

# 低雷达截面的新型超宽带单极子天线

徐海洋, 张 厚, 曾宪峰, 殷 雄

(空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘 要:** 针对超宽带天线的隐身问题, 设计了一种新型的超宽带低雷达截面的单极子天线。测试结果显示天线-10 dB带宽范围为2.2~10.4 GHz, 天线在2.5 GHz和8 GHz的方向图对称性良好。相比于参考天线, 该新型天线的雷达截面(radar cross section, RCS)在带内的大多数频点实现了有效减缩。在最大增益损失不超过1 dB的情况下, 实现了两个不同入射方向 RCS 的最大减缩量分别为6.4 dBsm 和 17.9 dBsm。该天线可应用于超宽带隐身平台上。

**关键词:** 雷达截面; 超宽带; 单极子天线

**中图分类号:** TN 974

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1001-506X.2011.12.06

## Novel ultra-wideband monopole antenna with low RCS

XU Hai-yang, ZHANG Hou, ZENG Xian-feng, YIN Xiong

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

**Abstract:** To solve the problem of ultra-wideband (UWB) antennas in stealth, a novel UWB monopole antenna with low RCS is designed. The measured results show that the range of the -10 dB impedance bandwidth is from 2.2 to 10.4 GHz, and the symmetry of radiation patterns in 2.5 and 8 GHz is well. In comparison with the reference antenna, the RCS of the novel antenna has achieved effective reduction in most of the frequencies. With its largest gain loss about 1 dB in the whole operating frequencies, the largest values in RCS reduction with two different incident waves are 6.4 dBsm and 17.9 dBsm, respectively. This novel antenna can be applied in the UWB stealthy platform.

**Keywords:** radar cross section (RCS); ultra-wideband (UWB); monopole antenna

## 0 引 言

隐身技术旨在控制目标的散射特性,降低目标的雷达截面使得其作为低可见平台难于被侦测和发现,从而避免受到攻击和毁坏。雷达截面(radar cross section, RCS)是表征目标散射特性的一个最基本参数,是雷达探测技术、隐身和反隐身技术中的一个重要特征参数。对于低可见平台来说,对其总雷达散射截面的贡献较大的是平台上的天线。由于天线必须保证自身雷达波的正常接收和发射,使用雷达吸波材料等常规的 RCS 减缩方法无法在天线隐身中获得应用。如何在降低天线 RCS 的同时,辐射性能也能得到有效的保证,这是很难同时处理好的两个问题,工程上需要对两者进行折中。文献[1]中对天线的散射理论作了较为深入的研究,为天线的散射分析提供了有益的理论支撑;西安电子科技大学的天线与电磁散射研究所通过接地板开槽、分形、仿生、接地板加带隙结构等技术,使得天线的 RCS 尤其是某些谐振点得到有效减缩<sup>[2-6]</sup>;国外

还有一些研究者分别对诸如偶极子、喇叭天线、槽缝天线等单个天线单元的散射分析作了一些有意义的研究<sup>[6-9]</sup>。

超宽带印刷天线体积小、重量轻、易于集成加工,具有带宽上的巨大优势<sup>[10-11]</sup>。超宽带雷达和通信系统具有高距离分辨率和精确的目标识别能力,能获得复杂目标中的细微特征,在隐身及反隐身等方面具有广泛的应用前景,但为提高战场生存概率,需对其作隐身处理。作为超宽带系统最主要的外部设备,超宽带天线是系统的 RCS 主要贡献者之一。而且由于自身的宽带特性,超宽带天线的 RCS 减缩显得十分困难,目前国内外相关文献均不多见<sup>[12-14]</sup>。所以,对超宽带天线的散射研究具有重要的意义。

超宽带单极子天线具有在宽带范围内方向图对称、辐射特性稳定的优点。文献[15]给出了一种超宽带平面单极子天线,天线辐射单元和接地板分别印制在介质板的两侧,实现了天线的平面化,由于其具有出色的表现而应用广泛。文献[16]设计了一种椭圆贴片的单极子天线,通过

收稿日期:2011-04-27; 修回日期:2011-09-28。

作者简介:徐海洋(1983-),男,博士研究生,主要研究方向为天线散射与辐射一体化设计。E-mail: xuhaiyang@163.com

在接地板上方开矩形槽,改善了阻抗匹配,展宽了天线的带宽。超宽带单极子天线往往由于辐射贴片金属覆盖面积较大使得雷达散射截面较高而不利于隐身,从而限制其应用于超宽带隐身系统中。本文设计了一种新型的超宽带单极子天线,天线在实阻抗带宽超宽的同时也具有超宽带范围内的低 RCS 散射性能。

## 1 天线散射的理论分析

文献[1]提出了分析天线散射的模型,该模型中天线的模式项散射和结构项散射均可由天线开路和短路两种状态下的散射场得到,从而得到任意状态下的天线总散射场。天线散射场可表示为

$$\begin{aligned} E'(Z_i) &= E'(Z_c) + E''(Z_i) = \\ &E'(Z_c) + \frac{\Gamma_i}{1 - \Gamma_i \Gamma_a} b_a^* E_i' = \\ &\frac{(1 - \Gamma_a) E'(\infty) + (1 + \Gamma_a) E'(0)}{2} + \\ &\frac{\Gamma_i}{1 - \Gamma_a \Gamma_i} \frac{1 - \Gamma_a^2}{2} [E'(\infty) - E'(0)] \end{aligned} \quad (1)$$

式中,第一项对应天线结构模式项散射( $E'(Z_c)$ );第二项为天线模式项散射( $E''(Z_i)$ ); $Z_i$ 表示天线的端口负载; $Z_c$ 表示天线端口处的特征阻抗; $\Gamma_i$ 表示接收机负载反射系数; $\Gamma_a$ 表示天线反射系数; $E'(\infty)$ 表示接收机负载端视为开路负载时的天线总散射电场; $E'(0)$ 表示接收机负载端视为短路负载时的天线总散射电场。

天线的散射特性不同于一般的散射体,其总的散射( $\sigma$ )通常包括两部分:结构模式项散射( $\sigma_s$ )和天线模式项散射( $\sigma_a$ )。其中,结构模式项散射由天线的结构特征决定,如天线类型、材料、构造结构;天线模式项散射,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。它们之间的关系可以用下式表示<sup>[14]</sup>:

$$\sigma = |\sqrt{\sigma_s} + \sqrt{\sigma_a} e^{j\phi}|^2 \quad (2)$$

式中, $\phi$ 表示两种模式场的相位差。

## 2 天线设计

本文设计的天线和参考天线结构如图1所示。为便于比较,两天线的尺寸均为50 mm×42 mm,天线印制在厚度为0.8 mm的FR-4( $\epsilon_r=4.6$ )介质板上,辐射贴片和接地板分别位于介质板两侧。图1(a)为新型天线的结构图,分别在天线的接地板上开矩形槽,在天线贴片的顶部开扇形槽,改善了天线的阻抗匹配。为降低天线的 RCS,天线的辐射贴片由对称分布在矩形条上的宽度不尽相同的圆环组成,圆环的宽度见图标示,新型天线的辐射贴片面积相对于参考天线有所减小,可有效降低天线的 RCS。天线的接地板两侧做了圆滑处理,是为了防止波束倾斜。

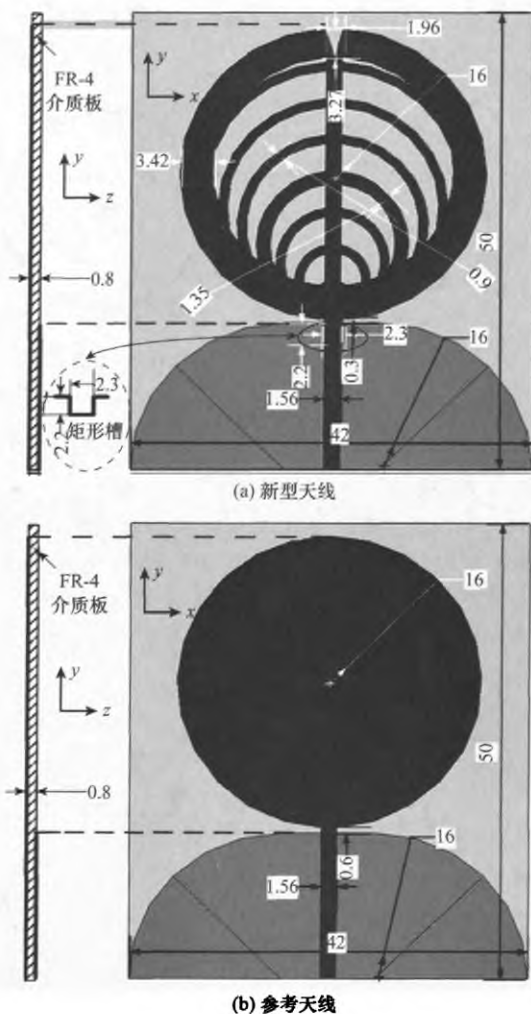


图1 天线的结构

## 3 天线的性能分析

天线反射损耗的测试与仿真结果对比如图2所示。由图可知,测试结果的阻抗带宽范围为2.2~10.4 GHz,这相比于带宽为2~11.2 GHz的仿真结果性能要差一些。分析原因,可能是由加工和焊接的误差引起的,测试环境也会对测试结果产生影响。但是,在工作频带范围内,测试和仿真曲线的趋势是一致的。

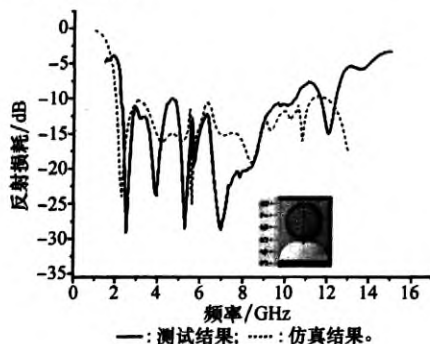


图2 天线的反射损耗

图 3 是天线辐射方向图的仿真和测试结果对比。由图可知, 天线方向图在低频 (2.5 GHz) 和高频

(8 GHz) 的方向图对称性良好, 且仿真和测试结果吻合较好。

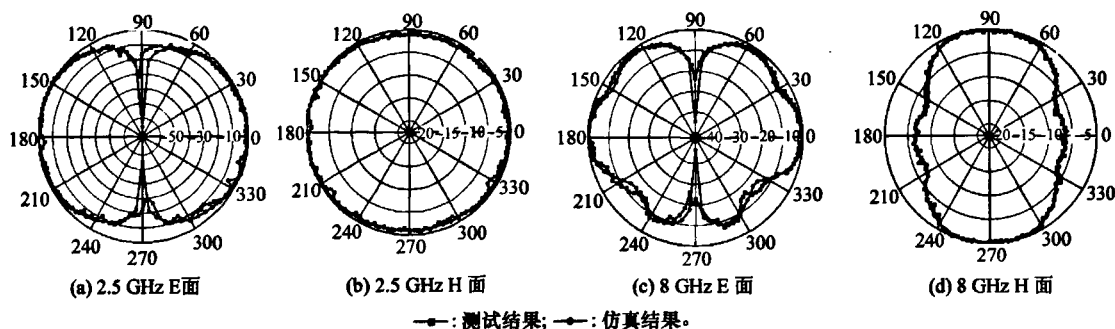


图 3 天线方向图

图 4 是入射波分别从方向  $(0, 0, -1)$  和  $(1, 0, 0)$  入射, 且电场均平行于  $y$  轴时, 天线的单站 RCS 比较图。由图可知, 在两个不同方向入射时的大部分带内频率区间, 新型天线的单站 RCS 均低于参考天线。其中, 入射波从  $(0, 0, -1)$  方向入射时, RCS 最大减缩约为 6.4 dBsm, 入射波从  $(1, 0, 0)$  方向入射, RCS 最大减缩约为 17.9 dBsm。

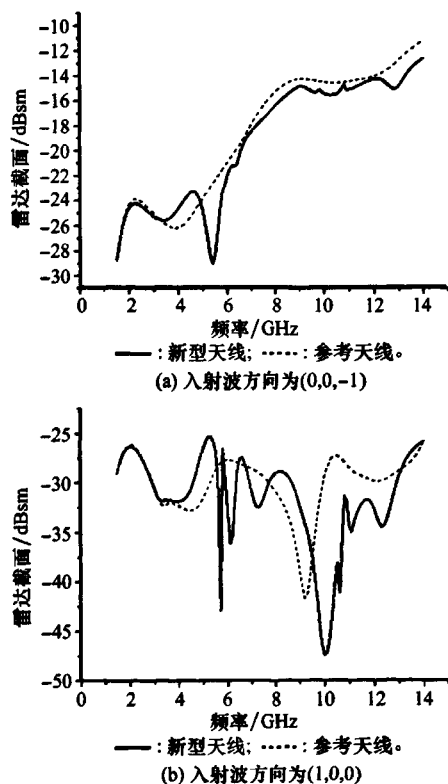


图 4 不同入射波方向的 RCS 对比

图 5 为入射波方向为  $(0, 0, -1)$  时, 天线端接短路、开路和匹配三种不同负载时的 RCS 比较图。由图可知, 由于超宽带天线的带宽很宽, 无论哪种负载状态下的 RCS 均不能保证最小或最大。从图中还可以看出, 在 6.5 GHz 后, 随着频率的升高, 天线总的 RCS 值随负载不同而变化不大。

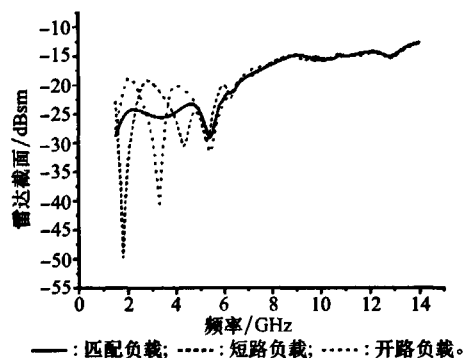


图 5 三种不同负载的 RCS 对比

图 6 为新型天线和参考天线的增益对比。相比参考天线, 新型天线的增益有所减小, 最大减小值约为 1 dB, 这说明天线的 RCS 减缩是以牺牲一定的增益为代价的。但是对比增益最大减小值和 RCS 的最大减缩值, 这种牺牲是值得的。

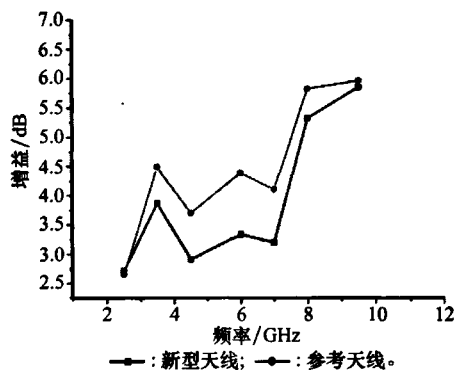


图 6 天线增益对比

## 4 结 论

本文设计的新型低 RCS 超宽带单极子天线在辐射贴片顶端开扇形槽和接地板上开矩形槽, 改善了阻抗匹配。通过在矩形条带上对称分布圆环而构成了辐射贴片。新型天线具有 2.2~10.4 GHz 的 -10 dB 测试带宽, 在低频 (2.5 GHz) 和高频 (8 GHz) 的方向图对称性良好。通过对两个不同入射波方向

的散射分析显示,新型的单极子天线在工作频率的大部分工作频段,相比于原天线具有更低 RCS,虽然有一些增益上的损失,但换来了更大的 RCS 减缩,而且这种增益上的损失也是可接受的,从而有效的兼顾了超宽带天线的辐射和散射性能。该新型天线可应用于超宽带隐身平台上。

### 参考文献:

- [1] 刘英,龚书喜,傅德民. 天线散射理论研究[J]. 电子学报,2005,33(9):1611-1613. (Liu Y, Gong S X, Fu D M. Theoretic study of antenna scattering[J]. *Acta Electronica Sinica*,2005,33(9):1611-1613.)
- [2] Gui G, Liu Y, Gong S. A novel fractal patch antenna with low RCS[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*,2007,21(15):2403-2411.
- [3] Li Y, Liu Y, Gong S. Microstrip antenna using ground-cut slots for low RCS with size miniaturization techniques[J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*,2008,1:211-220.
- [4] 凌劲,龚书喜,路宝,等. 电磁带隙结构在天线雷达散射截面减缩中的应用[J]. 强激光与粒子束,2009,21(8):1225-1229. (Ling J, Gong S X, Lu B, et al. Application of electromagnetic bandgap structure in RCS reduction of antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2009,21(8):1225-1229.)
- [5] Jiang W, Liu Y, Gong S X, et al. Application of bionics in antenna radar cross section reduction[J]. *IEEE Antenna Wireless Propagation Letters*,2009,8:1275-1278.
- [6] Williams N. The radar cross section of antennas-an appraisal[C]// *Proc. of the Military Microwave Symposium*,1986:502-508.
- [7] Collin R E, Zuker F J. *Antenna theory, part I*[M]. McGraw-Hill,1969:123-131.
- [8] Anderson J B, Vaughan R G. Transmitting, receiving, and scattering properties of antennas[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*,2003,45(4):93-98.
- [9] Balanis C A. *Antenna analysis, theory, and design*[M]. 2nd ed. Wiley,1997:90-97.
- [10] 张文梅,陈雪,韩国瑞,等. 平面超宽带天线的设计与研究[J]. 电波科学学报,2008,23(2):335-339. (Zhang W M, Chen X, Han G R, et al. Design of planar UWB antennas[J]. *Chinese Journal of Radio Science*,2008,23(2):335-339.)
- [11] 吕文俊,朱洪波. 陷波特性和平面超宽带天线的研究进展[J]. 电波科学学报,2009,24(4):780-785. (Lü W J, Zhu H B. On the frequency notched planar ultra-wideband antennas[J]. *Chinese Journal of Radio Science*,2009,24(4):780-785.)
- [12] Xu H Y, Zhang H, Yin X. Ultra-wideband Koch fractal antenna with low backscattering cross section[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*,2010,24:2615-2623.
- [13] 姜文,龚书喜,洪涛,等. 低雷达截面的超宽带扇形天线[J]. 电子学报,2010,38(9):2162-2165. (Jiang W, Gong S X, Hong T, et al. Fan-shaped antenna with low RCS for ultra-wideband application[J]. *Acta Electronica Sinica*,2010,38(9):2162-2165.)
- [14] Hu S, Chen H, Law C L. Backscattering cross section of ultra-wideband antennas[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*,2007,6:70-73.
- [15] Liang J X, Chiau C C, Chen X D, et al. Study of a printed circular disc monopole antenna for UWB systems[J]. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*,2005,53(11):3500-3504.
- [16] Huang C Y, Hsia W C. Planar elliptical antenna for ultra-wideband communications[J]. *Electronic Letters*,2005,41(6):296-297.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训：

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>