

低雷达截面的超宽带 Koch 分形槽缝天线

徐海洋¹, 张 厚¹, 殷 雄¹, 苏晓勇²

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 93704 部队, 北京 101100)

摘 要:设计了一种具有低雷达截面的超宽带分形槽缝天线。利用“突出角”为 90° 的 Koch 分形对方形槽天线进行 3 次迭代设计后, -10 dB 阻抗带宽范围由方形槽缝天线的 $3.0 \sim 13.1$ GHz 变为 $2.8 \sim 13.7$ GHz。仿真和测试结果显示, 天线在 3 GHz 和 8 GHz 方向图对称, 在整个频段内相对于原天线的增益更稳定, 且具有较低的雷达散射截面(RCS)。该天线适用于对超宽带天线具有低 RCS 要求的场合。

关键词:雷达散射截面; 超宽带; 分形; 槽缝天线

中图分类号: TN974

文献标识码: A

Koch Fractal Slot Antenna with Low RCS for Ultra-wideband Application

XU Haiyang¹, ZHANG Hou¹, YIN Xiong¹, SU Xiaoyong²

(1. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China; 2. Unit 93704 of the Chinese PLA, Beijing 101100, China)

Abstract: In this paper, an ultra-wide band fractal slot antenna with low radar cross section (RCS) has been designed. The Koch island with 90° extrusive angles has been implemented through 3 fractal iterations on the base of the square slot, the -10 dB impedance bandwidth range becomes $2.8 \sim 13.7$ GHz from $3.0 \sim 13.1$ GHz of the initial square slot antenna. The simulation and measured results show that the antenna exhibits relatively symmetrical pattern at the frequency of 3 GHz and 8 GHz. Furthermore, it has more stable gain and lower RCS compared with the square slot antenna in the whole frequency band. It can be applied to the occasion of the UWB antenna requiring of low RCS.

Key words: radar cross section (RCS); ultra-wideband (UWB); fractal; slot antenna

0 引言

隐身技术是控制目标的散射特性,降低目标雷达截面使其作为低可见平台难以被侦测和发现,从而避免受到攻击和毁坏^[1-2]。天线作为雷达等电子设备中必不可少的电子元件,对系统雷达散射截面(RCS)的整体贡献较大的问题越来越突出。由于天线是保证接收和发射雷达波的必要设备,常规的隐身措施不可能简单地在天线隐身中获得应用。尤其是天线的带内隐身,必须兼顾天线在工作频段内的辐射和散射特性。如何降低天线的 RCS^[3-5],关系到天线乃至整个载体系统的电磁隐身性能,进而影响到系统的生存。

超宽带天线尺寸小,质量轻,易于集成加工,具有带宽上的巨大优势^[6]。要在保证超宽带天线的辐射性能的同时,实现超宽带范围内的 RCS 减缩,相

关研究国内外较少。文献[6-7]给出了一种超宽带方形槽缝天线,天线的辐射缝和馈电贴片分别印制在介质板的两侧。该天线实现了驻波带宽超宽带,但天线的 RCS 有待降低。本文利用分形技术^[8-10]对超宽带方形槽缝天线进行结构上的改进,仿真和实测结果显示,改进后的分形槽缝天线具有更宽带宽和更低的 RCS,且其辐射性能基本保持不变,较好地实现了天线辐射和散射的一体化设计。

1 天线的散射分析

天线散射机理示意图如图 1 所示。图中, S_1 为天线馈线的单模传输区处的一横截面, S_2 为天线外空间的一球面, Z_1 为天线的端口负载, Z_0 为天线端口处的特征阻抗, Γ_1 为接收机负载反射系数, Γ_0 为天线反射系数, (a_n, b_n) 为 S_1 参考面处入射和出射波的幅度, (a_i, b_i) ($i \neq 0$) 为场的球面波展开式中第 i

收稿日期: 2011-02-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60971118)

作者简介: 徐海洋(1983-), 男, 四川广安人, 博士生, 主要从事天线辐射与散射一体化的设计。E-mail: xuhaiyang.8888@163.com。张厚(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事天线、电磁兼容与电波传播的研究。

个人射和出射球面波的复振幅:

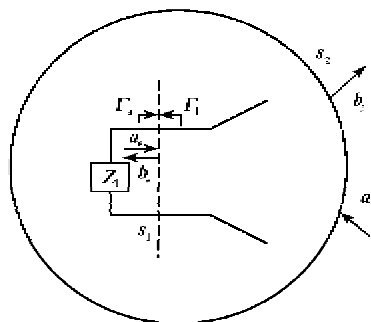


图1 天线散射机理示意图

由天线的散射场基础理论公式,天线的散射场为^[11]

$$\vec{E}^s(Z_1) = \vec{E}^s(Z_0) + \frac{\Gamma_1}{1 - \Gamma_1 \Gamma_2} b_0^w \vec{E}_i \quad (1)$$

简记为

$$\vec{E}^s(Z_1) = \vec{E}^s(Z_0) + \vec{E}^s(Z_1) \quad (2)$$

式中: b_0^w 为天线端口接匹配负载时,散射的匹配接收幅度; $\vec{E}_i$ 为单位幅度激励情形的辐射电场。其中,式(1)、(2)右边的第一项被称为结构模式项散射场,它对应接收机端接匹配负载情形即 $\Gamma_1 = 0$ 时的散射电场。它们右边的第二项为天线的模式项散射场。天线模式项散射场是天线作为一个加载散射体而特有的散射,由接收机负载与天线不匹配而反射的功率经天线再辐射而产生。本文主要目的是实现天线的散射与辐射一体化设计,要求在工作频段内馈电端口良好,所以主要考虑在原天线的基础上通过降低天线的结构模式项散射来降低天线的 RCS。

2 天线设计与性能

分形独特的自相似和空间填充特性,使分形几何用于天线设计时,不但能减小天线的尺寸,还可在减缩天线的 RCS 的同时展宽带宽,这是传统的天线设计中所无法比拟的。通过对原天线(方形槽缝天线)中的槽缝经过 3 步 Koch 分形迭代,形成了新的 Koch 岛形式的槽缝。为了实现分形的填充性,每次迭代都是在原基础上减去等腰直角三角形而不是等边三角形,使 Koch 岛的“突出角”是 90° 而非 60° ,迭代过程如图 2 所示。

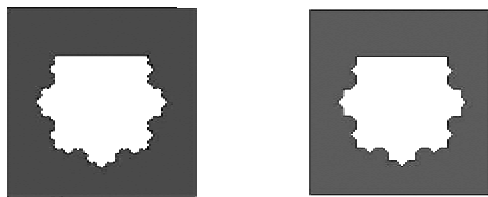
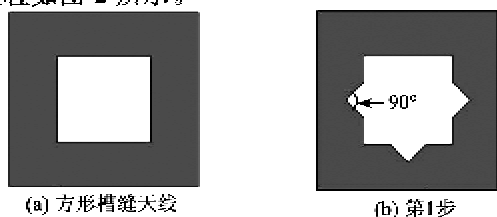


图2 方形槽的 3 步 Koch 分形迭代过程

天线印在介电常数为 4.6、厚 0.8 mm 的 FR-4 介质板两侧。介质板尺寸为 $63 \text{ mm} \times 63 \text{ mm}$,迭代前原方形槽的尺寸和微带贴片的尺寸及其相互位置见文献[6]。

为便于比较,同时仿真并制作了原天线和 Koch 分形槽缝天线,测试了其相关性能。图 3 为天线的结构示意图,灰色和深灰色区域为天线的两种不同金属贴片结构,并在结构示意图上标注了相应的尺寸。

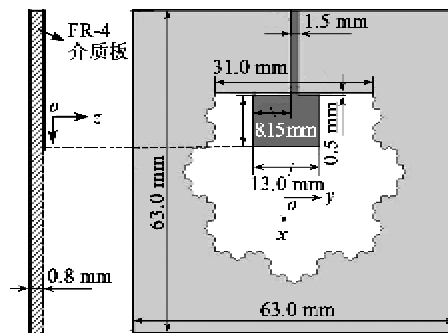
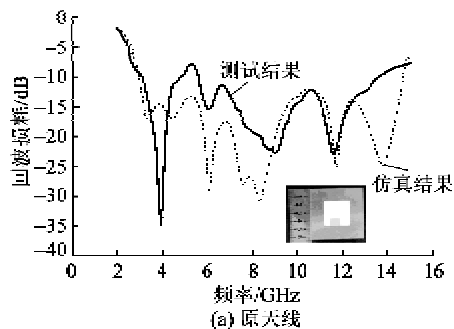
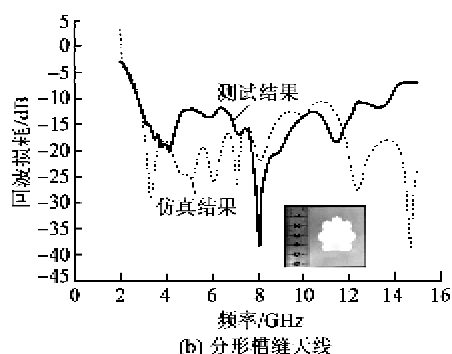


图3 分形槽缝天线结构图

天线槽缝通过分形迭代,增加了槽缝的周长,从而增加了天线的辐射电长度;分形的自相似性和对称特性还能在展宽天线带宽的同时,降低天线的 RCS;印刷天线的金属贴片面积对 RCS 减缩影响很大,通过对天线的槽缝分形,减小金属贴片的面积,从而减缩了天线的 RCS。

图 4 为原槽缝天线和改进后的分形天线的 S_{11} 计算和测试结果,对比可知槽缝经过分形改进后,天线的 -10 dB 阻抗带宽由方形槽缝天线的 $3.0 \sim$





(b) 分形槽缝天线
图4 天线的反射损耗图

13.1 GHz 变为 2.8~13.7 GHz,在高频段和低频段均展宽了带宽。这充分说明分形不仅能展宽带宽,还能减小天线的尺寸。

分形天线在 3 GHz 和 8 GHz 的方向图如图 5 所示。由图可知,方向图的测试结果与仿真结果相吻合,且方向图较为对称,辐射形式稳定。

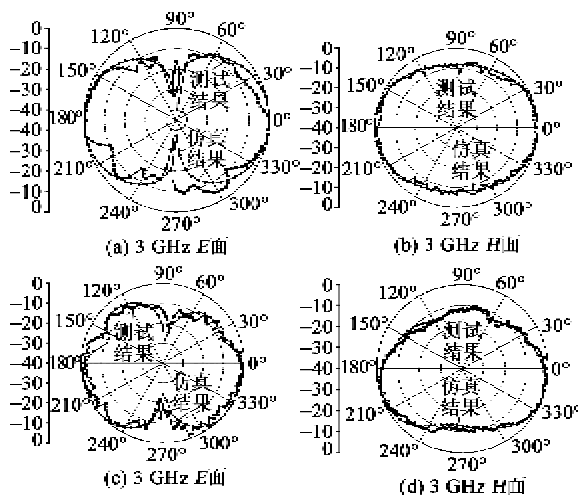


图5 分形槽缝天线方向图

分形天线和原天线的增益对比如图 6 所示。由图可知,分形天线增益在工作频段内更稳定。

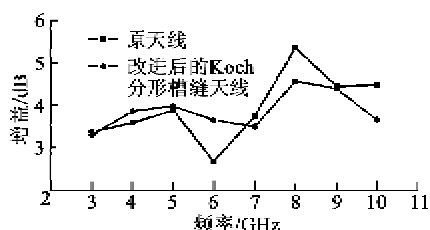


图6 天线增益对比

两天线的单站 RCS 对比如图 7 所示。这里入射电场和接收到的电场均平行于 x 轴,入射波方向平行于 z 轴。对比可知,分形天线几乎在整个工作频段内都具有更低 RCS。分析其原因是对槽缝分形减小了天线的金属覆盖面积,从而减小了天线的结构模式项散射;而两天线在工作频段的辐射模

式项散射均因匹配良好而很小,所以,总的 RCS 因为分形而得到了有效减缩。

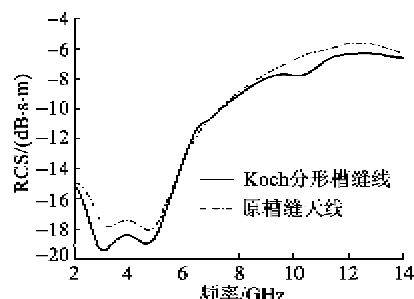


图7 天线 RCS 对比

3 结束语

设计了一种分形槽缝天线,用改进 Koch 形式(90°突出角)对方形槽缝分形。由于分形的自相似性和减缩尺寸功能,天线的一10 dB 阻抗带宽由未分形的 3.0~13.1 GHz 变为 2.8~13.7 GHz,在高频段和低频段均展宽了带宽。仿真和测试结果显示,天线的辐射形式对称,较稳定,增益也相对于未分形前起伏更小;且分形后金属覆盖面积的减小,使天线的 RCS 也得到了有效的减缩(这在分形天线和原天线的 RCS 对比中得到了印证),从而实现了天线的辐射和散射的一体化设计。该天线适用于对超宽带天线具有低 RCS 要求的场合。

参考文献:

- [1] 袁宏伟. 目标散射精确分析及微带天线 RCS 控制技术[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.
- [2] 邓超,谢拥军. 平面渐变开槽天线的改进设计[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版,2011,23(1):48-52.
- [3] WILSEN C B, DAVIDSON D B, ODENDAAL J W, et al. The RCS reduction of microstrip patch antennas [C]//Edinburgh, UK; 10th International Conference on Antennas and Propagation, 1997, 1174-1177.
- [4] JIANG Wen, GONG Shuxi, LI Yanping. A novel low RCS mobius-band monopole antenna [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2009, 23(14/15):1887-1895.
- [5] KNOTT E F, SHAEFFER J F. Radar cross section [M]. 2nd Edition. Raleigh, NC: Scitech, 2004: 63-64.
- [6] CHEN H D, CHEN J S, LI J N. Ultra-wideband square-slot antenna[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2006, 48(3): 500-502.
- [7] HU S, CHEN H, LAW C L. Backscattering cross section of ultra-wideband antennas [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter, 2007, 6(1): 70-73.

(下转第 157 页)