

一种低剖面、低 RCS 兼具高增益特性的覆层微带天线设计

朱学文, 高 军, 曹祥玉✉, 郑月军, 张 迪
(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 设计了一种低剖面覆层微带天线,兼具高增益、低雷达散射截面积 RCS 特性。覆层单元上表面为加载集总电阻的方环贴片,具有吸波和部分反射特性,下表面为“十”字开槽的金属镀层,将覆层与上表面加载同相反射特性的 AMC 单元的原始微带天线一体化设计,因覆层厚度可作为部分反射路径以及加载同相反射 AMC 单元,极大降低剖面。另一方面覆层上表面与 AMC 单元形成 Fabry-Pérot 谐振腔,改善天线辐射特性。仿真与实测结果表明:相对于原始天线,该覆层天线在整体厚度只有 7 mm 的前提下,反射系数 $|S_{11}| < -10$ dB 带宽由原来的 13.84~15.24 GHz 稍频偏到 13.8~15.36 GHz;增益也得到较好的改善,在 14.40~15.42 GHz 增益提高了 3 dB 以上,最大提高增益 6.29 dB;天线在 6~17 GHz 频段内有不同程度 RCS 的减缩,在宽角域内实现了 RCS 减缩,其中 6 dB 减缩带宽为 8.86~13.56 GHz,最大减缩量为 14.8 dB。

关键词 Fabry-Pérot 谐振腔;低剖面;高增益;低 RCS

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.02.008

中图分类号 TN82 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)02-0044-07

A Low-Profile Superstratum Microstrip Antenna with High Gain and Low RCS

ZHU Xuewen, GAO Jun, CAO Xiangyu✉, ZHENG Yuejun, ZHANG Di
(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In this paper, a low-profile Superstratum Microstrip antenna with high gain and low RCS is designed. A metallic square loop loaded with resistors is mounted on the upper surface of the superstratum unit, which can absorb incoming radar wave to realize partly reflection. The integration of superstratum with the AMC-based antenna can greatly reduce the profile due to the partly reflection path of the superstratum and the in-phase reflection property of the AMC. Meanwhile, the upper surface of the superstratum and AMC can generate a Fabry-Pérot resonance to improve the radiation performance of the antenna. Through the integrated design of superstratum and the original antenna with the synthetic reflection AMC units on its upper surface, the patch on the upper surface of superstratum can generate a Fabry-Pérot resonance cavity with AMC units on the upper surface of antenna, applying to improve the radiation and scattering performances while reducing the profile. The simulation and measurement show that the $|S_{11}| <$

收稿日期: 2017-11-08
基金项目: 国家自然科学基金(61501494,61671464)
作者简介: 朱学文(1995—),男,内蒙古乌兰察布人,硕士生,主要从事人工电磁材料、超表面天线研究. E-mail:zhuxiaoshuai4088@163.com
通信作者: 曹祥玉(1964—),女,河南南阳人,教授,博士生导师,主要从事计算电磁学、天线与电磁兼容、电磁超材料研究.
E-mail:xiangyucaokdy@163.com

引用格式: 朱学文,高军,曹祥玉,等. 一种低剖面、低 RCS 兼具高增益特性的覆层微带天线设计 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(2): 44-50. ZHU Xuewen, GAO Jun, CAO Xiangyu, et al. A Low-Profile Superstratum Microstrip Antenna with High Gain and Low RCS [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(2): 44-50.

—10 dB bandwidth of the low-profile superstratum microstrip antenna is from 13.8~15.36 GHz, while the gain is higher than that of the original antenna at least 3 dBi from 14.40~15.42 GHz and its RCS is reduced significantly from 6 to 17 GHz. The 6 dB RCS-reduction bandwidth is from 8.86 to 13.56 GHz and the maximum reduction is 14.8 dB.

Key words: Fabry-Pérot resonance cavity; low-profile; high gain; low RCS

微带贴片天线因其具有剖面低,质量轻,易集成等优点^[1-3]在军事通信中得到了广泛的应用,但同时也存在着增益低、损耗大等劣势。而随着隐身技术和反隐身技术的相互博弈发展,隐身技术的优劣直接关系到武器装备的突防能力和生存能力,各军事强国都极其重视隐身技术的发展。因此围绕如何提高天线辐射性能并降低其雷达散射截面(Radar Cross Section,RCS)的问题成为当前的研究热点。

近十几年来,新型人工电磁材料(Metamaterial,MTM)在电磁隐身、空间通信、探测技术和新型太赫兹波段等领域中被广泛使用,它是一种以周期或准周期方式排列的人造单元结构,具有自然界中已有材料所不具备的特殊电磁特性,从广义上来讲,早期的左手材料^[4]、频率选择表面(FSS)^[5]、电磁带隙结构^[6]和人工磁导体^[7]等,以及近几年出现的完美吸波体^[8]、表面等离子激元^[9]等均可划入 MTM 的范畴,可以改善天线的辐射和散射性能。文献[10]将频率选择表面作为地板,实现 RCS 的减缩;文献[11~12]利用各向异性 AMC 对入射波极化敏感的特点进行相位相消,实现了天线带内鼻锥方向 RCS 的减缩;文献[13]将频率选择表面作为覆层加载到孔径耦合微带天线上,拓展工作带宽,提高天线的辐射方向性。文献[14]提出了一种高增益圆极化介质谐振天线,通过将频率选择表面作为覆层进而形成 Fabry-Pérot 谐振腔,实现 8.5 dB 的增益提高;文献[15]将加载表面电阻的 FSS 结构引入天线覆层,在降低天线 RCS 的同时改善天线的辐射性能;文献[16]将加载表面电阻的 FSS 结构作为覆层,在降低 RCS 的同时,改善圆极化天线的辐射性能。文献[13~16]由于加载了覆层,增加了天线的剖面,那么如何在改善覆层天线辐射和散射性能的同时,降低覆层天线的剖面是当前研究的难题。

针对上述问题,本文提出了一种低剖面覆层天线,兼具高增益、低 RCS 等特点。其设计的关键之一是将覆层的上表面作为部分反射表面,覆层的厚度作为电磁波多次反射的路径,降低了中间空气层的高度。关键之二在于微带天线的表面加载具有同相反射的 AMC 单元,使其反射的路径降低为原来的一半,进一步实现了低剖面的效果。经过仿真和实验验证,天线 14.40~15.42 GHz 频段内增益提

高至少 3 dB,在 8.86~13.56 GHz 频段内,天线的 RCS 减缩至少 6 dB,有效地解决了覆层天线在低剖面的状况下辐射和散射性能的同时改善问题。

1 理论分析

将覆层的上表面同时作为吸波层和部分反射层是设计该低剖面覆层天线的关键之一。图 1 为覆层天线辐射原理图,根据射线理论^[17]和 Fabry-Pérot^[18]谐振腔模型原理可得:由于覆层的上表面与 AMC 金属单元形成谐振腔,辐射的电磁波在谐振腔内多次反射,辐射口径面变大,提高辐射性能。经直接透射和多次反射后透射的电磁波的相位差囊括 3 个部分:路径长度形成的相位差、部分反射层的反射相位差和同相反射 AMC 单元引起的反射相位差。

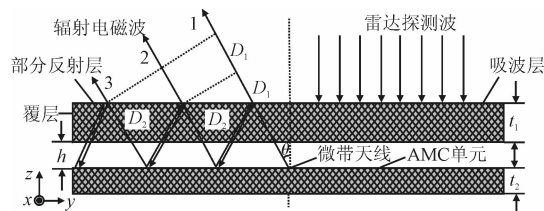


图 1 覆层天线辐射原理图

Fig. 1 Radiation mechanism of superstrate antenna

根据图 1 所示可得几何关系:

$$D_1 = 2(h + t_1)\tan\theta\sin\theta = 2(h + t_1)\left(\frac{1}{\cos\theta} - \cos\theta\right) \quad (1)$$

$$D_2 = \frac{h + t_1}{\cos\theta} \quad (2)$$

式中: D_1 为透射的电磁线 2 和电磁线 1 的路径差; D_2 为电磁线 2 被反射层反射后天线地板的路径; h 为覆层和加载 AMC 天线之间的高度; t_1 为覆层介质板的厚度; t_2 为辐射天线介质板的厚度; θ 角为偏离轴线的辐射方向,因此可得电磁线 2 与电磁线 1 的相位差为:

$$\Delta\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda}D_1 - \frac{4\pi}{\lambda}D_2 + \phi_r + \phi_d = \phi_r + \phi_d - \frac{4\pi}{\lambda}(h + t_1)\cos\theta \quad (3)$$

相应可得电磁线 3 与电磁线 1 的相位差为:

$$\Delta\phi_3 = \frac{2\pi}{\lambda}2D_1 - \frac{4\pi}{\lambda}2D_2 + 2\phi_r + 2\phi_d = 2(\phi_r + \phi_d - \frac{4\pi}{\lambda}(h + t_1)\cos\theta) \quad (4)$$

进而推出电磁线 n 与电磁线 1 的相位差为:

$$\Delta\phi_n = n - 1(\phi_r + \phi_d - \frac{4\pi}{\lambda}(h + t_1)\cos\theta) \quad (5)$$

式中: λ 为微带天线辐射电磁波的波长; ϕ_r 为电磁波经过覆层上表面反射的相位; ϕ_d 为经过 AMC 单元反射的相位。由此得出辐射电磁波的功率为:

$$P(\theta) = \frac{1 - R^2}{1 + R^2 - 2R\cos\phi} F^2(\theta) \quad (6)$$

式中: R 为反射幅度模值,当满足 $\phi = \phi_r - \phi_d - 4\pi h/\lambda + t_1\cos\theta = 2n\pi, n = 0, 1, \dots$ 时,即微带天线辐射的电磁波在多次反射后最终透射同相叠加,辐射才能增强。其最大的前向功率为:

$$P_{\text{forward}}(0) = \frac{1 + R}{1 - R} F^2(\theta) \quad (7)$$

从上述公式中可得: R 的值越大,前向功率越大,相应覆层天线的辐射增益越高。但在实际的仿真过程中发现,影响 R 的决定因素为覆层背面的“十”字开槽的宽度 W_2 ,若 W_2 越小,则辐射在覆层的上表面的电磁波越少,进而无法实现低剖面的效果,所以在实际仿真过程中要保证 R 的值在天线工作频段内约为 0.25~0.4 即可。

2 覆层结构分析与设计

2.1 覆层结构设计和分析

图 2 为覆层单元的结构示意图。覆层单元上表面为加载集总电阻方环贴片所构成的吸波和部分反射表面,单元的边长 $L = 12\text{ mm}$,贴片的边长 $L_1 = 8\text{ mm}$,其宽度 $W = 2.6\text{ mm}$,加载集总电阻的开口长 $L_2 = 1.6\text{ mm}$,宽 $W_1 = 1.2\text{ mm}$,电阻值大小 $300\text{ }\Omega$;介质板为厚度 $t_1 = 3\text{ mm}$ 的聚四氟乙烯玻璃板($\epsilon_r = 2.65, \tan\delta = 0.001$);下层为“十”字开槽的金属层,中间为长 $L_3 = 10.2\text{ mm}$,宽 $W_2 = 4\text{ mm}$ 的“十”字交叉的刻蚀槽,以保证单元有较好的吸波特性。这样的设计特点保证天线对不同角度和极化方向的电磁波有较好的稳定性。

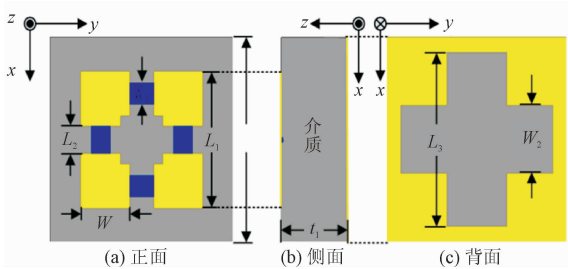


图 2 覆层单元结构图

Fig. 2 Geometry of superstrate unit

利用 HFSS14.0 软件中 Floquet 端口和主从边

界条件模拟覆层周期单元结构,图 3 给出了仿真模型示意图。图 4 为当电磁波由端口 2 入射时(电磁方向为 $-z$ 到 $+z$), x 、 y 极化下覆层的频率响应特性。由图可得,覆层的 2 种极化下频率响应特性基本一致,在 13.5~15.5 GHz 中,反射幅度均在 0.26 以上,保证了部分反射条件。

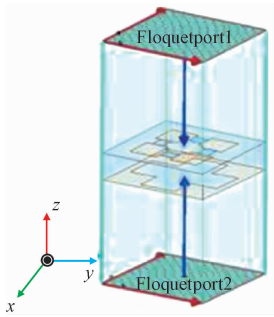


图 3 覆层周期单元仿真模型

Fig. 3 Simulation model of periodic unit

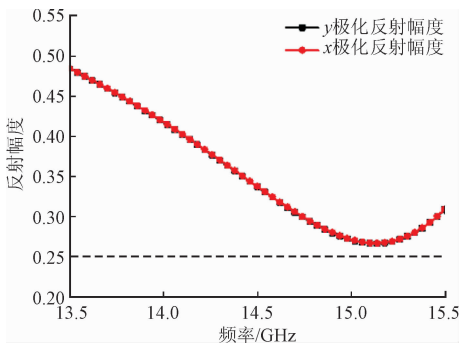


图 4 覆层周期单元 x 、 y 极化下反射幅度

Fig. 4 Reflection amplitude of unit under the x 、 y polarized electromagnetic waves

图 5、图 6 给出覆层结构吸波特性图,当雷达电磁波照射在覆层结构时,加载电阻的方环贴片吸收电磁波,其吸波率 P 可表示为:

$$P = 1 - |S_{21}|^2 - |S_{11}|^2 \quad (8)$$

由式(8)可得,当覆层的传输系数 S_{21} 和反射系数 S_{11} 越低,覆层吸波率越大,其减缩 RCS 的能力越显著。图 5 分别给出了在 4~18 GHz 频段内,覆层单元对辐射端口 1、2 辐射的 x 、 y 极化电磁波的吸波率,图中可知覆层单元在 5.78~10.3 GHz 频段内对 x 、 y 极化电磁波的吸波率达到 50% 以上。

图 6 为端口 1 在 x 极化平面波照射下覆层单元加载电阻前后表面电流示意图,左侧为未加载电阻,右侧为加载电阻后,可以得出未加载电阻时, x 极化方向的覆层方环表面激励起很强的电流,导致入射的雷达波的反射和传输较大;而加载电阻后,表面的电流强度明显减弱,雷达波的反射和传输得到了较好的抑制,说明覆层方环上电阻的吸波能力明显。

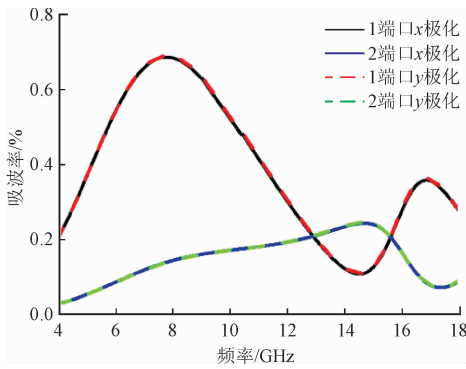


图 5 覆层单元吸波率

Fig. 5 Absorptivity of unit under x, y polarized electromagnetic waves at port 1 and 2

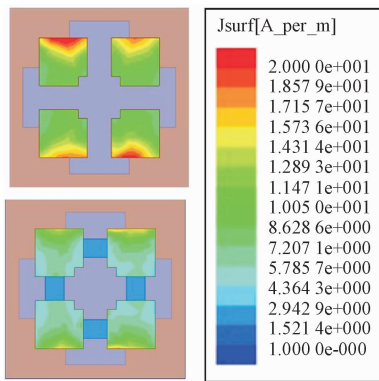


图 6 覆层单元表面电流分布

Fig. 6 Current distribution on the surface of unit

2.2 AMC 单元设计与分析

本文设计的同相反射 AMC 单元是降低剖面的第 2 个关键所在,图 7 为单元在商业软件 Ansoft HFSS 14.0 中仿真示意图。AMC 单元的边长为 12 mm,厚 $t_2 = 2$ mm,上表面为金属贴片,中间挖空的方环边长 $L_4 = 6.1$ mm,宽 $W_4 = 1$ mm。

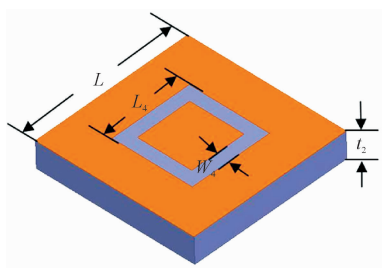


图 7 AMC 单元结构

Fig. 7 Geometry of AMC unit

同样使用软件中 Floquet 和主从边界对 AMC 单元进行仿真分析,图 8 给出了模型端口 1 处的反射相位图,图中可得 AMC 的零反射点在 14.58 GHz,这与微带天线辐射的中心频点重合,±90°相位带宽为 14.21~14.82 GHz,可满足同相反射所需的带宽。

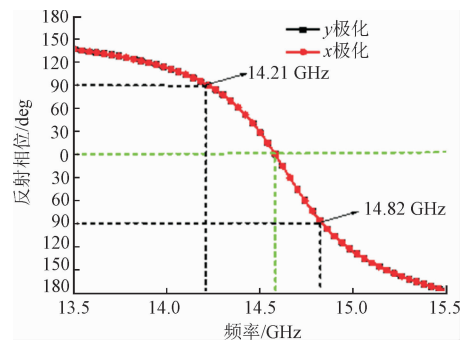


图 8 AMC 单元 x, y 极化下反射相位

Fig. 8 Reflection phase of AMC unit under x, y polarized electromagnetic waves

3 加载覆层和 AMC 单元后天线性能分析

3.1 天线性能的优化和验证

选用微带贴片天线作为激励源,将上述的覆层单元、AMC 单元与微带天线一体化设计,图 9 为设计的结构和仿真模型。

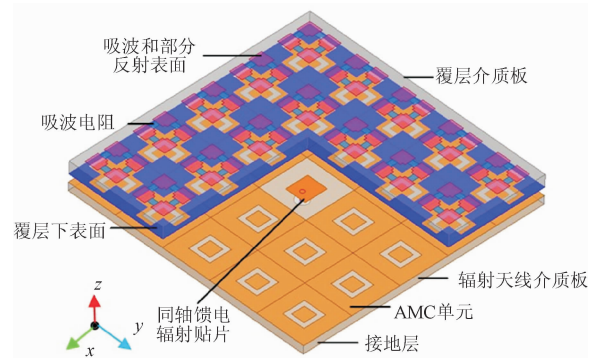


图 9 覆层整体结构

Fig. 9 Overall structure of the superstrate antenna

此时,当微带天线的谐振频率、覆层单元以及 AMC 单元的设计结构固定后,影响天线辐射性能的关键为覆层与原始天线之间的高度 h ,由于其谐振的条件需满足 $\phi = 2n\pi$,可得公式:

$$F = \frac{c}{4\pi(h + t_1)}(\phi_r + \phi_d - 2n\pi) \quad (9)$$

式中: F 为天线的谐振频率。为了实现覆层天线的低剖面, n 取值为 0,AMC 的反射 0°相位点与天线的中心频率基本重合,覆层对在中心频点辐射电磁波的反射相位仿真计算约为 164°,由此近似计算出 h 的初始值为 2 mm,在此基础上对 h 进一步优化。

图 10、图 11 为不同加载 h 下低剖面覆层天线、原始微带天线的 S_{11} 带宽和增益曲线,如图可知,加载覆层和 AMC 单元后,随着 h 的增大,低剖面覆层天线的谐振频率逐渐向低频移动。当 $h = 2$ mm 时,天线性能较好,增益改善明显,所以最优高度为 2 mm。

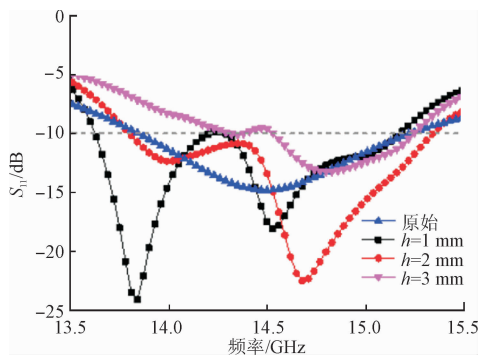


图 10 不同 h 下天线 S_{11} 带宽

Fig. 10 Impedance bandwidth of S_{11} with different values of h

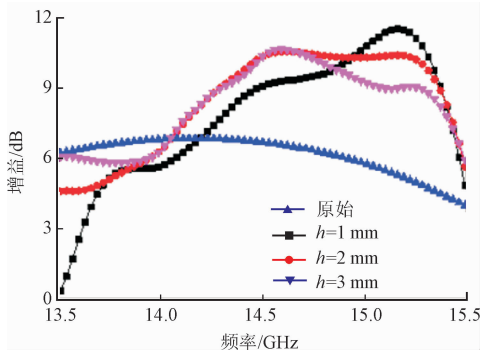


图 11 不同 h 下天线增益曲线

Fig. 11 Gain curves with different values of h

对于天线散射性能的分析,仿真中分别用 x 、 y 极化的平面电磁波照射覆层天线和原始天线模拟入射雷达探测波,图 12 给出 x 、 y 极化下天线单站 RCS 减缩曲线,可知覆层天线在 6~17 GHz 频带内天线法线方向有不同程度的 RCS 的减缩,对于 x 极化波 6 dB 的 RCS 减缩带宽为 8.52~13.56 GHz,对于 y 极化波 6 dB 的 RCS 减缩带宽为 8.86~13.63 GHz,表明天线具有宽带的低 RCS 的特性。覆层 RCS 减缩带宽较覆层单元仿真的减缩带宽发生了偏移,其是由于覆层与微带天线之间产生了强烈的耦合效应以及微带天线在工作频带附近的产生了较强的模式项散射引起。此时覆层天线在 10.8 GHz 附近达到最大减缩量 14.8 dB,其中工作带宽内 RCS 值有所抬升,其目的是保证天线有较好的辐射性能。

图 13(a)、(b)分别给出了入射波频率为 10.8 GHz(RCS 减缩最大点)时 2 种极化平面波照射下的双站 RCS 随入射角 θ 的变化和斜入射照射下天线双站 RCS 随频率变化曲线图,从图 13(a)可得:较原始微带贴片天线,对于 x 极化入射波,低剖面覆层天线在 $\pm 28^\circ$ 和 $\pm (68^\circ - 90^\circ)$ 的角域内实现了 RCS 的 6 dB 有效减缩;对于 y 极化入射波,天线在 $\pm 29^\circ$ 的角域内实现了 RCS 的 6 dB 的有效减缩。

由图 13(b)可知,加载覆层的低剖面天线相对于原始天线,在 9~18 GHz 频段内 x 、 y 极化波斜入射下,覆层天线有明显的 RCS 的减缩,得益于覆层表面加载的吸波电阻以及天线整体低剖面的效果。通过上述仿真结果表明,覆层有较好的极化稳定性和宽角域吸波特性。

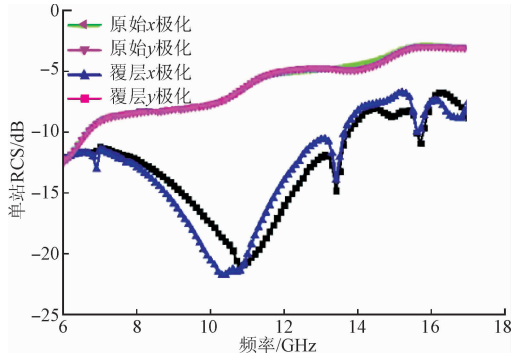


图 12 x 、 y 极化下天线 RCS 减缩曲线

Fig. 12 Monostatic RCS curves of original and superstrate antenna under x 、 y polarized electromagnetic waves

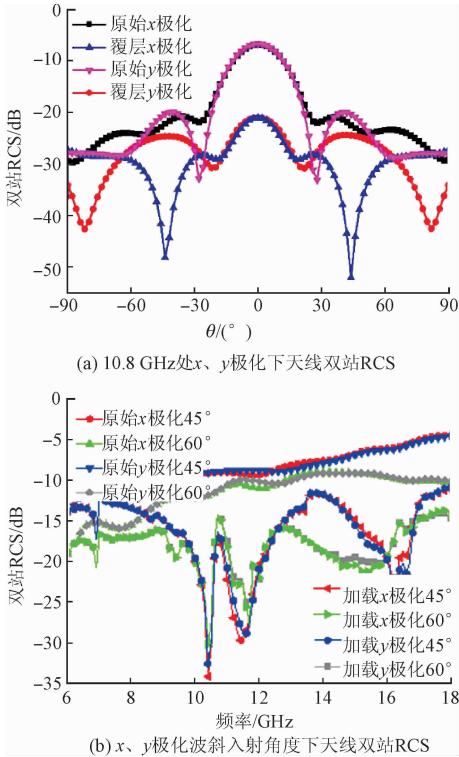


图 13 x 、 y 极化波下天线双站 RCS

Fig. 13 Bistatic RCS of antennas under x and y polarized EM waves

3.2 天线性能的加工及测量

如图 14 所示,为进一步验证低剖面覆层天线辐射性能,根据上述的设计结构加工天线实物。其中 (a)为覆层上表面,(b)为覆层下表面,(c)为加载 AMC 单元的微带天线,(d)为天线的整体结构,覆层板子由 4 个塑料柱支撑。图 15 给出天线的辐射测试环境示意图,使用 N5230C 矢量网络分析仪,分

别测量低剖面覆层天线和原始天线的 S_{11} 曲线和 E、H 面方向图。

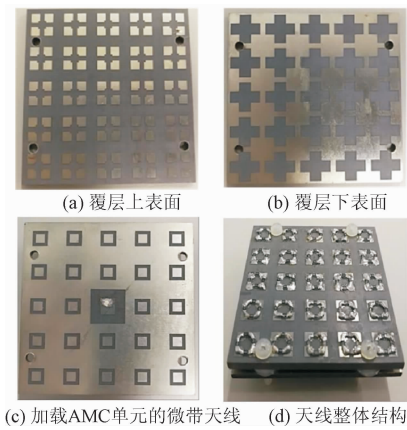


图 14 天线加工实物

Fig. 14 Fabricated sample of the superstrate antenna

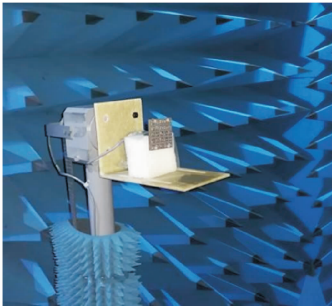


图 15 辐射测试环境示意图

Fig. 15 Radiation measuring environment

图 16 为天线的反射系数曲线。从图中可知,实测原始天线相对于仿真的 $|S_{11}| < -10$ dB 带宽由 13.84~15.24 GHz 偏移到 14.07~15.11 GHz,实测覆层天线相对于仿真的 $|S_{11}| < -10$ dB 带宽由 13.8~15.36 GHz 偏移到 13.79~15.13 GHz。

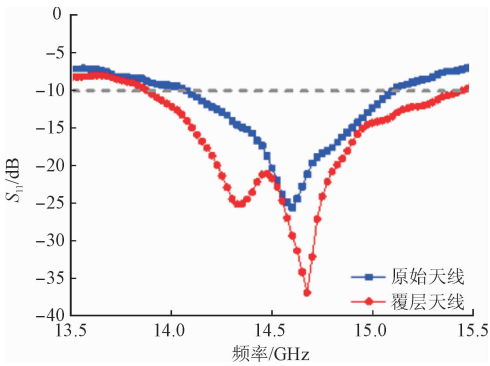
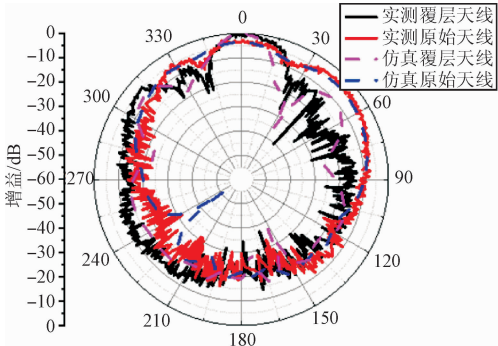


图 16 实测天线 S_{11} 参数

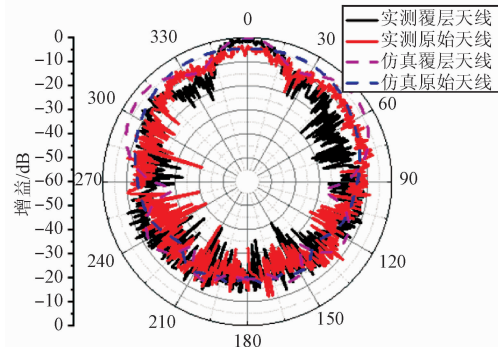
Fig. 16 Measured S_{11} parameter of the two antennas

图 17、18 分别给出覆层天线在 14.5 GHz 和 15 GHz 频点处 E、H 面归一化后实测和仿真方向图,可以得出,由于波束宽度的变窄,增益提高明显,14.5 GHz 处分别 E、H 面增益提高为 3.72 和 3.75 dB,15 GHz 处分别 E、H 面增益提高为 6.29 和

4.94 dB,进而说明了天线的定向性增强。实测与仿真结果较为吻合,存在的误差主要由加工误差和测试环境造成的。



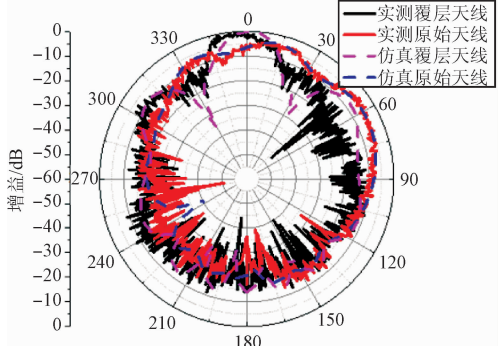
(a) E面



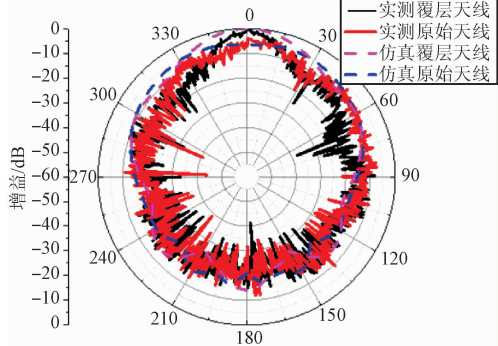
(b) H面

图 17 14.5 GHz 处辐射方向图

Fig. 17 Radiation pattern at 14.5 GHz



(a) E面



(b) H面

图 18 15 GHz 处辐射方向图

Fig. 18 Radiation pattern at 15 GHz

4 结论

本文设计了一个低剖面覆层微带天线兼具高增益、低 RCS 特性。通过将覆层的上表面同时作为吸波层和部分反射层,因覆层厚度可作为部分反射的路径,以及在原始微带天线周围加载同相反射的 AMC 单元进而极大降低覆层与辐射层之间高度,实现低剖面的效果。当整体天线的高度只有 7 mm 的前提下,相对于原始微带天线,该低剖面的覆层天线反射系数带宽由原来的 13.84~15.24 GHz 稍有频偏到 13.8~15.36 GHz;其增益也得到较好的改善,在 14.40~15.42 GHz 增益提高了 3 dB 以上,最大增益提高 6.29 dB;同时覆层天线的在 6~17 GHz 频段内有不同程度 RCS 的减缩,其 6 dB 减缩带宽为 8.86~13.56 GHz,最大减缩为 14.8 dB。本文的研究对于降低覆层天线的厚度,同时实现天线增益的提高,RCS 的减缩具有一定的借鉴的作用。

参考文献(References):

- [1] KATYAL A, BASU A. Compact and Broadband Stacked Microstrip Patch Antenna for Target Scanning Applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 381-384.
- [2] YANG X D, WEN G Y, SUN H C. Optimum Design of Wireless Power Transmission System Using Microstrip Patch Antenna Arrays [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1824-1827.
- [3] NAWAZ H, TEKIN I. Three Ports Microstrip Patch Antenna with Dual Linear and Linear Copolarisation Characteristics [J]. Electronics Letters, 2017, 53 (8): 518-520.
- [4] AMIRI N, FOROORAGHI K, ATLASBAF Z. A Wideband Uniplanar Polarization Independent Left-Handed Metamaterial [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10: 524-527.
- [5] ZHAO P C, ZONG Z Y, WU W, et al. An FSS Structure Based on Parallel LC Resonators for Multi-band Applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(10): 5257-5266.
- [6] KIM M, KAM D G. Wideband and Compact EBG Structure with Balanced Slots [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2015, 5(6): 818-827.
- [7] ZHAI H Q, ZHANG K D, YANG S, et al. A Low-Profile Dual-Band Dual-Polarized Antenna with an AMC Surface for WALN Applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2692-2695.
- [8] ZHONG Y K, FU S M, TU M H, et al. A Multimetal Broadband Metamaterial Perfect Absorber with

- Compact Dimension [J]. Photonics Journal, 2016, 8 (2): 1-10.
- [9] AGHADJANI M, MAZUMDER P. The Polarizer Controller Based on Cylindrical Spoof Surface Plasmon Polariton [J]. Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, 5(4): 556-563.
- [10] GENOVESI S, COSTA F, MONORCHIO A. Low Profile Array with Reduced Radar Cross Section by Using Hybrid Frequency Selective Surfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(5): 2327-2335.
- [11] ZHAO Y, CAO X Y, GAO J, et al. Broadband Low-RCS Metasurface and Its Application on Antenna [J]. Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(7): 2954-2962.
- [12] ZHAO Y, CAO X Y, GAO J, et al. A Low-RCS and High-Gain Slot Antenna Using Broadband Metasurface [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 290-293.
- [13] PIRHADI A, BAHRAMI H, NASRI J. Wideband High Directive Aperture Coupled Microstrip Antenna Design by Using a FSS Superstrate Layer [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 60 (4): 2101-2106.
- [14] AKBARI M, GUPTA S, FARAHANI M, et al. Gain Enhancement of Circularly Polarized Dielectric Resonator Antenna Based on FSS Superstrate for MMW Applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 64(12): 5542-5546.
- [15] 郑月军, 高军, 曹祥玉, 等. 一种兼具宽带增益改善和宽带、宽角度低雷达散射截面的微带天线 [J]. 物理学报, 2014, 63(22): 224102.
- ZHENG Y J, GAO J, CAO X Y, et al. A Broad-Band Gain Improvement and Wide-Band, Wide-Angle Low Radar Cross Section Microstrip Antenna [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(22): 224102. (in Chinese)
- [16] 丛丽丽, 付强, 曹祥玉, 等. 一种高增益低雷达散射截面的新型圆极化微带天线设计 [J]. 物理学报, 2015, 64(22): 224219.
- CONG L L, FU Q, CAO X Y, et al. A Novel Circularly Polarized Patch Antenna with Low Radar Section and High Gain [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(22): 224219. (in Chinese)
- [17] FERESIDIS A P, VARDAXOGLU J C. High Gain Planar Antenna Using Optimised Partially Reflective Surfaces [J]. IEE Proceedings-Microwaves Antennas and Propagation, 2001, 148(6): 345-350.
- [18] GE Y H, KARU P E, BIRD T S. The Use of Simple Thin Partially Reflective Surfaces with Positive Reflection Phase Gradients to Design Wideband, Low-Profile EBG Resonator Antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60 (2): 743-750.

(编辑: 徐楠楠)