

·测试、试验与仿真·

## 一种对毫米波的Mie散射测试与研究

张紫浩<sup>1</sup>, 刘强虎<sup>1</sup>, 闵江<sup>2</sup>

(1. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201; 2. 东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

**摘要:** 研究了一种通过立体编织和金属化纤维掺杂获得的三维立体布面结构, 对其在3 mm和8 mm波段的毫米波衰减性能进行测试研究, 并根据电磁波Mie散射和吸收理论进行分析。实验结果表明, 这种立体布面结构通过散射和吸收的双重作用, 可有效衰减毫米波回波信号, 并且其衰减特性符合电磁波Mie散射和吸收理论。

**关键词:** 毫米波; Mie散射; 吸收; 衰减

中图分类号: O441.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-03-0061-03

## Test and Research on Mie Scattering in Millimeter Wave

ZHANG Zi-hao<sup>1</sup>, LIU Qiang-hu<sup>1</sup>, MIN Jiang<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Electro-optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China;  
2. Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China)

**Abstract:** A three-dimensional fabric structure attained by three-dimensional fabricating and metalized fiber doping is researched. Its millimeter attenuation characteristics in 3 mm and 8 mm are tested and researched. And the characteristics are analyzed according to Mie scattering in electromagnetic wave and absorption theory. Experimental results show that echo signals in millimeter wave can be attenuated effectively by double actions of scattering and absorbing from the three-dimensional fabric structure. And the attenuation characteristics are in accordance with Mie scattering in electromagnetic wave and absorption theory.

**Key words:** millimeter wave; Mie scattering; absorb; attenuation

粒子对电磁波的散射主要包括Mie散射、瑞利散射、拉曼散射等, 其中Mie散射是散射作用的主要表现<sup>[1]</sup>, 其特点是散射粒子的尺寸与入射光波长相近或比入射光波长更大。采用立体编织和金属化纤维掺杂技术, 获得具有金属性的立体布面结构, 由于布面具有一定导电性和三维立体形状, 且立体起伏度尺寸与毫米波波长相近, 在入射毫米波的作用下发生Mie散射, 通过散射和吸收的双重作用, 表现出了对毫米波较强的衰减特性。由于毫米波系统大多工作在3 mm和8 mm两个波段, 因此, 本研究利用毫米波测试系统, 对几种立体布面结构在3 mm和8 mm波段的衰减特性进行了测试和研究。

### 1 Mie散射理论

Mie散射的特点是散射粒子的尺寸与入射光波长相近或比入射光波长更大, Mie散射的散射光波长和入射光相同, 散射过程中没有光能量的交换, 称为弹性散射, Mie散射与许多因素有关, 如散射粒子的尺寸、形状、组成等。Mie散射理论<sup>[2-3]</sup>是麦克斯韦方程对处在均匀介质中的均匀颗粒在平面单色波照射下的严格数学解, 由Mie散射可知, 距离散射体 $r$ 处 $p$ 点的散射光强为

$$I_{sc a} = I_0 g \frac{\lambda^2}{8\pi^2 r^2} gI(\theta, \phi) \quad (1)$$

$$I(\theta, \phi) = |S_1(\theta)|^2 \sin^2 \phi + |S_2(\theta)|^2 \cos^2 \phi \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为光波波长;  $I_0$  为入射光强;  $I_{\text{scat}}$  为散射光强;  $\theta$  为散射角;  $\phi$  为偏振光的偏振角。

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n + b_n \tau_n] \quad (3)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n + b_n \pi_n] \quad (4)$$

式中,  $S_1(\theta)$  和  $S_2(\theta)$  是振幅函数;  $a_n$  和  $b_n$  是与贝塞尔函数和汉克尔函数有关的函数;  $\pi_n$  和  $\tau_n$  是连带勒让得函数的函数, 仅与散射角  $\theta$  有关, 其中

$$a_n = \frac{\phi_n(\alpha) \phi'_n(m\alpha) - m \phi'_n(\alpha) \phi_n(m\alpha)}{\epsilon_n(\alpha) \phi'_n(m\alpha) - m \epsilon'_n(\alpha) \phi_n(m\alpha)} \quad (5)$$

$$b_n = \frac{m \phi_n(\alpha) \phi'_n(m\alpha) - \phi'_n(\alpha) \phi_n(m\alpha)}{m \epsilon_n(\alpha) \phi'_n(m\alpha) - \epsilon'_n(\alpha) \phi_n(m\alpha)} \quad (6)$$

式中,  $\phi_n(\alpha)$  和  $\epsilon_n(\alpha)$  分别是贝塞尔函数和第一类汉克尔函数;  $\phi'_n(m\alpha)$  和  $\epsilon'_n(m\alpha)$  是  $\phi_n(\alpha)$  和  $\epsilon_n(\alpha)$  的导数;  $\alpha$  为无因子直径,  $\alpha = \frac{\pi D}{\lambda}$ ,  $D$  为颗粒的实际直径;  $\lambda$  是入射波的波长;  $m$  是散射颗粒相对于周围介质的折射率, 它是一个复数, 实部代表了粒子对光的散射, 而虚部是粒子对光的吸收的量化。

根据电磁波 Mie 散射理论, 对毫米波信号的衰减是散射和吸收双重作用的结果。就散射而言, 在散射角等于  $180^\circ$  时的后向散射光是毫米波雷达的回波信号主要组成, 由 Mie 散射理论可知, 当粒子尺寸较小时, Mie 散射在散射角等于  $180^\circ$  时的后向散射较大, 随着粒子尺寸的增大, Mie 散射的后向散射会减少, 但粒子尺寸存在一临界值, 当超出这一临界值时, 后向散射会存在一个散射峰值, 随着粒子尺寸的继续增大, 后向散射效率会在散射峰值内发生周期性的变化, 这种周期性的变化是与粒子的无因子直径  $\alpha$  密切相关的, 即粒子的实际直径和入射波的波长共同决定了这种周期性散射变化的周期和振幅。

Mie 散射理论的虚部代表了粒子对电磁波还存在吸收作用, 吸收是物体在入射光的照射下, 当入射光的波长与物体中原子、分子的基态与某个激发态之间的能量差相等时, 该原子、分子会对入射光产生明显吸收的现象<sup>[4]</sup>。参与吸收过程的原子、分子数目越多, 吸收损失越大。同时, 粒子在吸收入射光能量后, 会通过二次辐射发散出去, 而这也是会被雷达接收的回波信号。

文中研究的立体布面具有一定的导电性, 表面凹凸不平的立体泡结构相当于在表面存在着大量对

毫米波具有散射特性的散射粒子, 当立体泡起伏度与毫米波波长相近时, 对入射毫米波的散射主要是 Mie 散射。根据电磁波 Mie 散射理论, 散射粒子尺寸是影响毫米波散射的主要因素, 而布面中掺杂的金属化纤维则是影响其吸收作用的重要因素之一。

## 2 实验与讨论

### 2.1 实验原理与方法

经典雷达方程表述了目标散射回波与雷达发射电磁波的功率和频率、天线增益、测试距离、接收机的灵敏度、路径损耗等的关系。经典雷达方程式为<sup>[5]</sup>

$$P_r = \frac{P_0 G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (7)$$

式中,  $P_r$  为接收机接收功率;  $P_0$  为雷达发射功率;  $G_t$  为发射天线增益;  $G_r$  为接收天线增益;  $\lambda$  为发射电磁波波长;  $\sigma$  为目标雷达散射截面;  $R$  为目标到天线的距离。由此可见, 在同等条件下, 目标的雷达散射截面是影响接收机接收功率的重要因素, 目标的雷达散射截面由式(7)变换可得

$$\sigma = \frac{(4\pi)^3 R^4 P_r}{P_0 G_t G_r \lambda^2} \quad (8)$$

本测试采用功率比较法, 即在相同的测试条件下, 分别测量定标体和目标的回波功率  $P_r$ , 两次测试中的  $P_0$ 、 $G_t$ 、 $G_r$ 、 $\lambda$ 、 $R$  均相同。由式(8)可见, 在此条件下, 定标体和目标的雷达散射截面有下式比例关系

$$\sigma_t = \frac{P_{rt}}{P_{rs}} \sigma_s \quad (9)$$

式中,  $\sigma_t$  为目标雷达散射截面;  $\sigma_s$  为定标体雷达散射截面;  $P_{rt}$  为目标回波功率;  $P_{rs}$  为定标体回波功率。其中定标体的  $\sigma_s$  是理论计算值, 因此通过测量得到定标体和目标的回波功率, 即可计算出目标的雷达散射截面  $\sigma_t$ 。

研究利用 HP85301B RCS 测试系统对样品的毫米波衰减性能进行了测试, 定标体为  $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$  的金属板, 样品尺寸为  $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ , 测试时置于金属板前, 对被测样品的四种状态在  $8 \text{ mm}$ 、 $3 \text{ mm}$  频段内进行吸收性能测试, 多次测量后取平均值。

### 2.2 立体泡起伏度的影响

研究对四种立体泡起伏度尺寸次第增大的样品进行毫米波衰减性能测试, 测试结果如图 1 所示。由

测试结果可以看出,不同的立体泡起伏度对毫米波的衰减性能不同,在所选立体泡起伏度范围内,对3 mm、8 mm 衰减均存在一最大值,且两个波段的最佳值略有偏差。在3 mm波段,当立体泡起伏度较小时,后向散射较大,回波信号较强,随着立体泡起伏度的增大,后向散射光减小,并出现两个相近的最大衰减

(样品1和样品3),这是符合电磁波Mie散射理论中后向散射强度周期变化规律的;而在8 mm波段,随着立体泡起伏度的增大,后向散射光减小,达到一个衰减峰值后,回波信号增强,衰减性能降低,仅出现一个衰减峰值(样品3)表面Mie散射的这一临界值和变化周期是与入射光波长密切相关的。

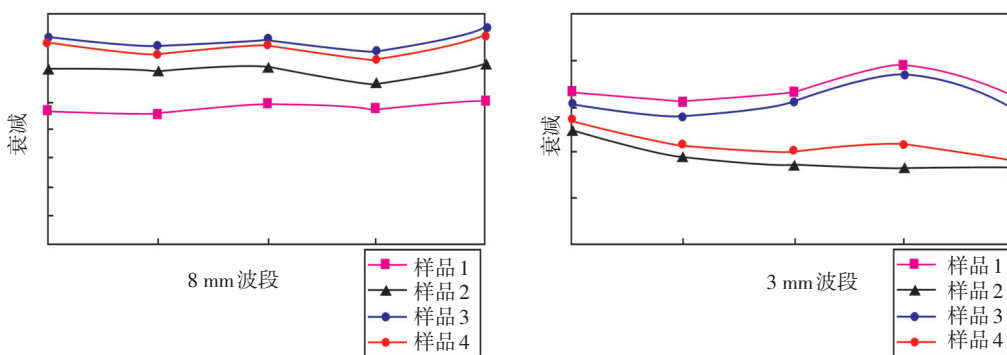


图1 不同立体泡起伏度的样品在8 mm和3 mm波段的衰减性能

### 2.3 金属化纤维密度的影响

研究对3种金属化纤维密度次第增加的样品进行毫米波衰减性能测试,测试结果如图2所示。由测试结果可以看出,随着金属化纤维密度的增加,样品在3 mm和8 mm波段的衰减性能也随之增加,这是符合电磁波吸收机理的,金属化纤维密度增加,参与吸

收过程的原子、分子数目越多,吸收也越大,而且由于其具有一定的导电性,因此吸收的一部分能量转化为感应电流,并通过热能的形式损耗掉,进一步增强了衰减。同时,根据电磁波吸收理论,当金属化纤维密度增大到一定程度时,其吸收的能量增大,二次辐射也随之增强,反而会增大毫米波的回波信号,影响其衰减效果。

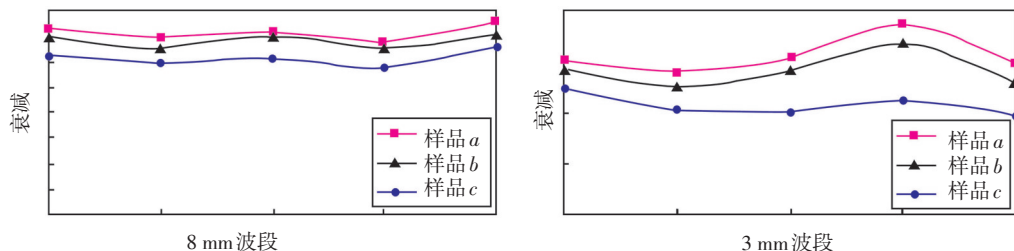


图2 不同金属化纤维密度的样品在8 mm和3 mm波段的衰减性能

由实验结果还可看出,改变立体泡起伏度对其毫米波衰减性能影响较大,而调整金属化纤维密度对其毫米波衰减性能影响则相对较小,表明这种立体布面结构对毫米波的Mie散射衰减作用是仍以散射为主导,而吸收则处于次要地位。

### 3 结论

研究了一种通过立体编织和金属化纤维混编实

现的三维立体布面,并通过电磁波Mie散射理论分析,立体泡起伏度和金属化纤维密度是影响其Mie散射特性的重要因素。实验结果表明,这种立体布面可有效降低目标的毫米波回波信号,并符合电磁波的Mie散射理论。根据电磁波Mie散射和吸收理论对立体泡起伏度和金属化纤维密度进行优化设计,可显著提高对毫米波的衰减。

(下转第72页)

## 参考文献

- [1] 李贵山,戚德虎. PCI局部总线开发指南[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1997.
- [2] 武安河. Windows2000/XP WDM 设备驱动程序开发[M]. 第2版,北京:电子工业出版社,2005.
- [3] Charles PetZold. Windows 程序设计[M]. 5版. 方敏,张胜,梁路平,等. 北京:清华大学出版社,2010.
- [4] 梁建武. Visual C++ 程序设计教程[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [5] 李俊山,李旭. 数字图像处理[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [6] Beveridge J, Wiener R. Win32 多线程程序设计[M]. 侯捷. 武汉:华中科技大学出版社,2006.
- [7] 侯伯亨,顾新. VHDL 硬件描述语言与数字逻辑电路设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2004.
- [8] PCI9054 DataBook V2.1 H.X Technology.Inc. 2000.
- [9] 郭杰,王国有,张天序. PCI9054本地总线控制器可编程逻辑技术[J]. 计算机仿真,2003,20(9):74-76.

(上接第63页)

## 参考文献

- [1] 陈静. 雷达箔条干扰原理[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [2] 项建胜,何俊华. Mie 光散射理论的数值计算方法[J]. 应用光学,2007,28(3):363-366.
- [3] 杨晔,张镇西,蒋大宗. Mie 散射物理量的数值计算[J]. 应用光学,1997,18(4):17-19.
- [4] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [5] 林象平. 雷达对抗原理[M]. 西安:西北电信工程学院出版社,1985.
- [6] 吕久明,罗景青. 毫米波技术性能分析及其无源干扰方法研究[J]. 红外技术,2005,27(4):291-294.
- [7] 同武勤,凌永顺,张鑫. 毫米波无源对抗技术浅析[J]. 光电技术应用,2004,19(3):49-52.
- [8] 任丽娜,曲延滨. 毫米波与红外技术在军事领域中的应用[J]. 红外技术,2004,26(3):66-70.
- [9] 朱震,叶茂,陆勇,等. 光散射粒度测量中Mie理论的高精度算法[J]. 光电子·激光,1999,10(2):135-138.
- [10] 戴征坚,郁文贤. 空间目标的雷达识别技术[J]. 系统工程与电子技术,2002,22(3):19-22.
- [11] 张攀雄,舒玉胜. 现代侦查与伪装[M]. 辽宁:星球地图出版社,2008.
- [12] 吕进,黄拥元,胡江华. 高技术侦察监视与伪装[M]. 北京:解放军出版社,2002.

## 版权声明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中文科技期刊数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国学术期刊综合评价数据库》、美国《乌利希期刊指南》、波兰《哥白尼索引》收录期刊,加入了中国光学期刊网,建立了《光电技术应用》期刊网站,所刊载的文章在国内外数据库检索机构及网站(包括纸版、光盘版、网络版)报道时,不再征求作者意见。稿件刊登录用后作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给,并赠送当期样刊两份。