

一种基于镀镍碳纤维材料的宽频段高适应性伪装产品性能研究

郇峰*, 韩琴, 王富强, 郭文卿

中国电子科技集团公司第三十三研究所, 山西 太原

收稿日期: 2022年10月17日; 录用日期: 2022年11月19日; 发布日期: 2022年11月28日

摘要

随着现代侦察监视技术快速发展, 沿海部署的固定军事设施安全保密环境日趋复杂, 目前的伪装产品一般都是采用聚酯纤维混杂金属纤维, 但是环境适应性较差, 且低频伪装性能较低。基于上述问题本文研制了一种基于镀镍碳纤维材料的宽频段高适应性伪装产品。通过仿真设计、样品制作、实验测试, 证明了该产品在满足雷达伪装性能的同时, 能大幅度提升环境适应性, 满足军事使用要求。

关键词

雷达伪装, 复合材料, 镀镍碳纤维, 高适应性

Research on the Performance of a High Adaptability Camouflage Product Based on Nickel-Coated Carbon Fiber

Feng Huan*, Qin Han, Fuqiang Wang, Wenqing Guo

The 33rd Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan Shanxi

Received: Oct. 17th, 2022; accepted: Nov. 19th, 2022; published: Nov. 28th, 2022

Abstract

With the rapid development of modern reconnaissance and surveillance technology, the security and secrecy environment of fixed military facilities deployed in coastal areas is increasingly complex. Currently, camouflage products generally use polyester fiber mixed with metal fiber, but the

*通讯作者。

文章引用: 郇峰, 韩琴, 王富强, 郭文卿. 一种基于镀镍碳纤维材料的宽频段高适应性伪装产品性能研究[J]. 材料科学, 2022, 12(11): 1173-1183. DOI: 10.12677/ms.2022.1211130

environmental adaptability is poor, and the low-frequency camouflage performance is low. In this paper, a kind of camouflage product with high adaptability based on nickel-coated carbon fiber material is developed. Through simulation design, sample production and experimental test, it is proved that the product not only meets the radar camouflage performance, but also greatly improves the environmental adaptability performance and meets the requirements of military use.

Keywords

Radar Camouflage, Composite Material, Nickel-Plated Carbon Fiber, High Adaptability

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

俄乌冲突爆发，国际形势日益复杂，境外敌对势力对我国窃密侦察愈加频繁，同时，近年来远程侦察技术的快速发展，尤其是合成孔径雷达的高速发展，对我军军事设施，尤其是沿海固定军事设施的安全保密环境带来极大威胁[1]。针对探测技术发展的伪装防护手段已无法满足要求，尤其是在对抗 L 波段的侦察探测方面。针对上述情况，要做好沿海军事设施安全保密防护工作，仅仅通过限制地区开放、扩大保护区域和境外人员活动等传统模式，已经无法满足现阶段要求，应通过技术措施，提升伪装技术的性能指标，具备对抗宽波段雷达侦察探测的能力，尤其是 L 波段，防止军事设施相关敏感信息泄漏，切实增强沿海军事设施的安全防护能力[2]。

现阶段，随着合成孔径雷达的广泛应用，雷达侦察是对固定军事设施安全威胁最大的一种手段。合成孔径雷达侦察频段宽，且具备精确远距离探测能力，提升军事设施的抗雷达侦察能力需求迫切[3]。同时，沿海环境恶劣，高温、高湿、高含盐量、强风、暴雨、强烈阳光辐射条件相互作用，严重影响伪装产品的使用寿命[4]。现有市面上的伪装网均采用聚酯材料，并掺杂金属纤维来实现抗雷达探测功能。其基材及金属纤维材料的局限性造成伪装网最多一年时间就会出现风化现象，频繁更换带来保密隐患[5]。

针对上述问题，本项目利用复合材料的高环境适应性能，解决其环境适应性的痛点问题，同时采用镀镍碳纤维材料，通过仿真设计，研究一种具备高环境适应性宽波段雷达伪装性能的伪装产品。

2. 雷达伪装原理

雷达伪装是通过改变伪装目标表面电磁波反射性能来实现的，即通过将伪装目标表面原有的电磁波反射进行变化，以达到伪装目标返回的电磁波失去其原有特征的效果[6]，使雷达对识别出的目标产生误判，使伪装目标具备抗雷达探测的效果，其伪装的效果可通过 RCS 公式进行计算，伪装体的 RCS 特征取决于伪装体的外形尺寸、表面结构、雷达的频率波长、以及探测方位角、极化等。通常，可将伪装体认作由多个散射体(面)构成的一个集合，其计算公式如下[7]：

$$\sigma = \left| (\sigma_1)^{1/2} e^{j(4\pi d_1/\lambda)} + (\sigma_2)^{1/2} e^{j(4\pi d_2/\lambda)} + \dots + (\sigma_n)^{1/2} e^{j(4\pi d_n/\lambda)} \right|^2 \quad (1)$$

式中： σ_n ——第 n 个散射体的 RCS，

d_n ——第 n 个散射体相对探测雷达的距离，

$4\pi d_n/\lambda$ ——第 n 个散射体的相位因子。

根据上述公式可以看出，如果伪装体表面的散射体数量越多、其相位因子差异越大，由散射体产生的 RCS 回波也会因为不同的方向、以及不同的相位等而产生相互削弱的情况，从而造成整个伪装体 RCS 回波衰减，最终导致伪装体雷达回波出现失真。即伪装体表面的散射体数量越多、其相位因子差异越大，其造成的 RCS 回波衰减越多，雷达伪装性能越好。

3. 雷达伪装仿真设计

基于上述雷达伪装原理，提出基于仿生结构的草型雷达伪装网结构[8]。在伪装网的表面，均匀分布镀镍碳纤维，来实现多个散射体结构。其设计初步结构如图 1 所示：

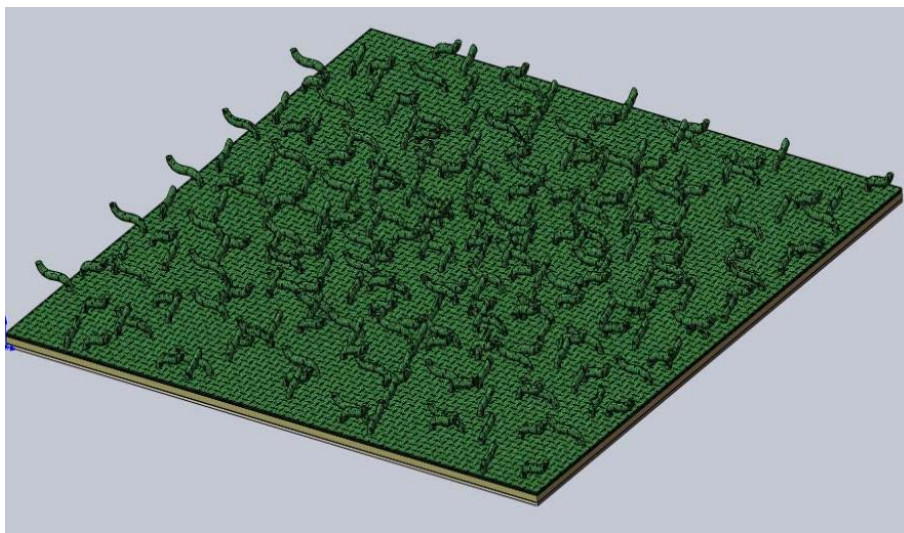


Figure 1. Camouflage product design structure
图 1. 伪装产品设计结构

其结构 RCS 散射原理如图 2 所示：

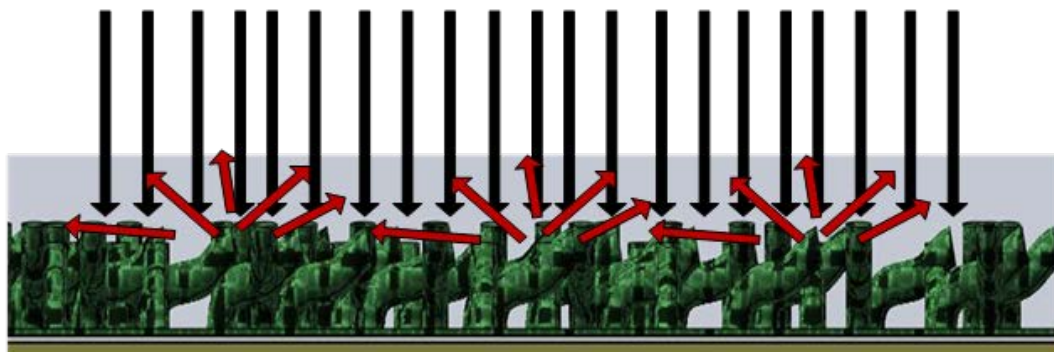


Figure 2. Radar RCS scattering principle
图 2. 雷达 RCS 散射原理

同时，基于雷达伪装原理，综合考虑各种因素对伪装性能的影响，针对镀镍碳纤维的电导率、磁导率、分布、长度分别进行仿真设计[9] [10]。

首先进行伪装产品的仿真模型构建工作。模型构建主要包括单束仿生结构伪装产品的模型构建，以及其各类分布仿真模型的构建，如图 3 所示：

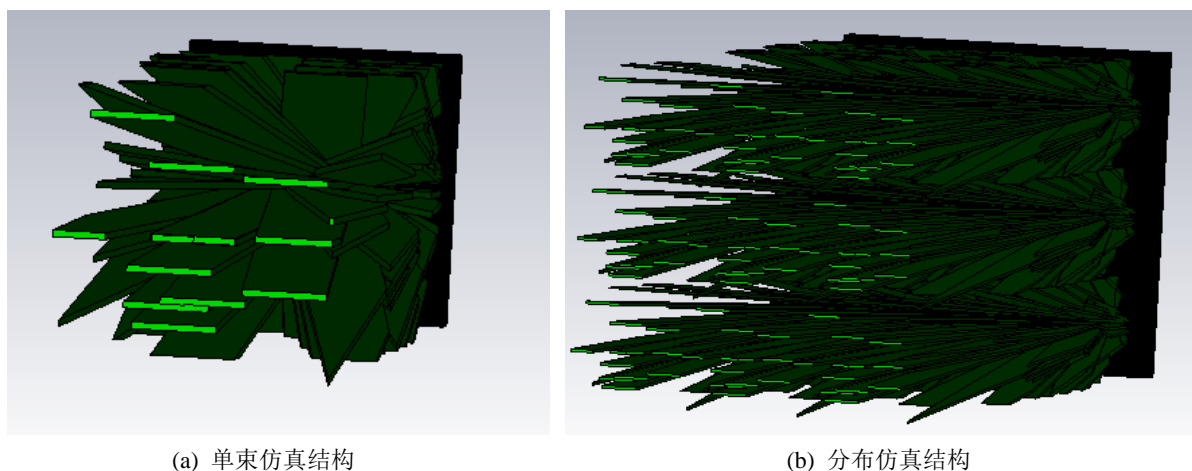


Figure 3. Simulation structure diagram
图 3. 仿真结构图

针对伪装产品的电导率对其伪装性能的影响，进行仿真计算。当电导率为 2500 时，其仿真结果如图 4 所示：

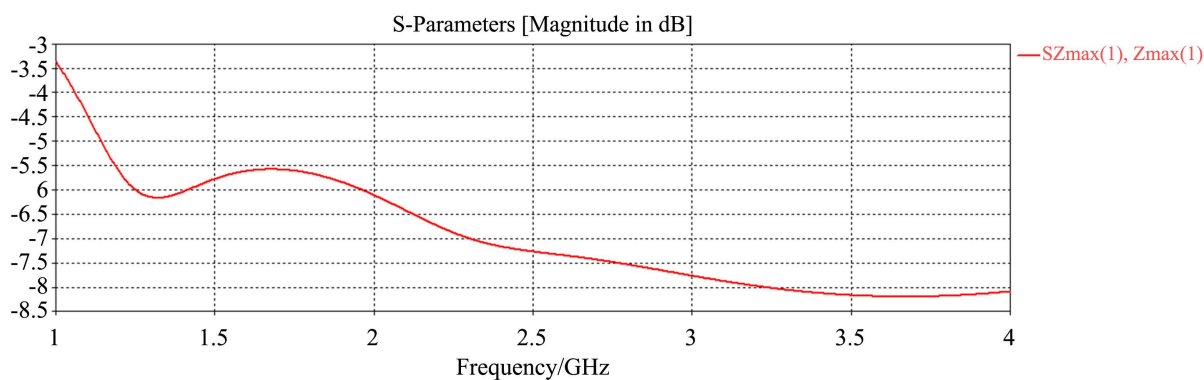


Figure 4. Electrical conductivity 2500 simulation curve
图 4. 电导率 2500 仿真曲线

当电导率为 5000 时，其仿真结果如图 5 所示：

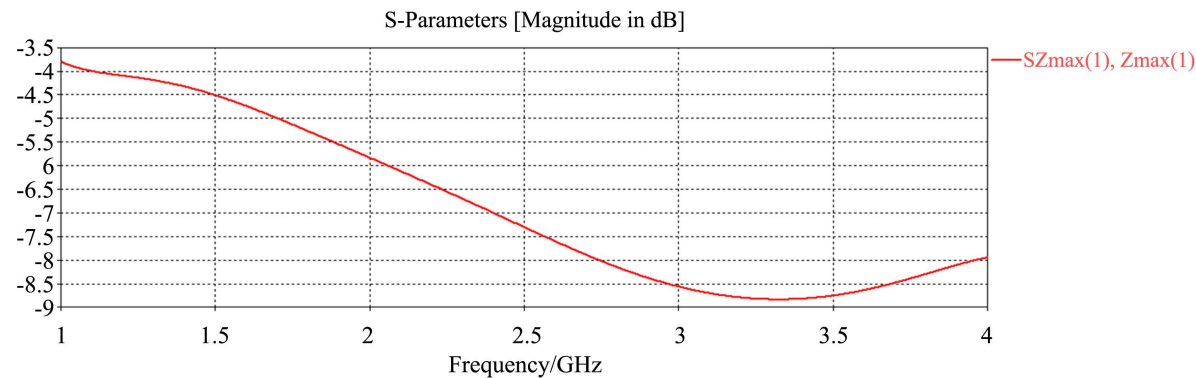


Figure 5. Electrical conductivity 5000 simulation curve
图 5. 电导率 5000 仿真曲线

如上图所示，当伪装材料的电导率分别是 2500 和 5000 时，低频反射衰减相差较少，证明电导率对其低频反射衰减影响较小。

针对伪装产品的磁导率对其伪装性能的影响，进行仿真计算，仿真结果如图 6、图 7 所示：
当磁导率为 2 时，其仿真结果如图 6 所示：

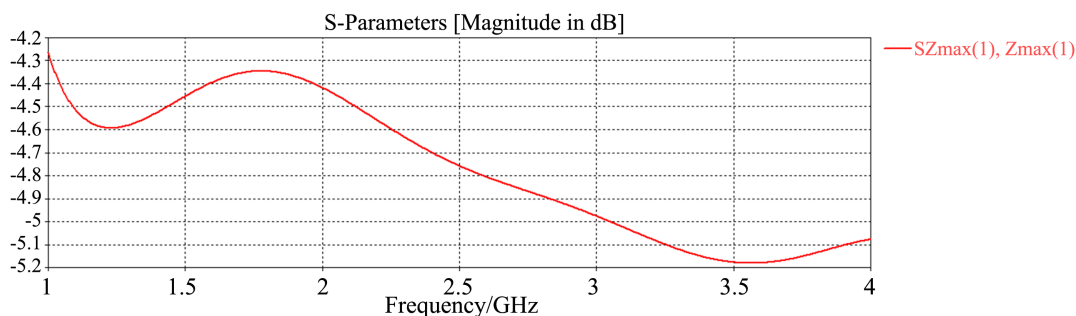


Figure 6. Permeability 2 simulation curve
图 6. 磁导率 2 仿真曲线

当磁导率为 15 时，其仿真结果如图 7 所示：

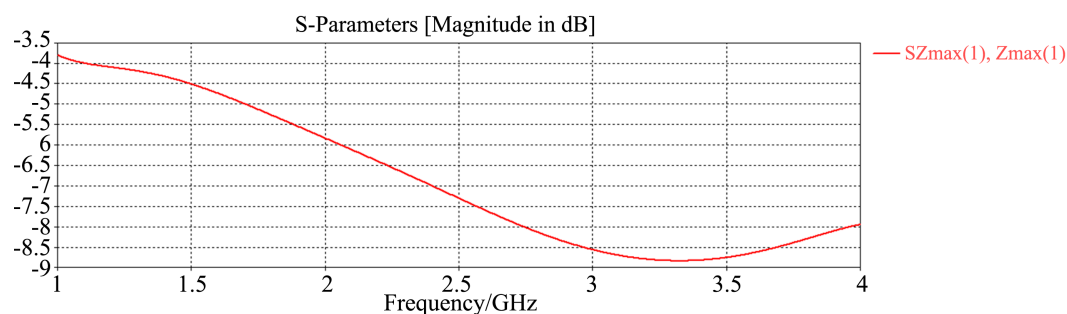


Figure 7. Permeability 15 simulation curve
图 7. 磁导率 15 仿真曲线

如图 6、图 7 所示，当伪装材料的磁导率分别是 2 和 15 时，低频反射衰减相差较大，证明磁导率对其低频反射衰减影响较大，即磁导率越大，其反射衰减性能越好。

针对伪装产品的丝束分布对其伪装性能的影响，进行仿真计算。

当丝束长宽分别为 5×5 mm 时，每平方厘米可分布 4 根丝束，其仿真结果如图 8 所示：

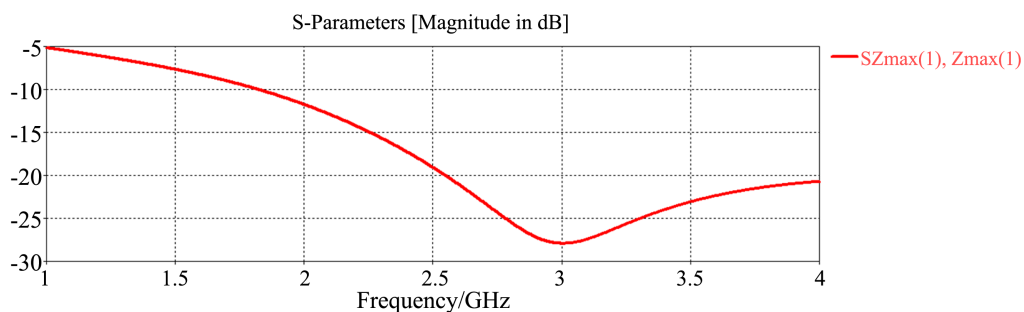


Figure 8. Wire bundle 5×5 mm simulation curve (4 wire bundles)
图 8. 丝束 5×5 mm 仿真曲线(4 根丝束)

当丝束长宽分别为 3×3 mm 时，每平方厘米可分布 9 根丝束，其仿真结果如图 9 所示：

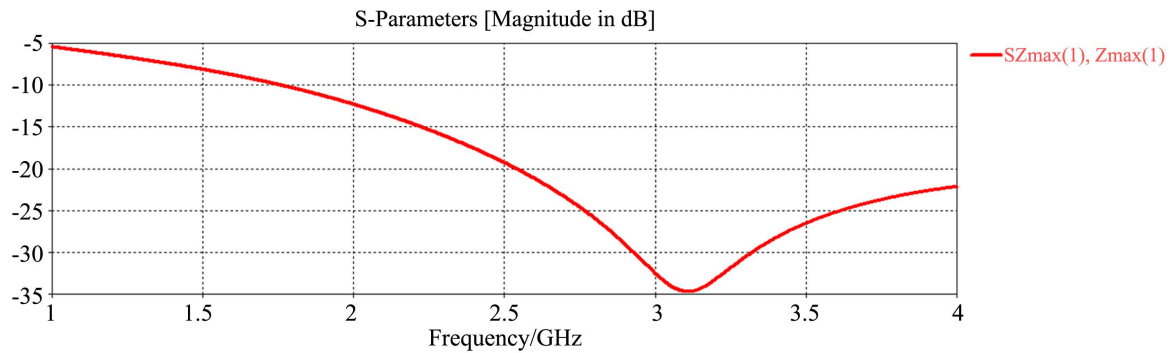


Figure 9. Wire bundle 3×3 mm simulation curve (9 wire bundles)

图 9. 丝束 3×3 mm 仿真曲线(9 根丝束)

如图 9 所示，当单位面积丝束分布对其发射衰减性能影响较大，即其分布越均匀，其反射衰减性能越好。

针对伪装产品的丝束长度对其伪装性能的影响，进行仿真计算。

当丝束长度为 10 mm 时，其仿真结果如图 10 所示：

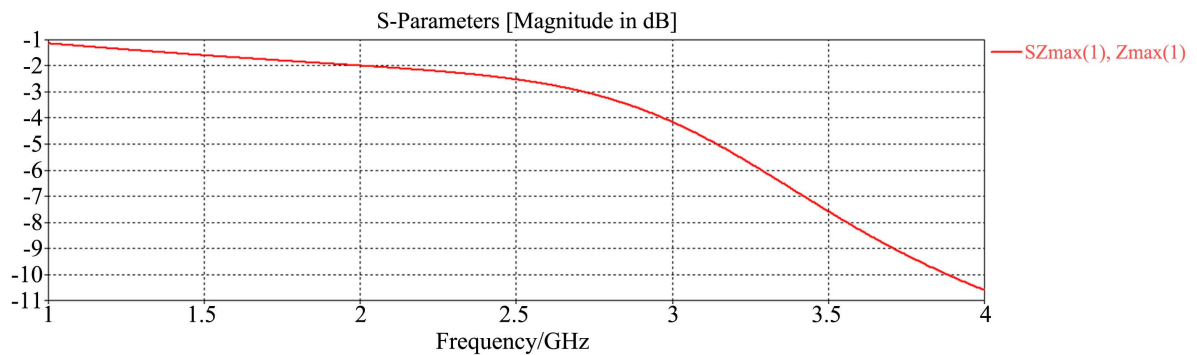


Figure 10. Wire bundle length 10 mm simulation curve

图 10. 丝束长度 10 mm 仿真曲线

当丝束长度为 50 mm 时，其仿真结果如图 11 所示：

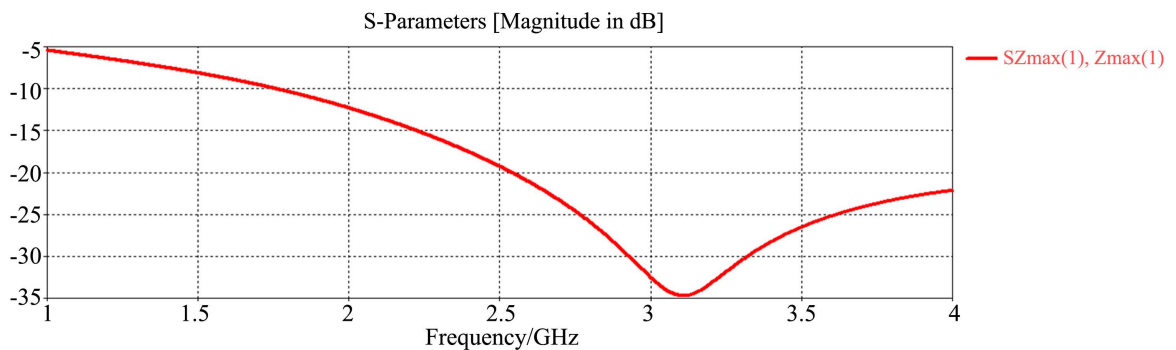


Figure 11. Wire bundle length 50 mm simulation curve

图 11. 丝束长度 50 mm 仿真曲线

当丝束长度为 70 mm 时，其仿真结果如图 12 所示：

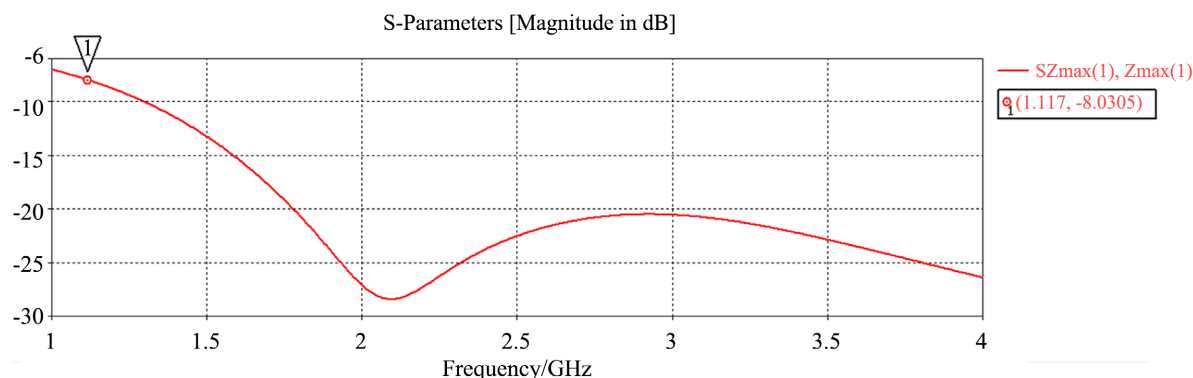


Figure 12. Wire bundle length 70 mm simulation curve

图 12. 丝束长度 70 mm 仿真曲线

当丝束长度为 80 mm 时，其仿真结果如图 13 所示：

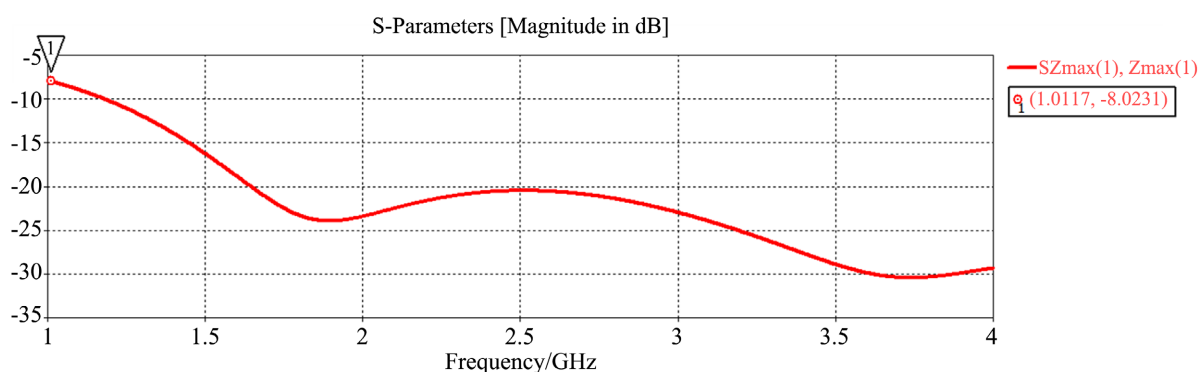


Figure 13. Wire bundle length 80 mm simulation curve

图 13. 丝束长度 80 mm 仿真曲线

如图 13 所示，当丝束长度分别 10 mm、50 mm、70 mm、80 mm，从其反射衰减的数据可以看出，当伪装丝束的长度增加，其低频反射衰减性能增强，但当丝束长度达到 50 mm 后，因丝束增长反射衰减性能的提升效果逐渐降低。

综合上述仿真分析，对伪装产品雷达伪装性能影响较大的因素分别为磁导率、丝束分布以及丝束长度。

基于雷达伪装原理，并综合考虑费效比，材料选择镀镍碳纤维 12 K，设计草长为 50 mm，每方厘米有一根丝束。

镀镍碳纤维由于其微观结构特征，可增大其分布丝束的数量，同时由于镍的高磁导率，可进一步降低目标物的 RCS。其电镜图如图 14 所示。

如图 14 所示，内部的黑色为碳纤维，表面发亮的为表面镀镍层。

针对上述设计方案，选择相应的场景开展仿真验证研究，本场景选用沿海 XX 军事洞库，通过伪装产品的使用，以实现洞口部位的伪装防护，首先建山体模型，以及采取伪装后的山体模型，其模型建立如图 15 所示。

完成模型建立后，开始仿真，对其雷达伪装性能及 RCS 特征进行对比，对比结果如图 16 所示。

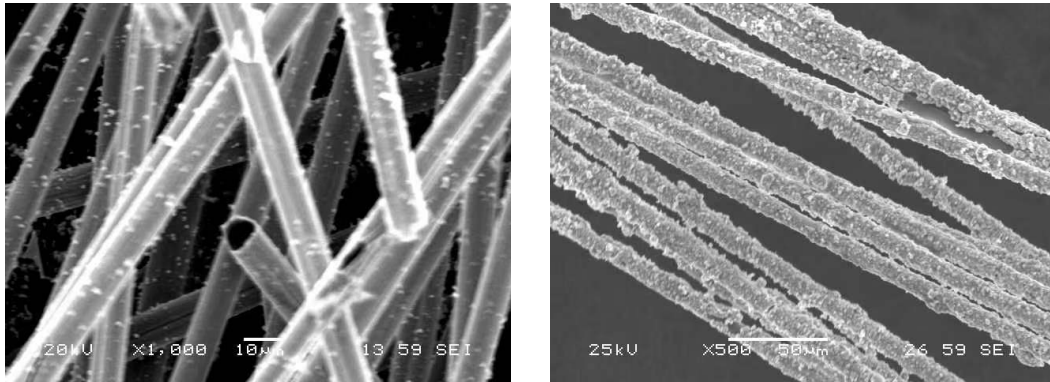


Figure 14. Electron microscopy of nickel-coated carbon fiber
图 14. 镀镍碳纤维电镜图

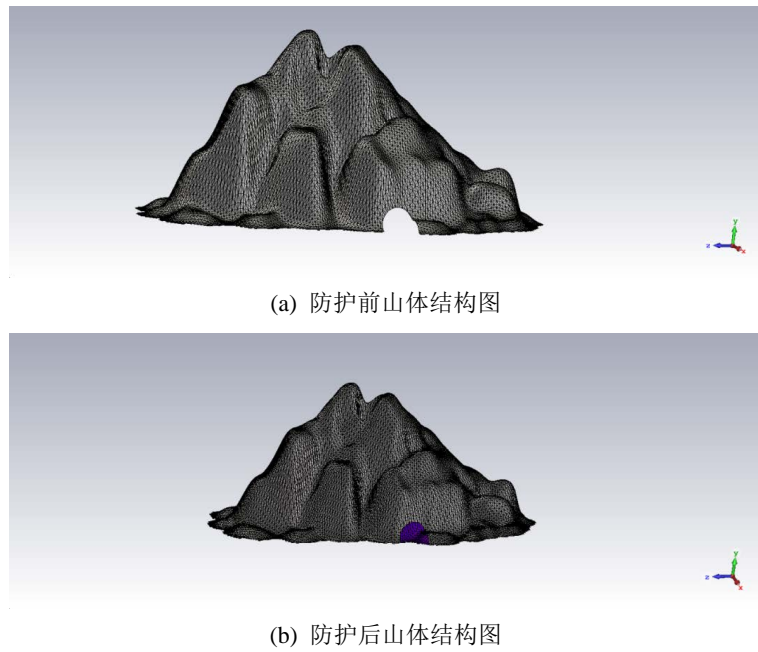


Figure 15. Model structure diagram of mountain cavern
图 15. 山体洞库模型结构图

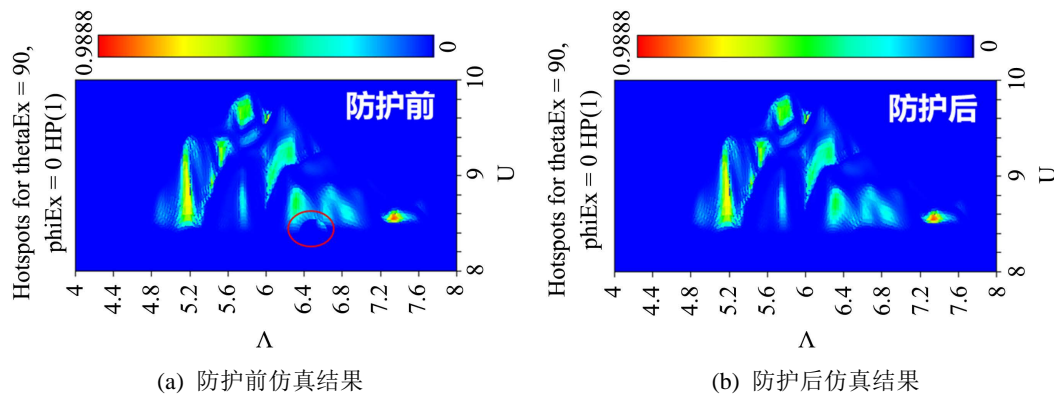


Figure 16. RCS simulation results of mountain cave
图 16. 山体洞库 RCS 仿真结果

通过仿真可以看出，在雷达回波方向，防护前洞口特征明显，防护后洞口特征基本消除，有较明显的改善。

综上，伪装产品的设计可满足抗雷达探测性能。

4. 产品制作及试验验证

在完成雷达伪装性能设计后，进行伪装产品样品的生产加工，由于产品设计需满足3年的使用寿命，选材需综合考虑各类产品的环境适应性能以及寿命要求，结合相关技术经验，所选用的伪装产品制作的材料分别包括：聚乙烯草丝、镀镍碳纤维、氯丁橡胶。其各类产品的使用功能以及使用寿命如下表1所示：

Table 1. Material selection list

表 1. 材料选型列表

序号	组成材料名称	材料功能	材料寿命	综合寿命
1	聚乙烯草丝	可见光和红外伪装	15~20年	
2	镀镍碳纤维	雷达散射	10~12年	
3	氯丁橡胶	基板及草丝固定	5~10年	
4		伪装草		5年

其中，最核心原材料为镀镍碳纤维，其加工方法是通过电镀方式，对碳纤维原丝的表面进行金属化处理实现的。

使用上述产品进行编织缝合，完成伪装样品的加工制作，如下图17所示：



Figure 17. Sample picture

图 17. 样品图

完成伪装样品制作后，需对其进行相关性能进行测试验证，针对雷达伪装性能的试验，使用弓形法发射率测试系统，测试频段为1 GHz~40 GHz，样品大小采用300 mm × 300 mm，主要测试仪器为适量网络分析仪(型号AV3629)，测试标准按照GJB2038A-2011《雷达吸波材料反射率测试方法》进行测试[11]，其测试结果如图18所示。

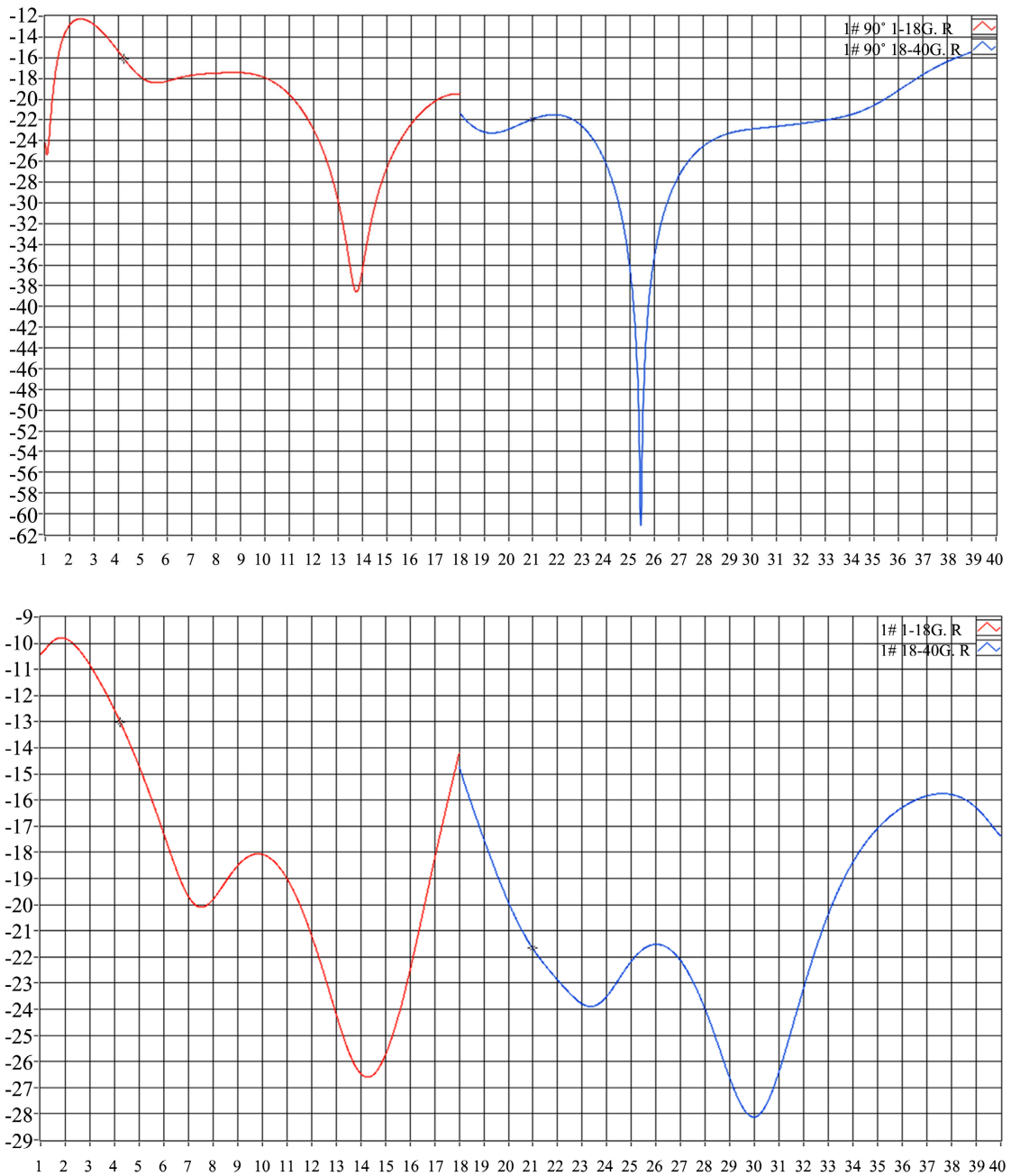


Figure 18. Reflectance test curve
图 18. 反射率测试曲线

环境适应性按照 GJB150A-2009《军用装备实验室环境试验方法》进行测试验证，测试项目主要包括盐雾、湿热、高低温、太阳辐照等[12]。

经过测试验证，基于镀镍碳纤维材料的宽频段高适应性伪装产品的雷达伪装性能满足要求，可大幅提升 L 波段雷达伪装性能，环境适应性及使用寿命可满足 3 年及以上使用要求。

5. 结论

本论文针对我军沿海军事设施所面临的现实威胁和具体需求展开设计研究，重点解决在伪装产品在

进行固定军事设施伪装中环境适应性差,力学强度低等问题,提出基于复材的伪装设计,市面上目前没有同类型产品。

通过基于镀镍碳纤维材料的宽频段高适应性伪装产品的研制利用雷达伪装原理,同时具备光学、红外、以及电磁波伪装功能,可为我军固定军事设施安全提供支撑。该新型伪装产品综合利用各类复合材料优良的环境使用性能、力学性能,实现其环境适应性的大幅提升。同时,利用镀镍碳纤维可调的电磁性能,大幅提升其 L 波段的雷达伪装性能,进一步提升固定军事设施抗合成孔径雷达的侦察性能,后期通过工程化生产推进相关产品的快速开发和实装应用,用于沿海环境洞库、固定火力点等固定军事设施的伪装,突破现有伪装网的局限性,解决军队目前痛点问题。

参考文献

- [1] 王岩飞,刘畅,詹学丽,等. 无人机载合成孔径雷达系统技术与应用[J]. 雷达学报, 2016, 5(4): 333-349.
- [2] 金椿柏,杨桃,雷岩,等. Relief-F 筛选波段的植被伪装揭露研究[J]. 激光技术, 2022, 46(1): 125-128.
- [3] 李道京,胡烜,周凯,等. 基于共形衍射光学系统的合成孔径激光雷达成像探测[J]. 光学学报, 2020, 40(4): 173-186.
- [4] 郭文志,黎新民. 浅谈在沿海一线机场修建地面单机掩蔽库的几点做法[J]. 机场工程, 2000(3): 20-21.
- [5] 郑凤婵. 伪装网表面工艺与结构的研究[J]. 科学与财富, 2020(25): 378.
- [6] 康越,原博,马天,等. 基于石墨烯的电磁波损耗材料研究进展[J]. 无机材料学报, 2018, 33(12): 1259-1273.
- [7] 李玉鹏,苏荣华,王吉远,等. 基于伪装结构兼容设计的目标 RCS 仿真分析[J]. 雷达科学与技术, 2020, 18(6): 640-644+650.
- [8] 颜家斌,刘颖,胡传炘,等. 多波段草型伪装网的研制[J]. 表面技术, 37(1): 75-76+90.
- [9] 杨建明,宇文慧,杨雅琦,等. 轻质环氧树脂/镀镍碳纤维/乙炔炭黑复合导电泡沫的制备与性能[J]. 塑料工业, 2017, 45(4): 143-146+60.
- [10] 李善霖,段华军,汪鑫,等. 镀镍碳纤维-碳纤维-玻璃纤维/乙烯基酯树脂导电复合材料的设计制备及其电磁性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(7): 7.
- [11] 王超杰,刘永峙,宋宇华,等. 雷达吸波材料反射率测试技术概述[J]. 新材料产业, 2019(7): 57-60.
- [12] 张云萍,郝少悦,张建国,等. GJB 150A-2009《军用装备实验室环境试验方法》应用研究[J]. 中国个体防护装备, 2017(3): 28-31.