

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^[2-5];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^[6-9]。

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^[10-11]。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^[12-14]。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

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带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

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}^s(\mathbf{Z}_l) &= \mathbf{E}^s(\mathbf{Z}_c) + \mathbf{E}^a(\mathbf{Z}_l) = \\
 &\mathbf{E}^s(\mathbf{Z}_c) + \frac{\Gamma_l}{1 - \Gamma_l \Gamma_a} \mathbf{b}_0^m \mathbf{E}_1^t = \\
 &\frac{(1 - \Gamma_a) \mathbf{E}^s(\infty) + (1 + \Gamma_a) \mathbf{E}^s(0)}{2} + \\
 &\frac{\Gamma_l}{1 - \Gamma_a \Gamma_l} \frac{1 - \Gamma_a^2}{2} [\mathbf{E}^s(\infty) - \mathbf{E}^s(0)] \quad (1)
 \end{aligned}$$

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

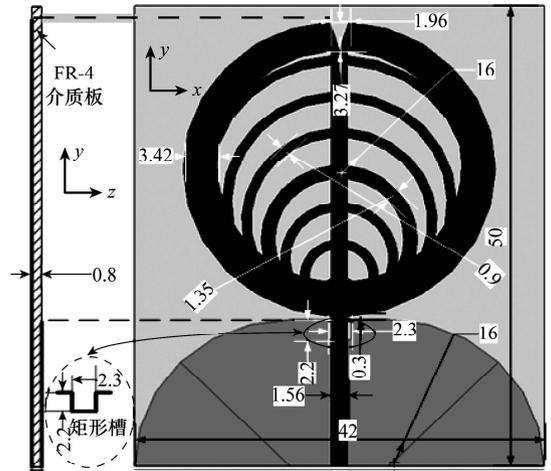
天线的散射特性不同于一般的散射体,其总的散射(σ)通常包括两部分:结构模式项散射(σ_s)和天线模式项散射(σ_a)。其中,结构模式项散射由天线的结构特征决定,如天线类型、材料、构造结构;天线模式项散射,是天线作为一个加载散射体而特有的散射,由接收机负载与天线不匹配而反射的功率经天线再辐射而产生。它们之间的关系可以用下式表示^[14]:

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

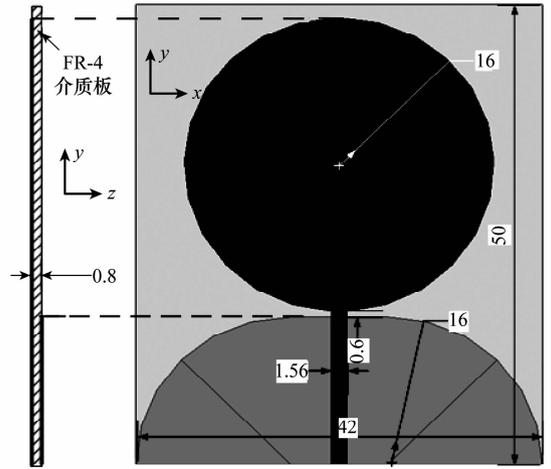
式中, ϕ 表示两种模式场的相位差。

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。



(a) 新型天线

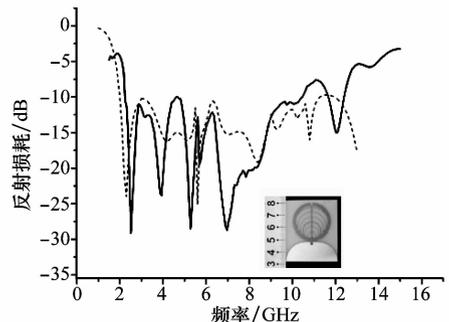


(b) 参考天线

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。



—: 测试结果; ···: 仿真结果。

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。

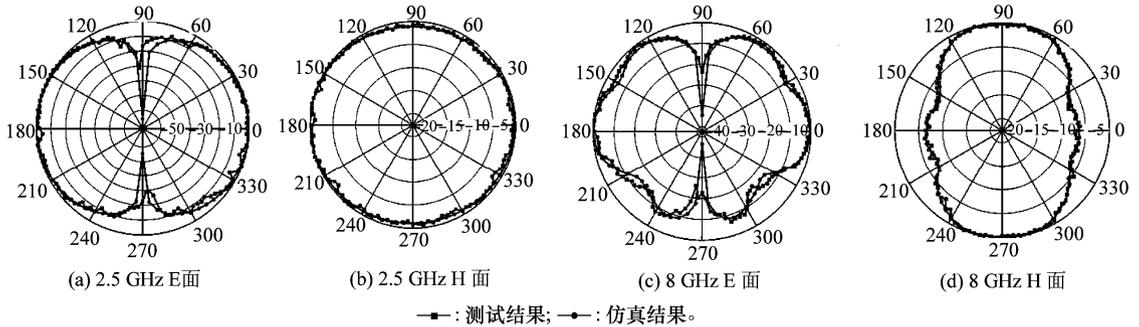


图 3 天线方向图

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。

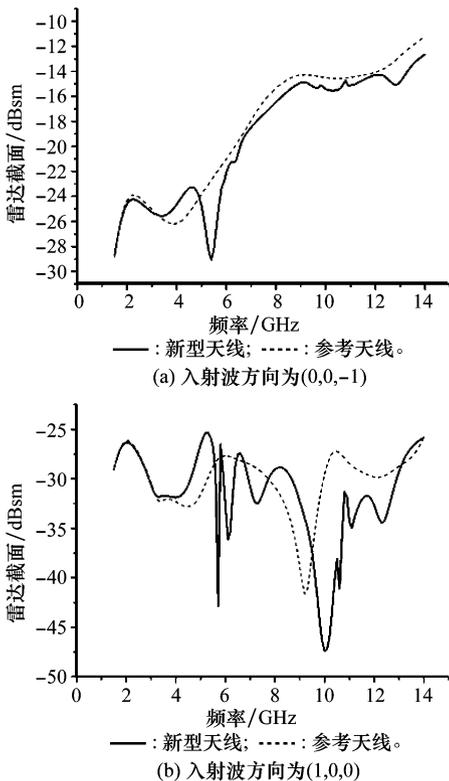


图 4 不同入射波方向下的 RCS 对比

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。

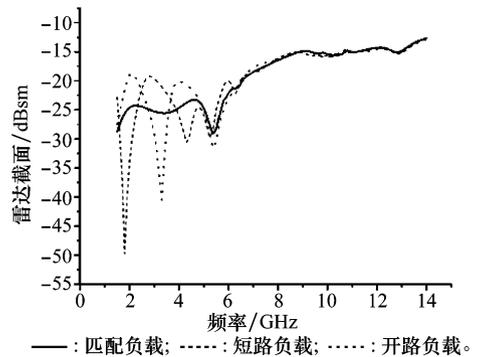


图 5 三种不同负载的 RCS 对比

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。

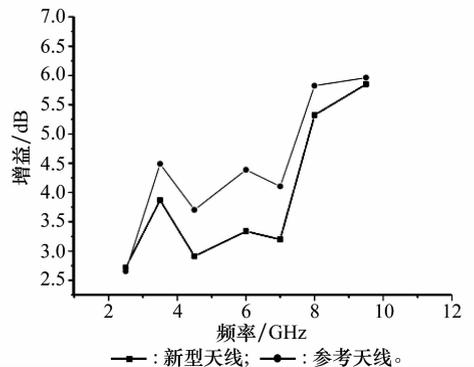


图 6 天线增益对比

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] Willians 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-Hi,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 Letter*,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.