

RCS测量中聚苯乙烯泡沫支架的电磁散射特性研究

焦海松¹, 李斌¹, 刘宗信¹, 王泉^{1,2}, 赵玉磊¹

(1. 解放军95841部队, 甘肃酒泉 735018; 2. 解放军95972部队, 甘肃酒泉 735018)

摘要: 聚苯乙烯泡沫(Expanded PolyStyrene, EPS)支架的电磁散射特性是雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)测量系统性能的关键, 直接决定雷达隐身测试精度。针对6种常用EPS支架构型, 本文通过建立EPS材料介电参数模型与支架三维模型, 开展介质实体建模与电磁仿真研究, 并利用RCS测试场进行实验验证, 分别对EPS支架的单站/双站、点频/扫频、频域/时域等方面的电磁散射特性进行了深入细致的分析, 提出了双菱形锥柱长轴共线与短轴共线相结合的方案, 有效改进背景性能。仿真与实测表明, 双菱形锥柱构型适用于典型空中目标支撑, 尤其可在较大双站角范围内实现-55 dBsm以下的极低散射背景, 能够保障隐身目标单/双站测试的背景需求; EPS支架单站RCS对极化特性不敏感, 而其双站散射的水平极化明显低于垂直极化。此外, 低频段扫频特性起伏振荡达30 dB以上, 振荡峰值频率与支架尺寸、位置满足干涉规律。故通过支架设计可使特定频点处于振荡谷值, 从而优化低散射背景。本文为RCS测量极低散射背景设计提供了思路及指导。

关键词: 聚苯乙烯泡沫(EPS); 电磁散射特性; 雷达散射截面(RCS); RCS测量; 介质建模仿真

基金项目: 国家自然科学基金(No.62071487, No.61974165)

中图分类号: TN 95

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)08-2144-08

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220639

Electromagnetic Scattering Characteristics Research of Expandable Polystyrene Support in RCS Measurement

JIAO Hai-song¹, LI Bin¹, LIU Zong-xin¹, WANG Quan^{1,2}, ZHAO Yu-lei¹

(1. 95841 Troops of PLA, Jiuquan, Gansu 735018, China; 2. 95972 Troops of PLA, Jiuquan, Gansu 735018, China)

Abstract: The electromagnetic scattering characteristics of expanded polystyrene (EPS) supports are crucial to the performance of radar cross section (RCS) measurement system, which decide the precision of radar stealth measurement directly. As for six frequently-used configurations of EPS supports, this paper performs dielectric entity modeling and electromagnetic simulation research by building the model of EPS material dielectric constant and three-dimensional models of supports. And experimental proof is carried out under RCS test field. Consequently, the electromagnetic scattering characteristics of EPS supports are analyzed in depth and detailedly from aspects of monostatic and bistatic, dot and sweep frequency, frequency and time domain, and so on. A scheme of two-diamond cone column with long-axis collineation and short-axis collineation combined is proposed, improving the background performance. Simulation and test results indicate the configuration of two-diamond cone column is fit to support typical aerial targets, especially can realize extremely low scattering background below -55 dBsm, which can guarantee the background demand for monostatic and bistatic test of stealth target. And the monostatic RCS of EPS support is not sensitive to polarization characteristics, while its bistatic scattering of horizontal polarization is obviously lower than that of vertical polarization. Moreover, the sweep fluctuation in low frequency range is up to above 30dB, and whose peak values satisfy an interference rule with size and position of the EPS support. Then the fluctuation valley can be realized at specific frequency by designing support so as to optimize the low scattering background. This paper provides some thoughts and guidance for designing extremely low scattering background in RCS measurement.

Key words: expanded polystyrene (EPS); electromagnetic scattering characteristics; radar cross section (RCS); RCS measurement; dielectric modeling and simulation

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62071487, No.61974165)

1 引言

随着隐身/反隐身作战需求的发展,武器平台的雷达隐身设计与性能评估越发引起广泛的重视^[1,2]. 雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)测试是鉴定目标隐身性能的主要手段^[3],目标支撑系统是 RCS 测试系统的关键组成,其自身背景散射水平直接影响目标测量结果的不确定度^[4]. 同时,由于旋转角度精度、环境时变等因素,室外场严格的背景对消很难实现^[5]. 支架自身背景 RCS 应尽可能低,通常需低于目标散射水平 20 dB 以上. 目标支架要保证支撑安全稳定条件下的低散射特性,称为低散射支架,包括低散射金属支架、发泡柱体和高强度非金属吊线 3 种主要类型,以及充气支柱、磁悬浮等新型理论方法^[6]. 其中,用于大载重目标模型的金属支架与用于实装目标的泡沫支架是现代 RCS 测试场最主要的目标支撑方式,前者规模代价巨大,多用于重要型号目标模型测量;后者应用较为广泛、灵活,且目标与支架不易发生耦合.

聚苯乙烯泡沫(Expanded PolyStyrene, EPS)采用发泡技术制作,内部是充满空气的小颗粒,体积 97% 为空气,介电常数极低. 而且 EPS 泡沫采用热熔丝切割方式,可方便地塑造适合不同目标的泡沫支架接口,不破坏目标本身结构,能够保障实装目标 RCS 测量. 良好的低散射特性及其成本低、易加工成型的特点使 EPS 泡沫支架成为紧缩场、暗室、室外场等 RCS 测试系统普遍使用的目标支撑方式^[6]. EPS 泡沫支架散射包括表面相干散射与内部颗粒单元结构的非相干瑞利散射(体散射)^[7]. 文献[6]利用传统均匀媒质传输线理论方法解析了简单外形 EPS 泡沫的面散射 RCS. 文献[8]基于波恩-利托夫模型研究了典型外形的 EPS 支架结构,提供了一种效率较高的面散射 RCS 近似仿真方法. 文献[7]给出了体散射 RCS 计算的公式. 一般认为,其面散射与支架外形相关,而体散射只与支架体积有关. 研究表明,表面相干散射在泡沫电磁散射中占相对主要贡献^[6,9],尤其是 C 波段以下频谱^[10],这也为 EPS 泡沫支架低散射外形设计提供了理论前提.

尽管文献[6, 11, 12]对 EPS 支架进行了软件仿真,但主要通过模型表面设置通用介电参数仿真面散射机理;文献[6, 9]还利用紧缩场进行了实验测试,但其对象只是简单圆柱和方柱,未涉及室外 RCS 测试场主流的支架构型;并且目前针对 EPS 支架双站特性、时频域分析等方面的研究极少. 随着目标隐身性能的不断优化,现有泡沫支架使用方案有必要进行研究改进. 本文对 RCS 测试中广泛应用的 EPS 泡沫支架进行电磁散射特性仿真及实验研究,并提出了 RCS 测量背景低散射优化设计思路. 下文首先建立了 EPS 介质的实体电磁仿真模型,主要研究菱形与圆柱等常用构型,尤其是

中型目标双菱形锥柱. 其次,介绍了 EPS 支架在地面平面场测量系统的应用,即其 RCS 实验测量系统. 然后,给出了所述构型的仿真与测量结果,并进行了单站、双站及宽带扫频的结果分析. 最后,对本文进行了总结,并展望下一步工作.

2 聚苯乙烯泡沫材料支架 FEKO 建模

2.1 EPS 材料的电参数

EPS 材料是典型的介质材料,为了在电磁仿真软件(FEKO)中对 EPS 支架建模仿真,需获取相关的介电参数. 文献[13]给出了 EPS 在 1 MHz 频率下的介电常数,文献[14]则提供了 EPS 在 Ku 波段的介电常数与损耗正切数据,如表 1 所示. 可见,对于极低频率与高频 Ku 波段, EPS 介电常数 ϵ 变化不大,而不同介质密度的常数 ϵ 则差别较大,表明 EPS- ϵ 不具备频率相关性,而具有密度相关性. 文献[14]通过数据拟合找到了 ϵ - ρ 间的经验公式,数据吻合良好:

$$\epsilon = (0.32475\rho + 1)^3 \quad (1)$$

考虑 RCS 测试场常用 EPS 支柱材料,本文取密度 $\rho=20 \text{ kg/m}^3$,即得 $\epsilon=1.0211$,进行仿真研究.

表 1 聚苯乙烯泡沫材料的介电参数

密度 ρ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	介电常数 ϵ		介电损耗 $\tan\delta$
	频率 (1 MHz) ^[13]	频率 (12~18 GHz) ^[14]	频率 (12~18 GHz) ^[14]
0.08	1.06	1.08	7.82×10^{-4}
0.14		1.13	9.08×10^{-4}
0.20	1.28		
0.24		1.26	1.81×10^{-3}

另外,根据文献[14]数据,绘制 EPS 介电损耗与密度的关系图,如图 1 所示. 可见,介电损耗随介质密度增大而增大,且增长速率呈阶段性. 考虑关注密度点 (0.02 g/cm^3),本文采用就近原则,按线性推导其相应的介电损耗正切,得 $\tan\delta=6.56\times 10^{-4}$. 至此,得到了 EPS

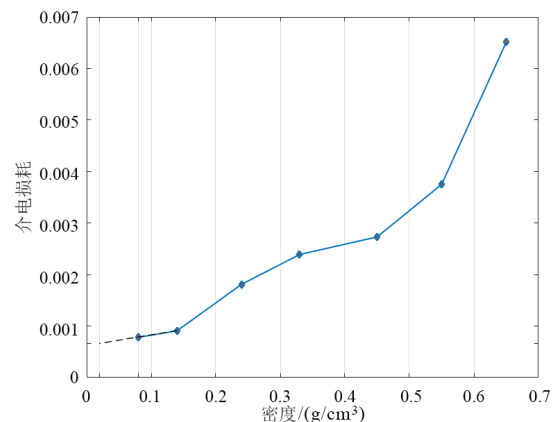
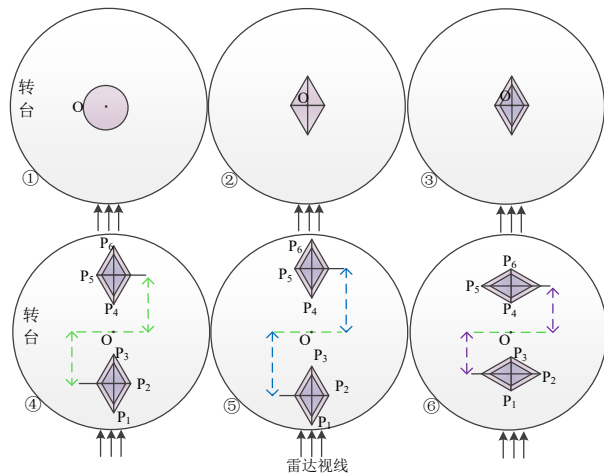


图 1 EPS 介电损耗随密度变化关系图

电磁仿真主要的介电参数。

2.2 支架构型

针对 RCS 测试常用泡沫支架外形与设置,研究如图 2 所示的 EPS 支架构型。其中,单圆柱形与菱形柱形保证高度一致(0.8 m)、体积相同(0.296 4 m³),且单菱形柱与锥柱保证菱形长短轴比不变(1.32),用于对比研究不同外形对支柱性能的影响。随后,主要关注双菱形锥柱构型。



①单圆柱;②单菱形柱;③单菱形锥柱;④长轴共线双菱形锥柱;⑤长轴共线双菱形锥柱,延长间距;⑥短轴共线双菱形锥柱

图 2 泡沫支架构型示意图

菱形泡沫支架能够有效减小关键角域背景电平,是低散射目标常用的支架构型。一般地,小型目标可使用单支架,而双泡沫支柱是军用隐身目标(如导弹、靶机、发动机)常用的支撑方式。因此,本文将对双菱形锥柱构型进行详细研究,对应不同测试场景设置不同的支架相对关系,进而深入研究双菱形 EPS 支架的散射特性。本文中,菱形锥柱具体参数为:下底面 1.12 m×0.85 m,上底面 0.85 m×0.65 m。双支架位置参数设置如表 2 所示。

表 2 双菱形支架参数设置

	构型④	构型⑤	构型⑥
中心间距/mm	1486+1729	2174+1924	1594+1351
备注	长轴共线	延长间距	短轴共线

2.3 介质目标参数化建模与电磁仿真方法

根据 FEKO 电磁仿真的一般步骤,对 EPS 支架进行建模仿真,如图 3 所示。其中,三维建模依据图 2 和表 2 的参数约定,本文利用 FEKO 自带参数化建模模块完成,也可采用其他专业软件进行建模、生成网格,再导入 FEKO 进行计算。此前,EPS 仿真大多仅在模型表面设置相关介电参数^[11,12]。与之不同,本文将目标模型的介质属性设置为空间实体,与 EPS 支架实际散射特性更为贴合,从而尽量仿真 EPS 真实散射机理,但仍不能

仿真 EPS 材料内部精细的气泡颗粒结构。仿真计算采用矩量法等效算法,求解设置分别考虑点频/扫频、单站/双站、极化方向等激励和响应参数。软件仿真计算结果输出为“.ffe"文件,而后利用 MATLAB 提取响应数据,进行频域、时域和角域分析。

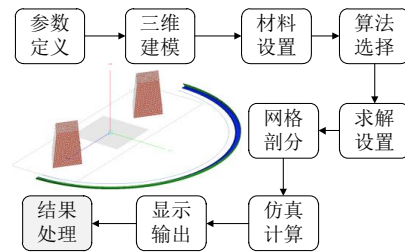


图 3 FEKO 仿真软件建模仿真完整流程

3 基于 EPS 支架的地平场 RCS 测量系统

EPS 支架原是小型目标室内场测试常用的支撑方式,一般采用铺设吸波材料方式消除地面反射杂波。这里将 EPS 支架应用于地面平面场,以低散射支撑中型实装目标,如图 4 所示。其中,天线高度与目标支撑高度满足地平场条件,使直达波 \overrightarrow{ADT} 与地面反射波 \overrightarrow{APIT} 在被测目标处相干叠加^[4],从而消除地面多径杂波,并转化为有效增益。在目标区,EPS 泡沫部分可根据目标外形进行切割赋型,进而实现需求的测试俯仰角度,并安装于玻璃钢底座上,后者提供较好的承重稳定性。玻璃钢透波性相对较差,需采用吸波屏蔽墙遮挡入射波。实践证明,上述方案能够实现较好的背景电磁环境,满足一般目标的测试条件。

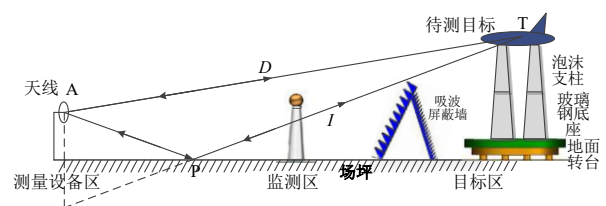


图 4 EPS 支架的地平场 RCS 测量系统

由表 1 可知,材料密度对 EPS 支架特性影响较大。EPS 支架密度越大,介电常数越大,背景散射越大,同时支架承重能力强、形变小,易于进行背景对消处理;反之,则支架自身背景小,但承重能力减弱,支撑时易形变,影响背景对消。因此,EPS 支架的低散射支撑设计是散射性与承重力的权衡。一般地,首先根据目标重量确定材料密度,然后通过外形设计优化低散射背景。

本文关注的是 EPS 支架自身的散射特性,即不放目标时的测量背景。采用图 4 所示测量系统设置,进行同地定标 RCS 测试,分时进行背景测试与定标体(标准圆柱)测试,获取背景与定标体回波,然后根据比较法

得到背景 RCS:

$$\sqrt{\sigma_B(f)} = \frac{S_B(f, t_1)}{S_C(f, t_2)} \sqrt{\sigma_C(f)} \quad (2)$$

式(2)中, $\sqrt{\sigma_B(f)}$ 和 $\sqrt{\sigma_C(f)}$ 分别为背景和标准体散射函数, $\sigma_C(f)$ 是理论已知的解析值, S_B 和 S_C 分别为背景、标准体实测回波信号。

被测 EPS 支架材料密度约为 0.02 g/cm^3 , 分别进行了双菱形锥柱构型④的 S 波段点频测试、L~Ku 波段宽带步进频扫频测试, 以及双圆柱支架的 P 波段宽带扫频测试。其中, 步进频测量的频域数据与目标时域一维距离像构成傅里叶变换对^[4]。

$$X_M(f_{vi}) \leftrightarrow A(r_k), \quad (k, i=0 \sim N-1) \quad (3)$$

式(3)中, X_M 为不同频点的回波, A 为不同径向距离的分辨单元的响应。通过将扫频数据转换为高分辨率一维像, 进行时域的滤波处理和散射中心分布的分析。

4 电磁仿真及测量结果与特性分析

4.1 单站后向散射特性

首先将仿真方法与实验测量的结果进行对比分析, 图 5 为双菱形锥柱在 S 波段下仿真(Method Of Moment, MOM)和地平场测试系统测量结果的对比。其中, 极化方式为水平-水平(Horizontal-Horizontal, HH); 仿真频点为 3 GHz, 方位间隔 1.5° ; 实测同样为 3 GHz, 采用图 4 所示测试系统设置, 角度间隔 0.2° ; 二者纵坐标数据各自进行了归一化。结果表明, 尽管对目标区采用了软件距离门滤波操作, 吸波墙回波仍对支架处散射结果有较大贡献, 从而导致实测结果高于纯支架仿真结果。但可以看出, 二者角域分布起伏的趋势大体一致。菱柱镜面反射位置均接近 52° , 表明此位置支架散射相比吸波墙在回波信号中占主导, 实际上此位置原始的实验与仿真结果亦较为接近。

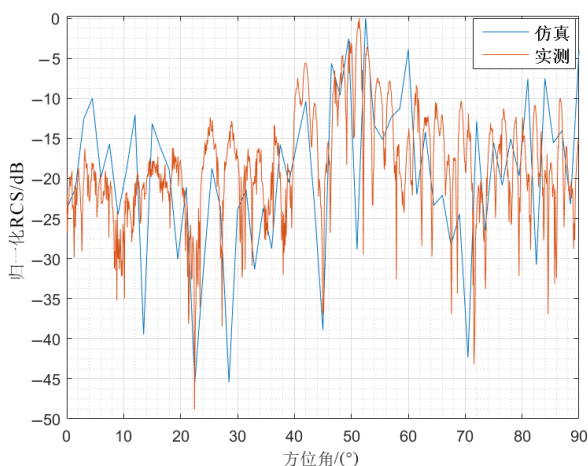


图 5 地平场实测与电磁仿真结果对比(构型④, 3 GHz)

接着, 对图 2 所示各种 EPS 支架构型进行单站 RCS 仿真研究。图 6(a) 为单支柱构型①②③在 L 波段(1.2 GHz) 下的 RCS 曲线。可见, 单圆柱在方位向基本各向同性, 但在相同体积、高度下, RCS 仅在镜面反射点附近优于菱形柱, 且普遍劣于菱形锥柱。结果表明, 菱形截面可实现较好的头向($\pm 30^\circ$) RCS 背景, 锥柱构型有利于将入射波反射到其他方向而不被接收, 以降低后向散射。进一步对双菱形锥柱进行仿真研究, 图 6(b) 是 P 波段(560 MHz) 仿真曲线。结果表明, 适当延长支架间距对 RCS 方位特性影响不大, 统计结果改变在 $\pm 1 \text{ dB}$ 以内, 但起伏的旁瓣有所增多。然后对比菱形长短轴摆放方向, 长轴共线对准入射波时头向 RCS 较好, 而短轴共线构型能提供侧向($90 \pm 30^\circ$) 的较好背景, 这里构型⑥侧向背景相对优化了 7.65 dB。因此, 所提双菱形锥柱长轴共线(构型④)与短轴共线(⑥)相结合的角域分段测试方案, 有利于实现全向高质量背景, 进而满足高隐身目标全方位保精度测试需求。

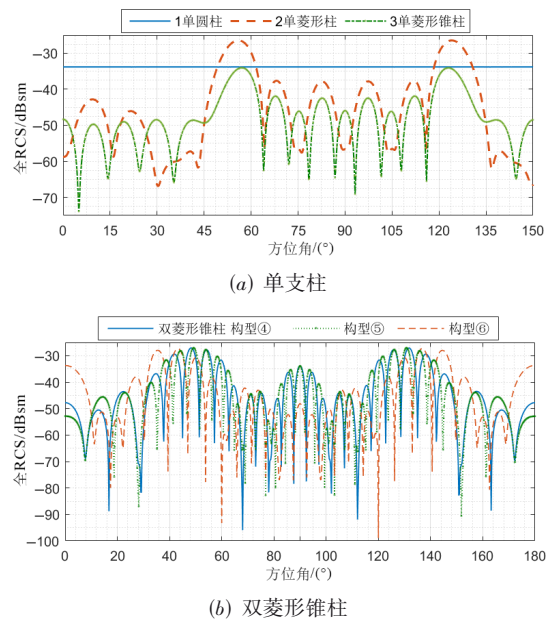


图 6 EPS 支架后向散射角域分布特性

研究双菱形锥柱在不同入射波特性下的单站 RCS。图 7(a) 是构型④在 P 和 L 波段 3 个频点下的 RCS 曲线。可以看出, 频率升高, 曲线旁瓣明显增多, 且不同频段的镜面反射峰位置略有不同; 同时, 350 MHz 的头向和正侧向 RCS 较低, 这是由于该频点恰处于目标振荡区谷值附近。图 7(b) 是构型④在 560 MHz 频率下不同极化的 RCS 曲线。两种极化下 RCS 基本保持一致, 表明 EPS 支架后向散射对入射极化属性并不敏感。

4.2 双站散射特性

图 8 所示为单支柱(构型 1~3)双站散射 RCS 特性曲线, 头向入射, 频率 1.2 GHz, 同极化 HH。结果表明,

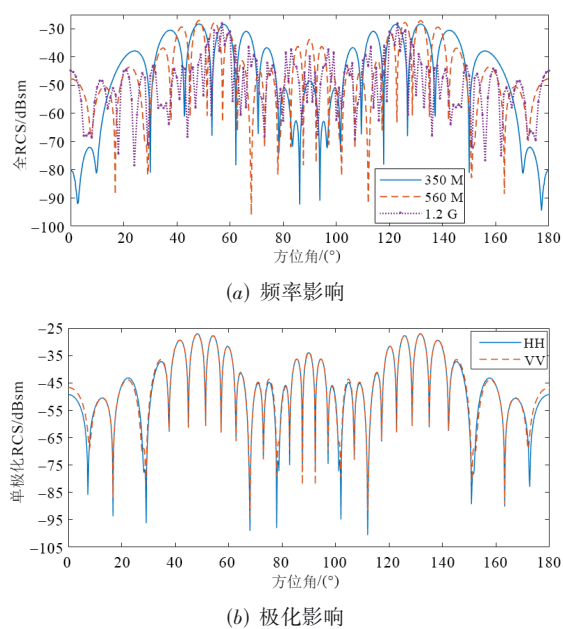


图7 双菱形锥柱EPS支架单站RCS

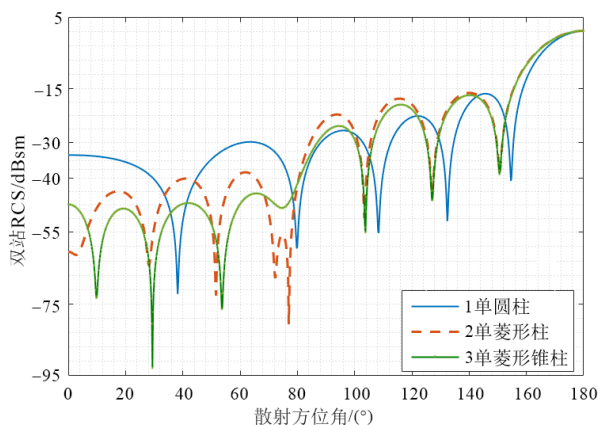


图8 单支柱双站散射角域分布特性(0度入射HH)

圆柱型支架在后向散射和其他双站散射方向均不具有背景优势;在双站角较小($<80^\circ$)时,菱锥柱也是较为最佳的构型,背景远低于 -40 dBsm. 下文将进一步研究菱锥柱构型.

图9对双菱形锥柱3种构型的双站散射特性进行了对比研究,入射方位分别取 0° 和 90° ,HH极化,频率设为P波段560 MHz. 可以看出,长轴共线构型在 0° 入射情况下能够提供较低的散射背景,在双站角 90° 范围内均值低于 -55 dBsm,若考虑背景屏蔽墙附加10 dB背景贡献,则可保证 -25 dBsm左右水平的隐身目标测试;短轴共线构型⑥则在 0° 入射、双站角相对小时,明显比前者劣化,双站 90° 以内统计约高12 dB,而当双站角进一步增大时,3种构型RCS均增大,前向散射开始起作用,差别逐渐减小. 对于 90° 入射的情况,相比之下,短轴共线构型则具有绝对优势,其双站角 90° 内统计均值

达 -57 dBsm,约比长轴共线方式优化12 dB. 这表明在双站情景下,长、短轴共线构型分别适合 0° 和 90° 附近入射情况的测试. 进一步说明,所提长短轴共线结合的角度分段应用方案不仅对单站测试有效,在双站测试中同样有较大应用价值.

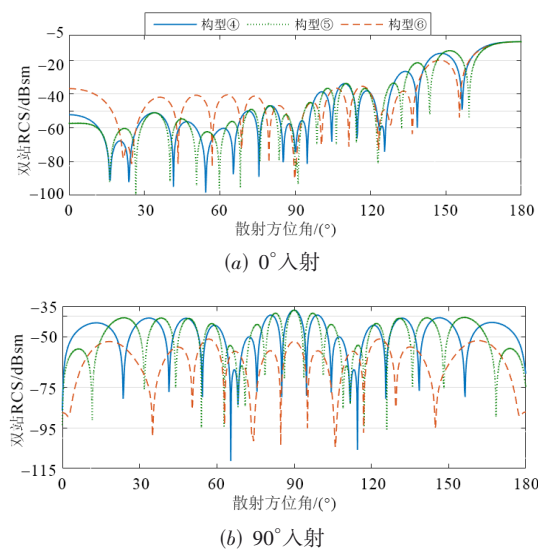


图9 双菱形锥柱EPS支架双站RCS

最后,研究双站散射中频率和极化的影响,如图10所示,对构型④在350 MHz,560 MHz和1.2 GHz下对2种不同频率的同极化双站RCS进行了仿真对比. 与单站情况不同,入射波极化在双站散射中作用明显不同. 在双站角较小(伪单站区),不同极化基本差别不大,这与后向散射极化不敏感相符合;在双站角较大的双基地区,不同极化间的差别最明显,HH极化普遍明显优于VV的情况;而双站角接近 180° 的前向散射区不再与目标形状和极化相关,极化间的差别又逐渐消除了. 结果表明,EPS支架HH极化双站背景明显优于VV极化;350 MHz情况整体表现良好(振荡谷值),双站角 115° 内两种极化RCS均值均可达 -40 dBsm以下;560 M与1.2 GHz在 90° 双站角内HH极化可达 -50 dBsm, VV则在 -40 dBsm以上. 总体而言,EPS双菱形锥柱能够在较大双站角范围($>90^\circ$)内实现极低的背景,并为屏蔽墙提供了一定的附加背景空间,满足目标双基地隐身测试的一般需求.

4.3 扫频特性与一维距离像

针对双菱形锥柱构型开展扫频仿真,研究其时频域特性. 图11是EPS双菱形锥柱的宽带扫频仿真结果,3种构型分别取扫频带宽1 GHz,0.5 GHz,1 GHz,频率步长1 MHz. 根据仿真结果,EPS支柱频域RCS呈现典型的双面干涉特性. 已知对于方柱,干涉峰值频率与EPS支架厚度存在关联关系, $n=(L \cdot f)/c$ ^[9],L为干涉

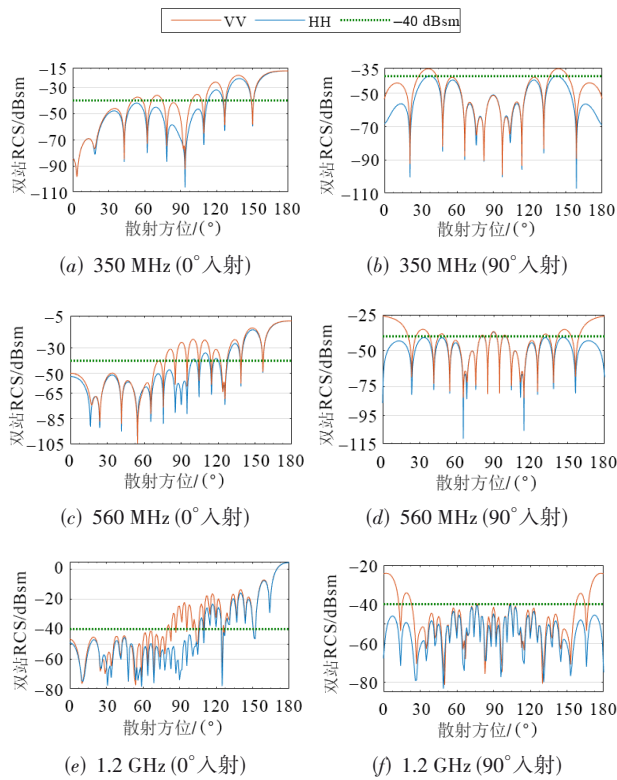


图10 双菱形锥柱不同频率双站 RCS 对比

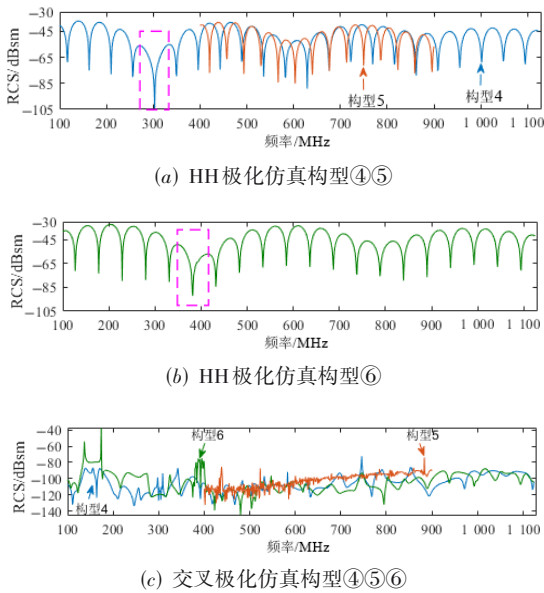


图11 EPS 双菱形锥柱扫频特性

波程差, c 光速常数, n 为整数. 故可由相邻干涉峰频率间隔得到支架轴向尺寸, 即 $L/2 = (c/\Delta f)/2$. 由图 11(a) 可得, 构型④相邻干涉频率间隔 46 MHz, 得 $L=6.5217\text{ m}$, 其双支架往返间距 $3.215 \times 2 = 6.43\text{ m}$, 仿真测试结果与物理实际较相符. 同理, 构型⑤ $\Delta f=36\text{ MHz}$, 得 $L=8.33\text{ m}$, 实际间隔 8.196 m ; 构型⑥ $\Delta f=50\text{ MHz}$, $L=6\text{ m}$, 实际 5.89 m .

因此, EPS 双菱形锥柱的支架轴向间隔与干涉频率间隔也基本符合 $L=c/\Delta f$ 关系. 同时, 由于双菱形锥柱多面反射的复杂性和低频段振荡区特性, 频域中还可能出现特殊的 RCS 极低谷值区, 如图 11(a) 和 (b) 所示. 结合上述两个关系式, 可通过调整支架间隔使得所关注频点处于支架的干涉谷值附近, 进而通过对特定的支架构型进行扫频仿真可优选其极低 RCS 频率区域, 实现较低的测试背景. 实际上, 图 7、图 10 中 350 MHz 情况下背景性能更优就是由于其处于干涉谷值频率区. 此外, 由图 11(c) 可见, EPS 支架的交叉极化几乎无规律, 且水平远远低于同极化, 故 EPS 支架是一种测量交叉极化特性的优良的支撑方式.

进一步对 EPS 支架双面干涉特性进行实验验证. 采用图 4 所示测量系统开展室外场实测, 分别对 P~Ku 等低中高 6 个频段进行宽带步进频测试, 对象为构型④以及双圆柱支架构型. 其中, S~Ku 扫频带宽为 1 GHz, L 波段带宽 900 MHz, P 波段带宽 500 MHz, HH 极化. 由于室外场背景区使用了必要的吸波墙, 本文首先将原始频域测量数据通过逆傅里叶变换至时域, 再通过定标体诊断双菱形支架位置并施加泰勒窗函数, 滤除非泡沫支架区域, 再反变换至频域, 得到 EPS 支架实测频域结果, 如图 12 所示. 已知构型④支架间隔为 $L/2=3.215\text{ m}$, 根据上文干涉规律, 其扫频峰值频率间隔应为 $\Delta f=46.7\text{ MHz}$, 且与测试频率无关; 而图 12(f) 为双圆柱支架 (中心间距 2.1 m、直径 0.8 m), 则理论 $\Delta f=51.7\text{ MHz}$. 可以看出, 实测中 EPS 支架的双面干涉效应仍明显存在, 尤其在中心频点附近; 构型④峰值频率间隔在 46~

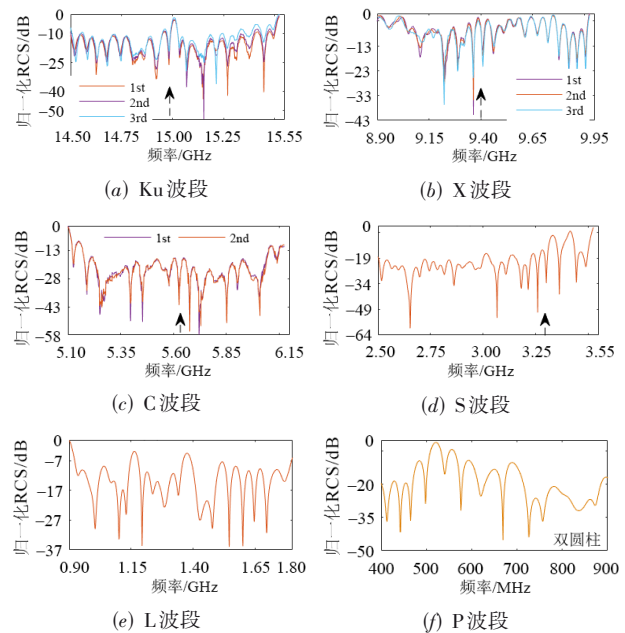


图12 EPS 支架扫频特性外场实测结果
注:(a)-(e) 为双菱形锥柱, (f) 为双圆柱

49 MHz 范围,双圆柱 $\Delta f \approx 50$ MHz,均与理论结果较为接近. 由于测试系统为地平场结构,天线高度按照中心频点设置,故系统性能在中心频点最稳定、有效. 另外,由于吸波墙的存在,尽管采用了时域滤波处理,仍不可避免残留散射杂波. 同时,高频段波长短、分辨率高,吸波墙与支架的耦合效应较弱;而低频段波长较长,吸波墙与支架的耦合变得严重,且无法通过滤波消除,故低频实测结果有一定的起伏、偏差. 边缘频点性能不理想、残存的吸波墙散射、耦合效应杂波等因素造成室外场结果与理论仿真结果有所差别,但扫频实验结果仍能看出 EPS 支架双面干涉规律,说明了其在外场试验中的应用价值.

依据步进频数据与高分辨率一维距离像的傅里叶变换对关系,见式(3),基于上述双菱形锥柱构型④⑤⑥的宽带扫频仿真数据,采用逆傅里叶变换重构目标构型一维像. 每个菱形支柱从头向看去有 3 个散射位置,对应关系如图 13 所示. 根据距离分辨率公式 $\delta = c/2B$,扫频带宽越大,分辨率越高,构型④⑥仿真带宽为 1 GHz,构型⑤仿真带宽 0.5 GHz. 经统计,构型④半长轴(P2-P1/P3, P5-P4/P6)与实际设置物理长度相比的平均误差为 4.7 cm,构型⑤平均误差为 10.08 cm,构型⑥半短轴平均误差为 5.85 cm,其中构型⑤扫频带宽是另外两型的一半,其一维像相对误差也是最大的,与理论公式相符. 对比发现,延长中心间距的散射中心幅值有所下降,从头向观测,短轴共线方式幅值最高,均与上文结果相符.

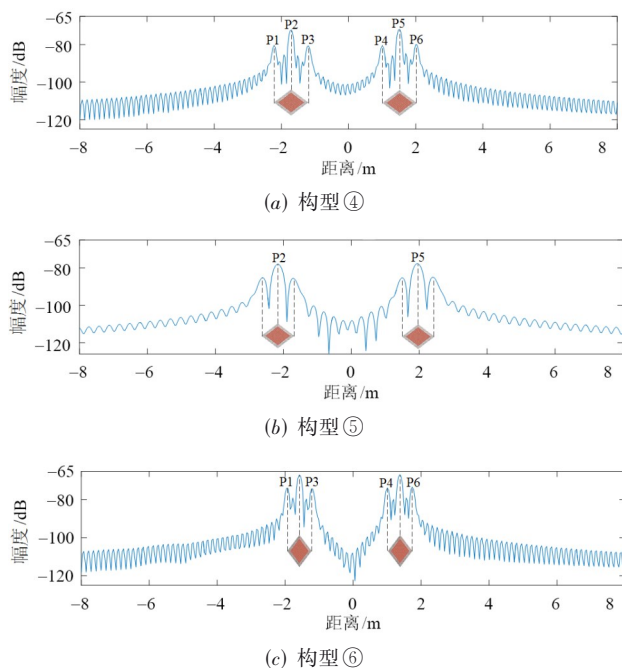


图 13 EPS 双菱形锥柱一维距离像

5 总结与展望

本文将基于 FEKO 介质空间实体建模的电磁仿真与基于地平场测试系统的雷达实测相结合,将点频与扫频、单站与双站、频域与时域等研究手段相结合,对 RCS 测量中常用的 EPS 泡沫支架电磁散射特性进行较深入研究,定量分析了不同仿真方法、极化方式、构型方式及频谱波段等方面的仿测结果. 研究表明:

(1) 菱形锥柱构型是一种具有良好背景优势的简单 EPS 支架构型,适用于典型空中隐身目标,不仅在单站后向散射测试中优势明显,在双站散射测试场景也极具应用前景. 双菱形锥柱长轴共线构型可提供较好的单站头向背景和头向入射的双站背景,短轴共线构型可提供较好的单站侧向背景和侧向入射的双站背景,二者结合的角度分段应用可保障高隐身目标的全方位保精度测试背景.

(2) EPS 泡沫支架单站散射的 RCS 对极化特性不敏感,交叉极化分量极小,可用于满足极化散射矩阵测试需求;而在双基地区, EPS 支架不同极化的双站散射特性呈现明显区别,水平极化 RCS 普遍低于垂直极化的情况.

(3) 仿真与实测表明, EPS 支架频域特性呈现双面干涉特性,相邻干涉峰频率间隔与支架尺寸、位置满足一定关系,通过调整参数配置,可设计关心频点处于低散射谷值,优化低散射背景.

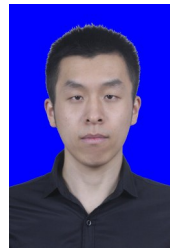
下一步将进一步研究 EPS 谷值频率配置的有效算法以及更复杂支架构型的散射背景特性.

参考文献

- [1] 高晓光, 万开方, 李波, 等. 基于 PPSO-MPC 的多雷达协同反隐身指示搜索任务规划[J]. 电子学报, 2015, 43(9): 1673-1681.
GAO X G, WAN K F, LI B, et al. Mission planning for cued search of cooperative anti-stealth detection based on PPSO-MPC[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(9): 1673-1681. (in Chinese)
- [2] 刘珂, 王炜强, 李丽娟. 红外成像制导技术在反隐身空空导弹上的应用展望[J]. 航空兵器, 2022, 29(2): 60-65.
LIU K, WANG W Q, LI L J. Application and prospect of infrared imaging guidance technology in anti-stealth air-to-air missiles[J]. Aero Weaponry, 2022, 29(2): 60-65. (in Chinese)
- [3] 刘天金, 许小剑. RCS 测量中目标与金属支架间的耦合散射研究[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(10): 2756-2765, 2692.
LIU T J, XU X J. Research on interactions between target

- and metal pylon in RCS measurement[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(10): 2756-2765, 2692. (in Chinese)
- [4] 许小剑. 雷达目标散射特性测量与处理新技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
XU X J. *New Techniques for Radar Target Scattering Signature Measurement and Processing*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017. (in Chinese)
- [5] 原赛赛, 梁丽雅, 许小剑. 时变环境下 RCS 测量中的精确背景抵消处理技术[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44(10): 2193-2199.
YUAN S S, LIANG L Y, XU X J. Exact background subtraction processing technique in RCS measurement in time-variant environment[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(10): 2193-2199. (in Chinese)
- [6] 刘琳. 紧缩场目标支撑系统及背景对消方法的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.
LIU L. *Target Support System and Background Subtraction Research in Compact Antenna Test Range*[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [7] WANG Y, YAO S L, WANG Y F, et al. Analysis of Influence of the foam supports to the low RCS targets measures [J]. *Procedia Computer Science*, 2019, 147: 67-70.
- [8] BERRIE J A, WILSON G L. Design of target support columns using EPS foam[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2003, 45(1): 198-206.
- [9] 刘琳, 全绍辉. 4-8 GHz EPS 泡沫支架散射的测量仿真和特征分析[J]. *电波科学学报*, 2011, 26(增刊): 97-100.
LIU L, QUAN S H. Measurement simulation and characteristic analysis of EPS foam support scattering at 4-8 GHz [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2011, 26(supplement): 97-100. (in Chinese)
- [10] 许鼎, 李志平, 赵京城. 重载低散射泡沫支架系统研究 [C]//2013 年全国微波毫米波会议论文集. 重庆: 中国电子学会微波分会, 2013: 1541-1544.
XU D, LI Z P, ZHAO J C. Research on low RCS foam heavy target support system[C]//*Proceedings of the 2013 National Microwave and Millimeter Wave Conference*. Chongqing: Microwave Branch of the Chinese Electronics Society, 2013: 1541-1544. (in Chinese)
- [11] 龙国宁, 杜作娟, 黄小忠, 等. 泡沫吸波材料雷达隐身性能仿真方法研究[J]. *电子元件与材料*, 2015, 34(9): 78-82.
LONG G N, DU Z J, HUANG X Z, et al. Simulation method of foam sandwich absorbing material radar stealth property[J]. *Electronic Components and Materials*, 2015, 34(9): 78-82. (in Chinese)
- [12] 唐晓明, 李恩, 李华军, 等. 利用 FEKO 对塑料目标支架 RCS 的仿真研究[J]. *微波学报*, 2010, 26(S1): 48-50.
TANG X M, LI E, LI H J, et al. Simulation of the plastic target supports RCS used FEKO[J]. *Journal of Microwaves*, 2010, 26(S1): 48-50. (in Chinese)
- [13] 周祝林. 泡沫塑料性能及应用[J]. *机械工程材料*, 1981, 5(6): 50-53.
ZHOU Z L. Properties and application of foam plastics [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 1981, 5(6): 50-53. (in Chinese)
- [14] 张雄, 周永江, 黄丽华. 机载龙伯透镜天线用聚苯乙烯泡沫塑料的制备及介电常数调控[J]. *材料导报*, 2017, 31(10): 96-100.
ZHANG X, ZHOU Y J, HUANG L H. Preparation and dielectric properties of polystyrene foam material used for Luneburg lens antenna[J]. *Materials Review*, 2017, 31(10): 96-100. (in Chinese)

作者简介



焦海松 男, 1990 年生, 河北保定人. 2018 年毕业于陆军工程大学, 获电磁场与微波技术专业博士学位. 解放军 95841 部队工程师. 主要研究方向为雷达目标散射特性、量子信息科学.
E-mail: jiaohaisong_1990@163.com



刘宗信(通讯作者) 男, 1984 年出生, 甘肃平凉人. 2013 年毕业于解放军理工大学, 获电磁场与微波技术专业博士学位. 解放军 95841 部队高级工程师. 主要研究方向为雷达目标散射特性、目标红外辐射特性.
E-mail: liuzongxin19840717@163.com