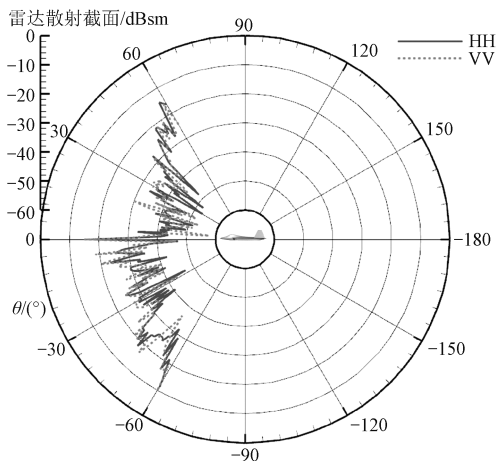
### 3 太赫兹散射特性抑制方法

#### 3.1 方案设计

目前尚未见公开发表的文献涉及目标太赫兹散射特性抑制方法研究,但有文献研究表明改变



(a) 水平面,  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ \sim 360^\circ$



(b) 竖直面,  $\theta = -60^\circ \sim +60^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$

图 6 飞行器在 0.22 THz 频率的后向 RCS 分布曲线

目标表面粗糙度能够改变目标的太赫兹后向散射特性;此外,太赫兹吸波材料可用于抑制目标太赫兹散射特性。本文综合利用增大表面粗糙度和涂覆吸波材料两种措施开展飞行器太赫兹散射特性抑制方案设计。

粗糙表面可以增大弱散射源的后向散射,减小强散射源的后向散射,即粗糙表面可以使得散射能量在半球空间呈现均匀分布的趋势。对目标的强散射部件采用增大表面粗糙度的措施可以降低后向 RCS 峰值。本文采用基于模型网格微元的粗糙面构造方法构造飞行器粗糙表面。其基本思想为在光滑模型网格节点上叠加随机法向分量,得到具有一定粗糙度的网格节点坐标,进而生成表面具有一定粗糙度的三维目标模型。

太赫兹吸波材料能够将入射的太赫兹波能量以分子摩擦产生热能的方式耗散掉,是一种有效

的太赫兹散射特性抑制措施。本文采用的吸波材料为 15% 重量比的镍包覆云母 (Ni@mica)。经测试, 该材料在  $(0.10 \sim 0.26)$  THz 的频率范围内的介电常数  $\epsilon = 3.6 - j1.7$ 。通过分析涂覆吸波涂层平板的法向反射功率随着吸波涂层的厚度变化的情况, 确定镍包覆云母吸波材料的最佳涂覆厚度为 0.2 mm。

基于 2.2 节中的飞行器太赫兹散射特性仿真结果, 对雷达天线舱、座舱、简化后的进气道进口平面和喷管出口平面部件采用粗糙表面措施, 以减小飞行器前向和后向的 RCS 峰值。强散射部件采用粗糙度为 5 倍入射波长 ( $5\lambda$ ) 的粗糙表面后的飞行器模型如图 7 所示。同时, 为减小飞行器所有方位上的 RCS 值, 对整机涂覆吸波材料。

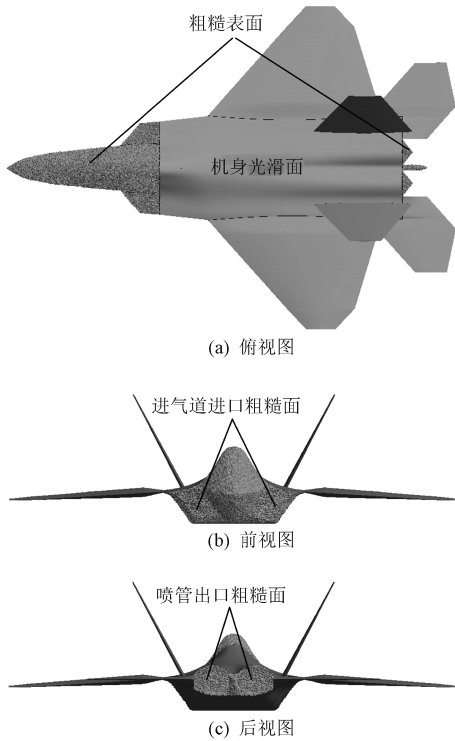


图 7 强散射部件采用粗糙度为  $5\lambda$  的粗糙面后的飞行器模型

### 3.2 效果分析

对采用上述两种太赫兹散射特性抑制措施的飞行器在 0.22 THz 频率的后向 RCS 进行仿真, 对比飞行器采用抑制措施前后的 RCS 分布, 可以得到该方案的太赫兹散射特性抑制效果。图 8 给出了在 0.22 THz 频率下, 采用抑制措施前后飞行器水平面 ( $\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ \sim 360^\circ$ ) 内的

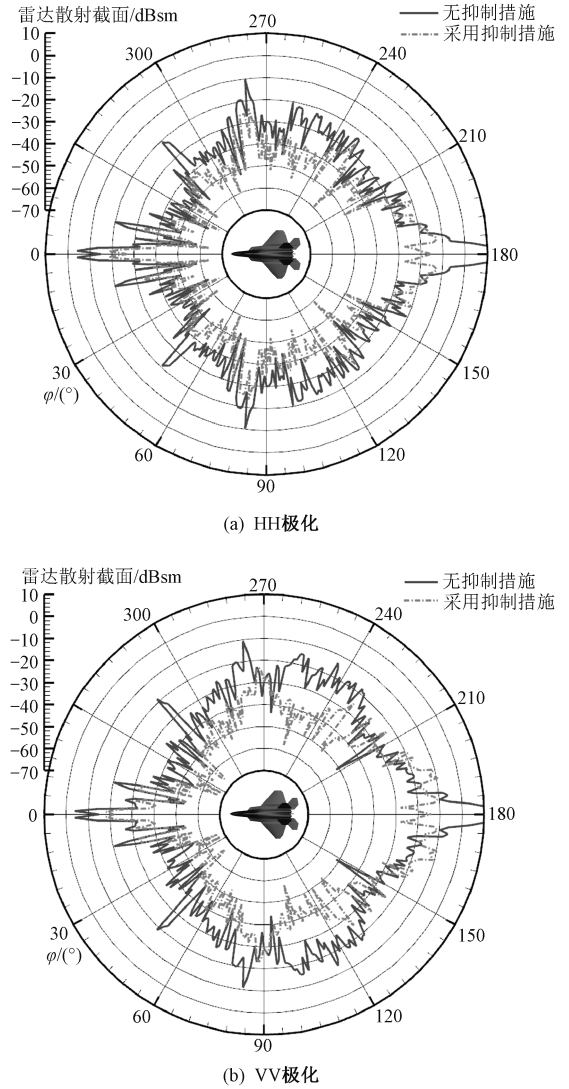


图 8 采用抑制措施前后, 飞行器在 0.22 THz 频率、水平面 ( $\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ \sim 360^\circ$ ) 内的 RCS 分布

后向 RCS 分布。可以看出, 采用抑制措施后, 飞行器在水平面周向范围内 HH 极化和 VV 极化的后向 RCS 均有一定程度降低。在侧向范围 ( $\varphi = 30^\circ \sim 150^\circ$  和  $\varphi = 210^\circ \sim 330^\circ$ ) 内, 由于机身涂覆了吸波材料, 飞行器的后向 RCS 均有不同程度的降低。在前向小角度范围 ( $\varphi = 0^\circ \sim 5^\circ$  和  $\varphi = 355^\circ \sim 360^\circ$ ) 内, 飞行器的后向 RCS 降幅较大, HH 极化的 RCS 平均降幅达 6.88 dBsm, VV 极化的 RCS 平均降幅达 8.28 dBsm。在正后向小角度范围内 ( $\varphi = 170^\circ \sim 190^\circ$ ), 飞行器的后向 RCS 降幅显著, HH 极化的 RCS 平均降幅达 19.62 dBsm, VV 极化的 RCS 平均降幅达 19.35 dBsm。这是因为喷管出口截面在涂覆吸

波材料的同时,还增大了粗糙度,原先的镜面反射变为漫反射,使得后向小角度范围内的 RCS 显著降低。在偏离正后向角度范围( $\varphi=150^\circ\sim 170^\circ$ 和 $\varphi=190^\circ\sim 210^\circ$ )内,飞行器的后向 RCS 没有降低,反而略有增大。这是因为喷管出口截面设置了粗糙度,使得正后向的雷达回波能量均匀散射到后向范围内,虽然涂覆了吸波材料,但由于粗糙面散射的回波能量较强,使得吸波材料无法完全吸收。

图9给出了在0.22 THz频率下,采用抑制措施前后飞行器竖直面( $\theta=-60^\circ\sim +60^\circ$ , $\varphi=0^\circ$ )内的后向 RCS 分布。可以看出,采用抑制措施后,飞行器在竖直面内 HH 极化和 VV 极化的后向 RCS 均有一定程度降低。 $\theta=-60^\circ\sim +60^\circ$ 时,HH 极化的 RCS 降幅达6.82 dBsm, VV 极化的 RCS 降幅达6.74 dBsm。

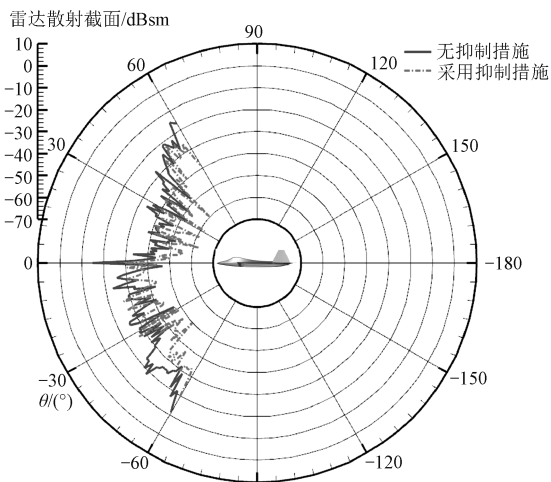
## 4 结论

本文采用弹跳射线法对典型飞行器的太赫兹后向 RCS 特性开展仿真分析。基于仿真结果,综合应用增大表面粗糙度和涂覆吸波材料两种措施抑制太赫兹散射,并对其抑制效果进行分析。得到三点结论:

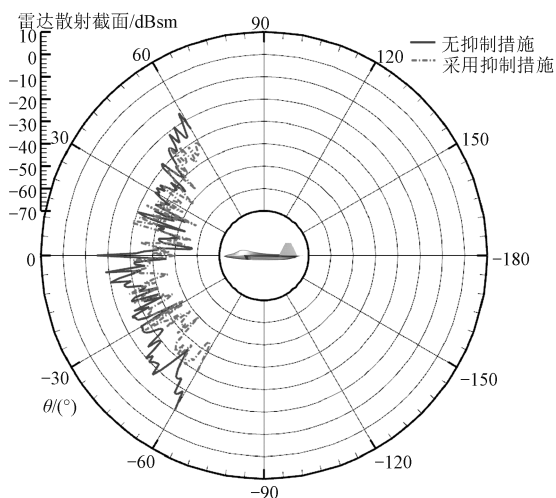
a) 对比1/150的F-16飞机金属缩比模型 RCS 的弹跳射线法仿真数据、文献数据和测试数据,三者最大误差为1.7 dBsm,说明弹跳射线法是一种高精度的目标太赫兹散射特性仿真方法;

b) 本文研究的隐身飞行器主要散射源为雷达天线舱、座舱、简化后的进气道进口平面和喷管出口平面,飞行器前向和后向 RCS 幅值较大,在前向及后向小角度范围内 RCS 峰值分别达到-3 dBsm和60 dBsm;

c) 综合采用增大表面粗糙度和涂覆吸波材料的方法抑制飞行器太赫兹频段后向 RCS,水平面前向小角度范围内 HH 极化与 VV 极化的 RCS 平均降幅分别达6.88 dBsm和8.28 dBsm,正后向小角度范围内 HH 和 VV 极化的 RCS 平均降幅分别达19.62 dBsm和19.35 dBsm,竖直面 $120^\circ$ 角度范围内 HH 和 VV 极化的 RCS 降幅分别达6.82 dBsm和6.74 dBsm。



(a) HH极化



(b) VV极化

图9 采用抑制措施前后,飞行器在0.22 THz频率、竖直面( $\theta=-60^\circ\sim +60^\circ$ , $\varphi=0^\circ$ )内的 RCS 分布

## 参考文献

- [1] 李昌泽,童创明,王童,等.非均匀不稳定表面粗糙目标的太赫兹波段散射特性分析[J].红外与毫米波学报,2016,35(2):234-242.
- [2] 赵华,郭立新.分形粗糙表面涂覆目标太赫兹散射特性[J].雷达学报,2018,7(1):91-96.
- [3] 牟媛,吴振森,赵豪,等.粗糙金属和介质目标的太赫兹散射特性分析[J].雷达学报,2018,7(1):83-90.
- [4] IWASZCZUK K, HEISELBERG H, JEPSEN P U. Terahertz radar cross section measurements[J]. Journal of the Optical Society of America, 2010,

18(25): 26399-26408.

- [5] 武亚君, 黄欣, 徐秀丽, 等. 太赫兹目标 RCS 缩比测量技术[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1541-1544.
- [6] 黄欣, 武亚君, 王晓冰, 等. 太赫兹目标雷达散射截面测量技术[J]. 空间电子技术, 2013(4): 104-109.

- [7] 王东红, 李宝毅, 周必成. 太赫兹波段吸收材料研究[J]. 微波学报, 2014(S1): 570-573.
- [8] LING H, CHOU R I, LI S W. Shooting and bouncing rays: calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(2): 194-205.

(上接第 19 页)

- [5] 马慧慧, 陶海红. 稀疏拉伸式 L 型极化敏感阵列的二维波达方向和极化参数联合估计[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(4): 902-909.
- [6] 郭映月, 黄焱, 贾永强. 基于最小冗余四阶循环累积量阵的 DOA 估计新方法[J]. 信息工程大学学报, 2007, 8(1): 72-76.
- [7] LIU C L, VAIDYANATHAN P P. Super nested arrays: linear sparse arrays with reduced mutual coupling-part II: high-order extensions [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(16): 4203-4217.
- [8] DONG W, DIAO M, GAO L P, et al. A low-complexity DOA and polarization method of polarization-sensitive array[J]. Sensors, 2017, 17(5): 1170.
- [9] ZHAO J C, TAO H H. Estimation of DOA and polarization parameters with 2-level nested vector-sensor array based on quaternion model [J].

- Transactions of Tianjin University, 2016, 22(6): 583-589.
- [10] HE J, ZHANG Z H, SHU T, et al. Direction finding of multiple partially polarized signals with a nested cross-dioplearray [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1679-1682.
- [11] YANG M L, DING J, CHEN B X, et al. A multiscale sparse array of spatially spread electromagnetic-vector-sensors for direction finding and polarization estimation[J]. IEEE Access, 2018, 6: 9807-9818.
- [12] WONG K T, SONG Y, FULTON C J, et al. Electrically “long” dipoles in a collocated/orthogonal triad-for direction finding and polarization estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(11): 6057-6067.