

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104534

用于雷达隐身设备的低 RCS 超宽带 Vivaldi 天线*

王丽黎 刘 庆 杜忠红

(西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048)

摘要:为了减小雷达探测对导弹、飞机和舰船等隐身设备的威胁,设计了一款低 RCS 的超宽带高增益 Vivaldi 天线。通过分析天线在不同频率下的表面电流分布,在不影响天线辐射性能的前提下,采用一种简单有效的改变天线外形的方法,并在辐射臂两侧加载矩形加半圆形的异形结构。这种结构可以减少辐射器表面的散射,从而使单站 RCS 降低。测试结果表明,所提出的天线工作带宽为 4.7~11 GHz,最大增益达到 11 dBi,与原始天线相比,在保持良好辐射性能的同时,在工作频段范围内 RCS 最大缩减为 18.5 dB,可以应用于低 RCS 的隐身系统。

关键词:超宽带; Vivaldi 天线; 雷达散射截面; 高增益

中图分类号: TN823+.24 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1015

Ultra-wideband Vivaldi antenna with low RCS for radar stealth equipment

Wang Lili Liu Qing Du Zhonghong

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to reduce the threat of radar detection to stealth equipment such as missiles, aircraft and ships, an ultra-wideband (UWB) high gain Vivaldi antenna with low radar cross section (RCS) was designed. By analyzing the surface current distributions of the antenna at different frequencies, a simple and effective method is adopted to change the shape of the antenna without affecting the radiation performance of the antenna, and a rectangular and semicircular shaped structure is loaded on both sides of the radiation arm. The proposed structure can reduce the scattering on the surface of the radiator, leading to the monostatic RCS reduction. The measurement results show that the proposed antenna has a working bandwidth of 4.7~11 GHz and a maximum gain of 11 dBi. Compared with the original antenna, the proposed antenna maintains good radiation performance. At the same time, the maximum reduction of RCS is 18.5 dB in the working frequency range. The proposed antenna can be applied to stealth systems with low RCS.

Keywords: ultra-wideband; Vivaldi antenna; radar cross section; high gain

0 引言

在高科技信息化战争中,隐身技术至关重要。高效的隐身设计要求在不影响天线^[1-3]辐射性能的情况下,最大限度地减少天线表面的反射或散射。雷达散射截面(radar cross section, RCS)^[4-5]是雷达隐身技术中的关键指标,它是目标在雷达接收方向上反射雷达信号能力的度量。在作战系统中,天线是发射和接收信息的关键部件,同时也是对系统雷达散射截面尤为重要的散射源,因

此,天线的低散射性能非常重要。Vivaldi 天线^[6-7]因其剖面低、体积小、带宽宽和定向性强等特点广泛地应用于飞机、导弹、舰船等应用中。因此,对低可见平台而言, Vivaldi 天线的隐身设计具有重要的军事研究价值。

近年来,研究人员提出了许多减小天线 RCS 的方法,包括改变天线外形^[8-9]、涂覆雷达吸波材料、加载低 RCS 超材料吸收体^[10-11]、加载频率选择表面(FSS)^[12-13]等。文献[14]通过去除辐射臂表面部分金属并引入周期性槽,改变天线的外形,使 RCS 最大降低了 10 dB;文献[15]通过在辐射臂两侧引入多个圆形槽,最大限度地

收稿日期:2021-07-15 Received Date:2021-07-15

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(61771389)资助

减小了辐射单元表面的散射,使 RCS 降低了 11 dB;文献[16]在天线边缘外侧添加缝隙结构,增加了反向电流,并将超薄吸波材料连接在缝隙结构上方以吸收反向电流,实现了 10 dB 的 RCS 缩减;文献[17]通过在天线两侧引入通孔结构,限制入射波产生感应电流,得到了 10 dB 的 RCS 缩减。上述文献在不同程度上进行了 RCS 缩减,但很难同时满足低 RCS 与良好的辐射性能。

本文设计了一款工作在 4.7~11 GHz 的低 RCS 的超宽带高增益 Vivaldi 天线,通过缩小天线整体尺寸以及在辐射臂两侧加载矩形加半圆形的异形槽线结构,使设计的天线在原始天线的基础上减小尺寸以及 RCS 的同时,仍保持较高的增益和定向辐射性。实验结果表明,该天线在工作频段内最大可以实现 18.5 dB 的 RCS 缩减,最大增益为 11 dBi,可用于提高飞行器的隐身性能。

1 传统 Vivaldi 天线相关理论分析

1.1 传统 Vivaldi 天线的结构及原理

传统的 Vivaldi 天线由 P. J. Gibson 于 1979 年提出,它是一种呈指数变化的槽线天线,是非周期、渐变、端射行波天线。该天线主要包括辐射单元和微带线两部分,辐射单元由圆形开路腔、矩形槽线和指数渐变槽线组成,馈电微带线由扇形微带线和矩形微带线组成。

传统的 Vivaldi 天线如图 1 所示,该天线是将金属层覆盖在介质基板正反两面,天线的正面结构是刻在介质基板上的接地层,为图中浅灰色部分,由圆形开路腔、矩形槽线、指数渐变槽线组成。其中,圆形开路腔对微带传输线起到阻抗匹配的作用,矩形槽线与微带传输线相互耦合以传播电磁波,指数渐变槽线对天线所辐射的电磁波起到引向作用^[18]。天线的反面结构是微带线-槽线馈电结构,为图中深灰色部分,微带线的终端为扇形结构,起到终端负载匹配作用,微带线通过矩形槽线耦合,向辐射贴片馈电。

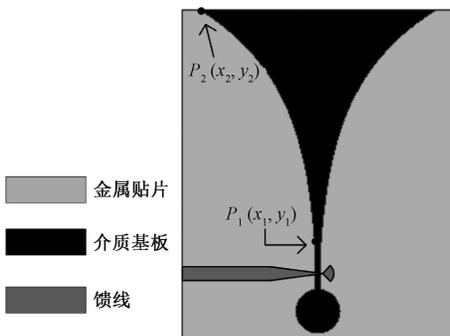


图 1 传统天线结构

Fig. 1 Traditional antenna structure

天线处于工作状态时,电磁波通过微带线耦合到正面金属层的矩形槽线之间,沿着指数渐变槽线传输并耦合辐射至自由空间。在电磁波传输过程中,当指数渐变槽线开口较小时,电磁波的能量被束缚在天线的金属贴片之间,此时辐射较弱;当电流沿着指数渐变槽线传输至开口较大位置时,金属贴片对电场的束缚能力逐渐减小,使电场信号向自由空间辐射。因此,天线的指数渐变槽线的最小距离决定天线的最高工作频率,而槽线的最大开口距离限制天线的最低工作频率。

1.2 传统 Vivaldi 天线的尺寸原理

由于 Vivaldi 天线属于行波天线,因此要满足行波机制的要求,Vivaldi 天线的长度(L)、宽度(W)和指数渐变线(y)等尺寸应满足式(1)~(5)。

Vivaldi 天线的长度(L)应大于波长(λ)的 1/2:

$$L > \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

其中, λ 为最大工作波长。天线的宽度(W)应大于波长的 1/4:

$$W > \frac{\lambda}{4} \quad (2)$$

Vivaldi 天线的槽线属于指数渐变槽线,这种指数型槽线使 Vivaldi 天线比普通的槽线天线拥有更宽的带宽,图 1 中 $P_1(x_1, y_1)$ 为槽线的起点, $P_2(x_2, y_2)$ 为槽线的终点,指数渐变槽线可以表示为:

$$y = C_1 e^{Kx} + C_2 \quad (3)$$

其中, K 为指数曲线的增长率,决定槽线的弯曲程度, C_1 、 C_2 为常数,可用以下公式表示:

$$C_1 = \frac{y_1 - y_2}{e^{Kx_2} - e^{Kx_1}} \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{y_2 e^{Kx_1} - y_1 e^{Kx_2}}{e^{Kx_2} - e^{Kx_1}} \quad (5)$$

1.3 天线散射理论

当目标物体被探测的雷达波照射时,入射雷达波的能量将被目标物体向各个方向散射,RCS 是衡量当物体受到电磁波照射时向特定方向反射电磁波能量大小的物理量。天线的 RCS 可以看作天线结构模式和天线模式的总和,结构模式是由辐射器的垂直反射引起的,天线模式是由于天线阻抗不匹配而导致部分接收功率反射,再经辐射单元辐射引起的。天线接匹配负载时的总 RCS^[19]可以表示为:

$$\sigma = \left| \sqrt{\sigma_s} - (1 + \Gamma_A) \sqrt{\sigma_a} e^{j\varphi_r} \right|^2 \quad (6)$$

其中, σ 、 σ_s 和 σ_a 分别表示天线接匹配负载时的总 RCS、结构模式导致的 RCS 和天线模式导致的 RCS, Γ_A 表示天线反射系数, φ_r 表示结构模式和天线模式的相对相位。

目标的 RCS 的单位一般采用对数形式,记为 dBsm:

$$\sigma_{dBsm} = 10\lg\sigma \quad (7)$$

雷达最大有效距离方程^[20]为:

$$R_{max} = [P_t G^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 P_{min}]^{1/4} \quad (8)$$

其中, P_t 为发射机的输出功率, P_{min} 为可容许接收信号的最小电平, G 为发射天线的最大增益。根据式(8),在雷达各参数及工作频率确定时,其最大探测距离与物体的 RCS 的 4 次方根成正比。由此可知,如果对散射体的 RCS 进行相应缩减,那么将会有效地缩短被敌方雷达发现的有效距离,目标作为散射体被发现的可能性也将大大减弱。因此,本文通过改变天线的结构模式,减小天线表面的垂直反射,使 RCS 降低,缩短雷达有效距离。

2 天线设计

2.1 原始天线的结构及设计

文中设计的原始的 Vivaldi 天线如图 2 所示,天线结构由圆形开路腔、梯形槽线、指数渐变槽线和馈电结构组成。文中以该天线作为参考天线,与改进后的 Vivaldi 天线进行对比。该天线印刷在介电常数为 2.65、厚度为 0.8 mm 的 F4B-2 介质基板上,图中黑色部分为介质基板,浅灰色部分为附着在介质基板表面的金属铜,天线的整体尺寸为 88×52 mm²。图 2(a) 为天线正面结构,作为接地板,接地板由圆形开路腔、梯形槽线、指数渐变槽线组成。图 2(b) 为天线反面结构,由矩形结构和扇形结构组成,馈电方式采用微带线-槽线馈电。

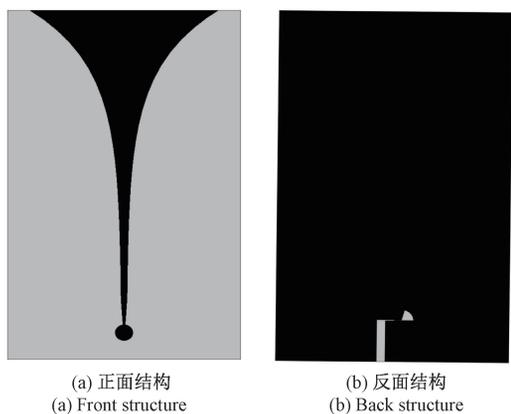


图 2 原始天线结构

Fig. 2 Original antenna structure

采用微波仿真软件 CST 对图 2 所示原始天线的表面电流进行仿真研究,通过观察原始天线在工作频段内不同频点的表面电流分布,如图 3 所示,可以得出,对于馈电部分,电流主要分布在圆形开路腔和微带线周围的一定区域内,对于指数渐变槽线部分,电流主要分布在指数

槽线边缘。因此,对于 Vivaldi 天线而言,仅在较小的辐射单元内存在较强的表面电流,其他区域表面电流分布较弱。

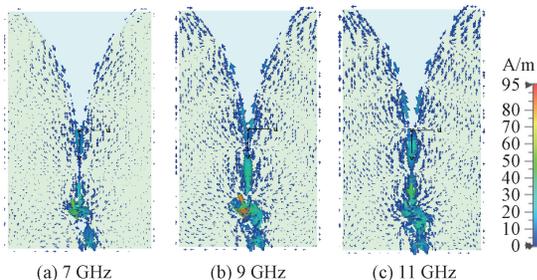


图 3 原始天线的表面电流

Fig. 3 The surface current diagram of original antenna

2.2 改进的 Vivaldi 天线设计

首先在原始天线的基础上,对天线整体尺寸进行缩小。实验表明,当天线整体尺寸缩小至原来的 75% 时,天线的辐射性能仍无明显下降,而当天线整体尺寸缩小至原来的 75% 以下时,辐射性能开始出现明显下降,因此,本文将天线整体尺寸缩小为原始天线的 75%。

其次,根据图 3 所示原始天线的表面电流图可以看出,天线辐射臂两侧的表面电流较弱,天线的辐射性能主要取决于接近天线内部指数分布的表面电流,而除去不同频率下表面电流分布均较弱部分的金属表面并不会影响天线的辐射性能。因此,在天线辐射臂两侧电流较弱区域加载槽线结构,如图 4 所示为加载矩形槽线的天线结构,这样减小了天线表面的金属面积,从而降低天线的 RCS。

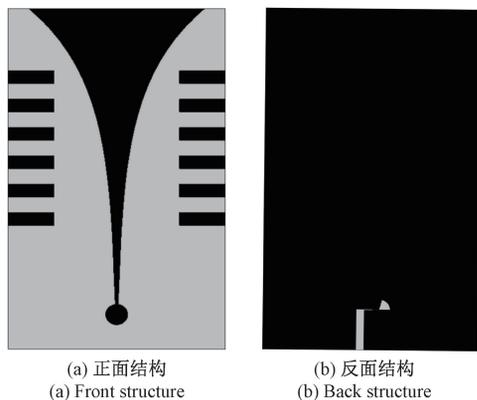


图 4 矩形端头的天线结构

Fig. 4 Antenna structure with rectangular end

为了使设计的天线获得最佳的工作性能,本文研究分析了不同槽线结构对天线性能的影响,利用微波仿真软件 CST 仿真不同槽线结构的天线的反射系数和 RCS (仿真细节详见文中第 3 节),通过仿真分析发现,当天

线的槽线为半圆形端头结构,即天线结构如图 5 所示时,天线具有更优的性能。

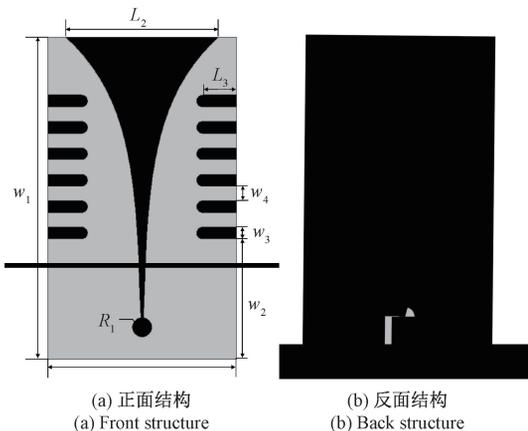


图 5 半圆形端头的天线结构

Fig. 5 Antenna structure with semicircular end

图 6 所示为半圆形端头和矩形端头的天线的反射系数的对比,可以看出:在 5.6~6.1 GHz 时,矩形端头天线的 S_{11} 高于 -10 dB,而半圆形端头天线的 S_{11} 始终低于 -10 dB,明显优于矩形端头;在其他频段时,两者的 S_{11} 无明显差别。

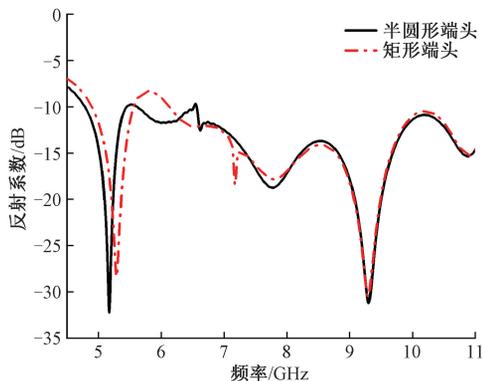


图 6 天线的 S_{11} 比较

Fig. 6 S_{11} comparison of antennas

图 7 所示为半圆形端头和矩形端头的天线在入射角 $\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$ 时的 RCS 对比图,从图中可以看出:在 5.9~6.3 GHz 时,半圆形端头天线的 RCS 明显低于矩形端头天线;在其他频段时,两者的 RCS 无明显差别。

最终,本文在辐射单元两侧加载了如图 5 所示的矩形槽加半圆形槽的异形结构,其中天线宽度 $L_1 = 39$ mm,长度 $W_1 = 66$ mm,指数型曲线最大开口宽度 $L_2 = 31.5$ mm,圆形开腔直径 $R_1 = 4.7$ mm,第一个异形结构槽线距天线起始端长度 $W_2 = 24$ mm,矩形槽线长度 $L_3 = 7$ mm,宽度 $W_3 = 2.5$ mm,槽线之间间隔距离 $W_4 = 3$ mm。

优化后的天线在 7、9、11 GHz 的表面电流分布如图 8

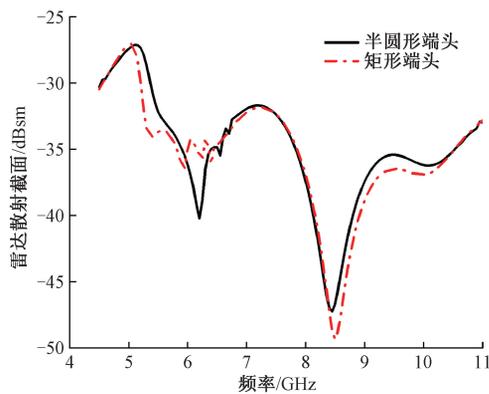


图 7 天线的单站 RCS 特性曲线比较

Fig. 7 Comparison of single station RCS characteristic curves of antennas

所示,从图中可以看出,除去辐射较弱部分的金属表面后,天线表面电流仍集中分布在指数渐变槽线边缘。该现象表明加载缝隙结构对天线的辐射性能无明显影响。

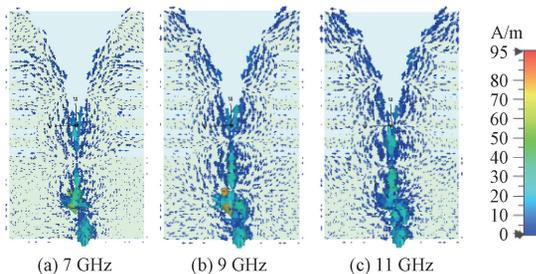


图 8 优化后天线的表面电流

Fig. 8 The surface current of optimized antenna

3 仿真与实物测试

基于微波仿真软件 CST 2019,本文对原始天线和优化后的 Vivaldi 天线在 4.5~11 GHz 的频率范围内的性能如反射系数、增益、辐射方向图、散射性能等进行仿真对比。

为了进一步验证所提出的天线的性能,本文按照最终优化后的天线结构和具体尺寸参数对天线进行加工与辐射性能测试,优化后的天线实物图如图 9 所示,浅灰色部分为金属贴片,深灰色部分为 F4B-2 介质基板,天线通过 50 Ω 的 SMA 同轴接头馈电。本文在 4.5~11 GHz 的频率范围内对加工的天线实物的性能进行测试,采用 Agilent E8361C 矢量网络分析仪对天线的反射系数进行测量。采用微波暗室测试系统(NSI2000)对天线的增益和辐射方向图进行测量,天线在微波暗室中的测试图如图 10 所示。测试前需要观察接收信号的信噪比,需要在高信噪比的环境下进行测试以保证获得最佳的测试结果。为了避免天线在测试过程中产生位移,对测试结果

产生影响,在天线两侧增加了泡沫作为支撑,以更好地固定天线。

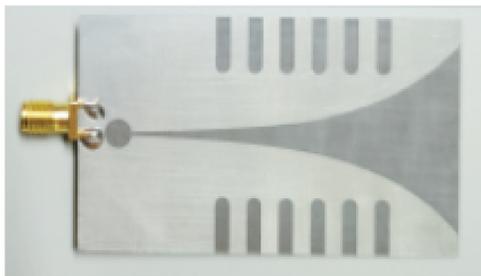


图 9 优化后的天线实物图

Fig. 9 The optimized antenna physical figure



图 10 天线在微波暗室中测试图

Fig. 10 Antenna test diagram in microwave anechoic chamber

首先分析原始天线和优化后天线的反射系数,在 4.5~11 GHz 的频率范围内,以 0.05 GHz 为步长,采集了共 131 个频点下原始天线的反射系数与优化后天线的仿真及实测的反射系数。

其次对原始天线与优化后天线的辐射性能进行分析,天线的工作频率为 4.7~11 GHz,本文在 4.5~11 GHz 的频率范围内,以 0.5 GHz 为步长,采集了共 14 个频点下原始天线的辐射场场强随方向变化的数据与优化后天线的仿真及实测的辐射场场强随方向变化的数据。其中,对各个频点,在辐射方向 $\varphi=90^\circ$, θ 在 $0\sim 360^\circ$ 角域范围内,以 0.5° 为步长,采集了共 721 个角度下原始天线的辐射场场强数据与优化后天线的仿真和实测的辐射场场强数据。同样,对各个频点,在辐射方向 $\varphi=0^\circ$, θ 在 $0\sim 360^\circ$ 角域范围内,以 0.5° 为步长,采集了共 721 个角度下原始天线的辐射场场强数据与优化后天线的仿真和实测的辐射场场强数据。

最后对原始天线与优化后天线的散射性能进行分析。一方面,分别在入射角为 $\theta=0^\circ$, $\varphi=0^\circ$ 和 $\theta=10^\circ$, $\varphi=0^\circ$ 的情况下,在 4.5~11 GHz 的频率范围内,以 0.05 GHz 为步长,采集了 131 个频点下的 RCS。另一方面,在

4.5~11 GHz 的频率范围内,以 0.5 GHz 为步长,采集了共 14 个频点下原始天线和优化后天线在入射波 $\theta=90^\circ$, φ 在 $0\sim 180^\circ$ 的角域内变化时的 RCS。其中,对各个频点,在入射波 $\theta=90^\circ$, φ 在 $0\sim 180^\circ$ 的角域范围内,以 1° 为步长,采集了共 181 个角度下原始天线和优化后天线的 RCS。

4 实验结果与分析

4.1 S 参数

原始天线与优化后天线的仿真及实测的反射系数对比如图 11 所示。图中实线为原始天线的仿真图,划线为优化后天线的仿真图,点划线为优化后天线的实测图。从图中可以看出,优化后天线的 S_{11} 较原始天线更好,优化后天线在 4.7~11 GHz 内 S_{11} 小于 -10 dB,符合设计指标要求,实测结果与仿真结果存在轻微误差,造成误差的主要原因有两个方面:一方面是天线在实物加工过程中存在加工精度和尺寸偏差问题,另一方面是实物测试时测试环境存在一定的电磁干扰,两者均会影响实测结果。

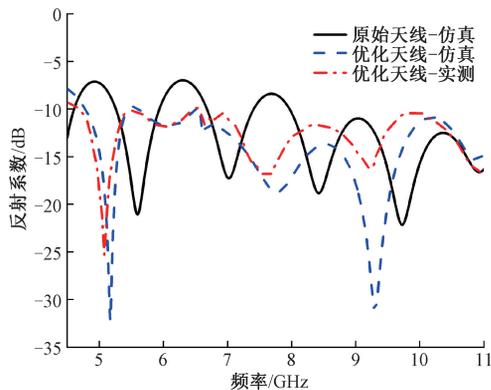


图 11 天线的 S_{11} 比较

Fig. 11 S_{11} comparison of antennas

4.2 辐射方向图

对原始天线与优化后天线的辐射性能的分析结果表明,原始天线与优化后天线在各工作频点下都朝着末端定向辐射,在部分工作频点下,优化后天线与原始天线相比,波束宽度略宽,但仍具有良好的定向性,保持了原始天线良好的辐射性能。优化后天线的实测结果与仿真结果基本一致,误差来源主要是天线加工精度存在一定误差。其中,在 7,9,11 GHz 频点下原始天线与优化后天线的 E 面(左)和 H 面(右)归一化方向图对比如图 12 所示。

4.3 RCS 对比

原始天线与优化后天线在不同入射角下的 RCS 对

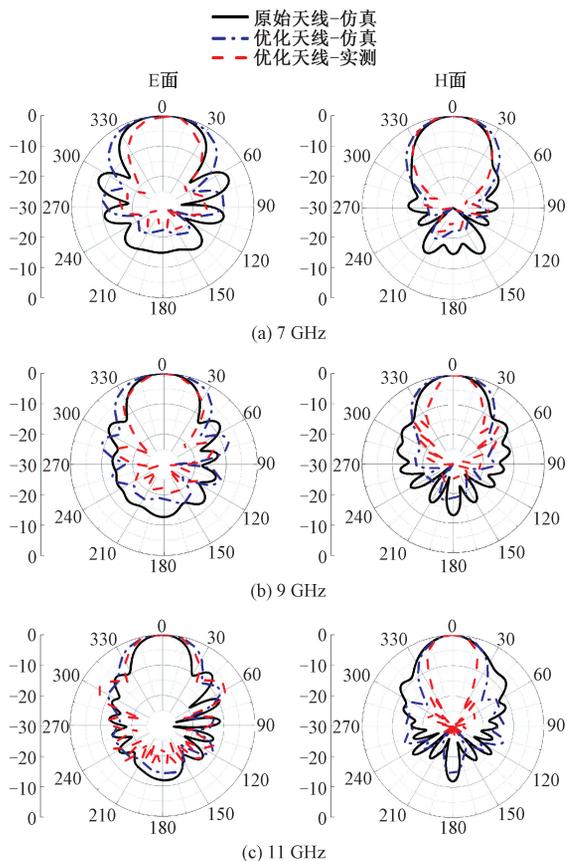


图 12 天线的辐射方向图比较

Fig. 12 Comparison of radiation patterns of antennas

比如图 13 所示。实验结果表明,当入射角 $\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$ 时,RCS 缩减效果最好,在 5.2~11 GHz 范围内,RCS 都有较为明显的缩减,其中,在 8.4 GHz 时缩减量最大,最大缩减量达到 18.5 dB,根据式(8)计算得出,雷达探测距离减小 66%;当入射角 $\theta=10^\circ, \varphi=0^\circ$ 时,在 5.4~9.7 GHz 范围内,RCS 都有较为明显的缩减,其中,在 8.4 GHz 时缩减量最大,最大缩减量达到 18.4 dB,雷达探测距离减小 65%。可以看出,随着入射角度增大,缩减效果减小,当入射波垂直入射时缩减效果最好。

对原始天线与优化后天线在不同频率下的 RCS 的分析结果表明,在每个工作频点下,当入射波 $\theta=90^\circ, \varphi$ 在 $0\sim 180^\circ$ 的角域内变化时,优化后天线的单站 RCS 基本都低于原始天线,主辐射方向下的 RCS 有明显缩减。其中,7、9 和 11 GHz 频点下的原始天线和优化后天线在入射波 $\theta=90^\circ, \varphi$ 在 $0\sim 180^\circ$ 的角域内变化时的单站 RCS 对比如图 14 所示。

文中提出的天线与上文中部分参考文献中天线的性能比较如表 1 所示。通过对比可以得出,相比于其他天线,文中设计的天线具有较小的尺寸、良好的增益和更大的 RCS 缩减。其中,天线的尺寸与文献[14]相近,与文献

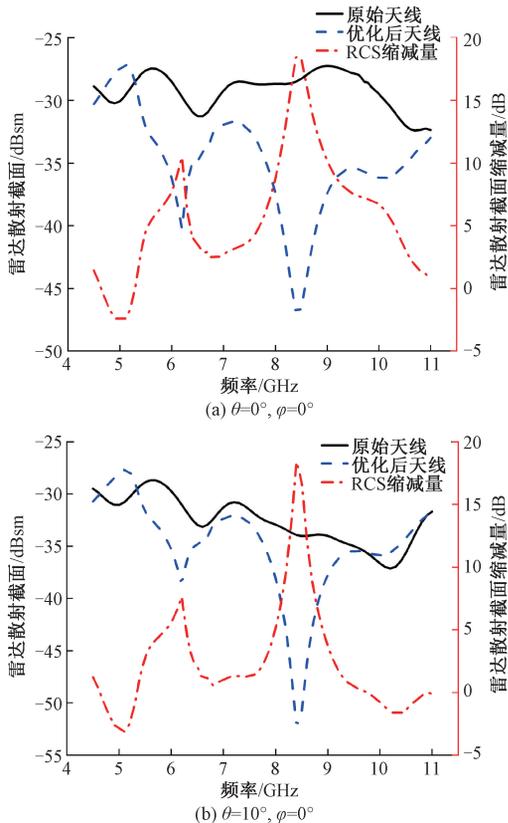


图 13 原始天线与优化后天线的单站 RCS 特性曲线

Fig. 13 Monostatic RCS characteristic curve of original antenna and optimized antenna

[15] 相比更小;增益与文献[14]相比提高了 4.7 dBi,与文献[15]相同;RCS 缩减量与文献[14]相比增加了 8.5 dB,与文献[15]相比增加了 7.5 dB。

表 1 本文所提天线与其他天线的参数比较

Table 1 Comparison of parameters between the proposed antenna and other antennas

| 文献 | 尺寸/mm ² | 带宽/GHz | 增益/dBi | RCS 缩减量/dB |
|------|--------------------|--------|--------|------------|
| [14] | 60×40 | 4~12 | 6.3 | 10 |
| [15] | 88×52 | 7~11 | 11 | 11 |
| 本文 | 66×39 | 4.7~11 | 11 | 18.5 |

5 结论

本文设计了一种低 RCS 的超宽带高增益 Vivaldi 天线,通过缩小天线尺寸、在天线表面辐射电流较弱的区域蚀刻矩形槽加半圆形槽的异形结构槽线的方法,有效地实现了工作频段内的 RCS 缩减。该天线在 4.7~11 GHz 频率范围内反射系数均小于 -10 dB,具有良好的阻抗特性,RCS 最大可以缩减 18.5 dB,同时,本文使用的改变天

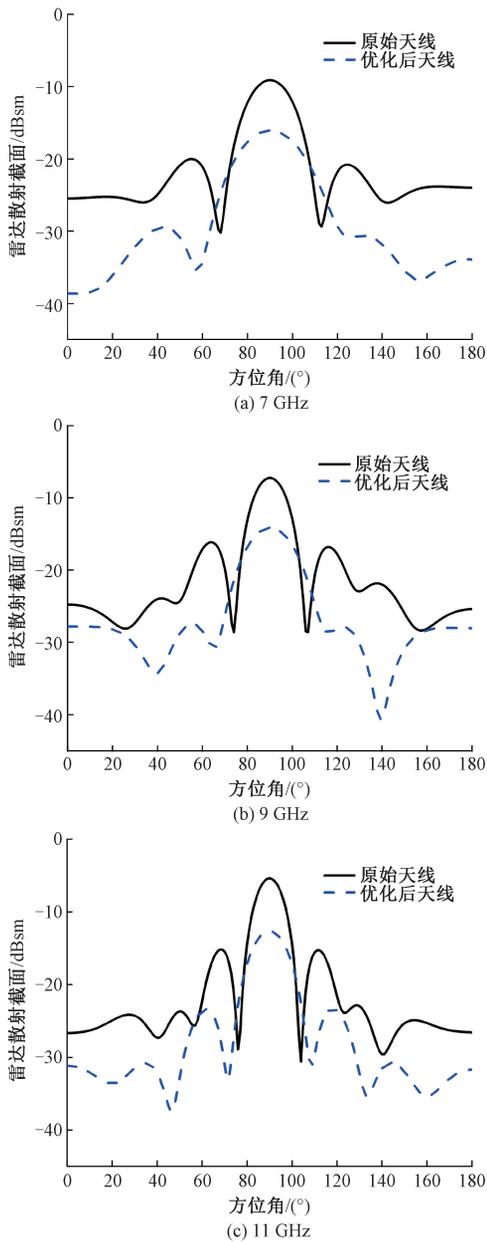


图 14 原始天线与优化后天线不同频率的单站 RCS 对比

Fig. 14 Comparison of monostatic RCS of original antenna and optimized antenna at different frequencies

线外形以降低 RCS 的方法对天线的辐射性能影响不大, 天线具有良好的定向性, 工作频段内最高增益为 11 dBi。实验证明, 与已有天线相比, 本文设计的天线具有较小的尺寸、较高的增益和较大的 RCS 缩减量, 较好地解决了天线良好的辐射性能与低 RCS 之间的矛盾。该天线可应用于飞行器机头的机载火控系统及其他隐身系统, 有利于提高飞行器的隐身性能。但本文设计的隐身 Vivaldi 天线针对不同角度 RCS 缩减仍有较大限制, 需要进一步研究。

参考文献

- [1] 马松辉, 芦永超, 刘可佳, 等. 基于小型无人机的高精度天线测试方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 36-42.
MA S H, LU Y CH, LIU K J, et al. Accurate antenna measurement method based on micro UAV [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 36-42.
- [2] 王冰瑞, 于亚楠. 多普勒天气雷达天线扫描速度提高前后的数据分析与对比 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6): 42-48.
WANG B R, YU Y N. Analysis and comparison of the data of Doppler weather radar with it's antenna scan speed increased [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(6): 42-48.
- [3] 李晓今, 郭先松, 李记任, 等. 一种超宽带, 低交叉极化, 低剖面的相控阵天线单元设计 [J]. 电子测量技术, 2019, 42(21): 5-9.
LI X J, GUO X S, LI J R, et al. Design of an ultra-wideband, low cross polarization, low profile phased array antenna element [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(21): 5-9.
- [4] YU J, JIANG W, GONG S X. Low-RCS beam-steering antenna based on reconfigurable phase gradient metasurface [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(10): 2016-2020.
- [5] 田韵, 侯灿靖, 李爱琴. 改进的着陆引导雷达天线角基准校准仪 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(12): 117-124.
TIAN Y, HOU C J, LI AI Q. Improved calibrator for antenna angular reference of landing guidance radar [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(12): 117-124.
- [6] YIN Z F, HE G Q, YANG X X, et al. Miniaturized ultra-wideband half-mode vivaldi antenna based on mirror image theory [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(4): 695-699.
- [7] LEI S, WU S R, LIU G, et al. High-gain UWB vivaldi antenna loaded with reconfigurable 3-D phase adjusting unit lens [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 19(2): 322-326.
- [8] MUNIYASAMY A, RAJAKANI K. UWB radar cross section reduction in a compact antipodal vivaldi antenna [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2018, 99: 369-375.
- [9] NATARAJAN R, KANAGASABAI M, GEORGE J V. Design of an X-band Vivaldi antenna with low radar cross section [J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2016, 10(6): 651-655.

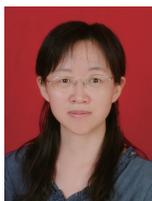
- [10] REN J Y, GONG S X, JIANG W. Low-RCS monopolar patch antenna based on dual-ring metamaterial absorber[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(1):102-105.
- [11] ZHANG Z, YANG S, MA Y, et al. Scattering control of wideband phased arrays using metamaterial absorbers[C]. 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2020: 1-3.
- [12] XING W, HONG T, JIANG W, et al. UWB Vivaldi array using frequency selective surface for low RCS applications [C]. 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). IEEE, 2016: 474-475.
- [13] HUANG X, ZHAO Z, WAN G. A slotted frequency selective surface with its application in microstrip antenna RCS reduction [C]. 2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics Technology (ICET). IEEE, 2020: 724-728.
- [14] RAJESH N, MALATHI K, RAJU S, et al. Design of Vivaldi antenna with wideband radar cross section reduction [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(4):2102-2105.
- [15] KHAN T A, LI J, LI Z, et al. Design of a Vivaldi antenna with wideband reduced radar cross section[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2018, 95:47-51.
- [16] ZHANG P, LI J. Compact UWB and low-RCS Vivaldi antenna using ultrathin microwave-absorbing materials[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16:1965-1968.
- [17] FAN J, NIE Z. A novel design of Vivaldi antenna for low RCS [C]. 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), 2020.
- [18] 王蒙蒙, 王学田, 高洪民, 等. S 波段高增益 Vivaldi 天

线设计[J]. 微波学报, 2020, 36(S1):105-108.

WANG M M, WANG X T, GAO H M, et al. Design of S-band high gain Vivaldi antenna [J]. Journal of Microwave, 2020, 36(S1):105-108.

- [19] JIA Y T, LIU Y, WANG H, et al. Low-RCS, high-gain, and wideband mushroom antenna [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2015, 14:277-280.
- [20] ROSE P S, ROBINSON A C, KINGHORN T. A novel, graphical representation of the classical radar range equation[C]. 2020 IEEE International Radar Conference (RADAR), 2020.

作者简介



王丽黎, 1990 年于北京邮电大学获得学士学位, 2006 年于西安理工大学获得硕士学位, 现为西安理工大学副教授, 主要研究方向为微波与天线系统、先进导航技术。
E-mail: wanglili@xaut.edu.cn

Wang Lili received her B. Sc. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 1990, M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2006. Now she is now an associate professor at Xi'an University of Technology. Her main research interests include microwave and antenna system, advanced navigation technology.



刘庆(通信作者), 2015 年于西安理工大学获得学士学位, 现为西安理工大学硕士研究生, 主要研究方向为超宽带 Vivaldi 天线。
E-mail: 18706751571@163.com

Liu Qing (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2015. Now she is a M. Sc. candidate at Xi'an University of Technology. Her main research interest includes UWB Vivaldi antenna.