

超表面的极化可重构天线

高宽亮¹, 杨群¹, 曹祥玉¹, 高军¹, 辛晓飞², 王帛²

(1.空军工程大学信息与导航学院,西安,710077;2.95985部队,河南开封,475001)

摘要 设计了一种基于超表面的极化可重构天线,该天线由缝隙微带天线及上层超表面组成。通过旋转改变超表面与缝隙微带天线相对位置,能够实现线极化、右旋圆极化、左旋圆极化等不同的极化工作方式。该天线在圆极化状态时,相对阻抗带宽达到32%,右旋和左旋圆极化时3dB轴比带宽均可达到14%;线极化状态时,相对阻抗带宽均可达到10%以上。为了验证仿真结果的有效性进行了天线实物的加工和测试,实测结果与仿真结果吻合较好,进一步验证了该天线具有良好极化可重构特性。

关键词 超表面;缝隙天线;极化可重构;圆极化;线极化

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.06.008

中图分类号 TN82 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)06-0038-04

A Polarization Reconfigurable Antenna with Metal-surface

GAO Kuanliang¹, YANG Qun¹, CAO Xiangyu¹, GAO Jun¹, XIN Xiaofei², WANG Bo²

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Unit 95985, Kaifeng 475001, Henan, China)

Abstract: In this paper, a polarization-reconfigurable antenna with metal-surface is proposed. The antenna consists of a metal-surface placed atop of a microstrip slot antenna and in direct contact with a microstrip slot antenna. By rotating operation to change the relative position of the metal-surface and slot antenna, the antenna can be reconfigured to realize linear polarization, right hand circular polarization (RHCP) and left hand circular polarization (LHCP). The results show that the impedance bandwidth can reach 32% and 10% in circular polarizations and linear polarization respectively; in right hand circular polarization and left hand circular polarization 3dB axial ratio bandwidth can both reach 14%. For verification of simulation results, the antenna is fabricated and measured and the measured results agree with the simulated well. Polarization reconfiguration for the antenna is demonstrated well.

Key words: metal-surface; slot antenna; polarization reconfiguration; circular polarization; linear polarization

可重构天线按功能可分为频率可重构、方向图可重构、极化可重构和多参数可重构天线^[1-3]。极化

可重构天线由于能增加独立的收发信道而不增加天线体积,尤其适用于体积受限的移动终端^[4]。而无

收稿日期:2015-03-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271100;61471389),陕西省自然科学基金基础研究项目(2012JM8003)

作者简介:高宽亮(1986—),男,宁夏固原人,硕士生,主要从事智能天线、微带圆极化天线等研究.Email:gaokuanl@163.com

引用格式:高宽亮,杨群,曹祥玉,等.超表面的极化可重构天线[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(6):38-41. GAO Kuanliang, YANG Qun, CAO Xiangyu, et al. A Polarization Reconfigurable Antenna with Metal-surface[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(6): 38-41.

线信号的多径衰落效应对许多无线通信系统的通信质量造成严重影响。利用极化可重构天线不仅可以消除多径衰落效应,还可以增加频率复用,所以极化可重构天线已成为可重构天线研究的一个热点。近年来,国内外对可重构天线的研究已取得了很大进展,有不少研究成果。在现有的大多数文献中,是增加额外直流偏置电路^[5-6],通过控制电路中的射频开关,如控制 PIN 二极管、微型芯片等,从而实现天线的极化重构。由于天线中射频开关及偏置电路的使用,使得天线体积增大,而且费用昂贵、加工难度大。另外电子元器件的性能将会直接对天线性能产生影响,天线中直流电路也会对天线性能产生影响。这类通过电路控制的极化可重构天线轴比带宽一般相对较窄,通常不足 5%。相比而言,通过机械控制也可以实现天线的极化重构。在机械控制极化重构天线中如何很好地控制天线形状及尺寸变化,是极化重构天线设计的难点,不易实现,目前关于机械控制极化重构天线的文献也并不多见。

超表面近年来成为人工电磁超材料研究的最新发展方向,它是一种超薄二维阵列平面,由亚波长(1/10λ)尺度的超材料结构单元周期或非周期的排列所构成。它可以灵活有效地操纵电磁波的相位、极化方式、传播模式等特性。通过超表面可以实现一系列新颖的物理效应,比如负折射、负反射、极化旋转、汇聚成像、复杂波束、传播波向表面波转化等等。文献[7]通过将一个单元长度为 1/13λ₀(λ₀为中心频率对应的波长)的 16 元周期结构的超表面放置在边长尺寸相等的缝隙天线上,使天线辐射波实现了由线极化向圆极化的转变。文献[8]将单元长度 1/17λ₀及边长为 λ₀×λ₀的 16 元周期结构的超表面分别放置在相同边长尺寸的缝隙天线和贴片天线上,不但使天线实现了由线极化向圆极化的转变,同时也使天线的阻抗和轴比带宽等都得到增加,增益等性能得到改善。文献[9]将一种单元长度为 1/8λ₀直径为 0.9λ₀的超表面放置在尺寸相同的缝隙天线上,天线也实现了圆极化的转变。

1 天线设计

图 1 天线由上下 2 层构成。下层源天线为缝隙微带天线,上层为超表面。缝隙天线采用同轴线背面馈电,地板有矩形的耦合缝隙,介质板上是一个矩形金属辐射贴片。超表面是由相同方形切角辐射单元构成。根据媒质等效理论和优化结果,最终设计的超表面单元长度为 1/10λ₀,直径为 0.78λ₀。将超表面放置在缝隙微带天线上,缝隙微带天线的

辐射贴片紧贴超表面背面。图 1 中旋转角度 θ 是指顺时针围绕天线中心点旋转超表面的角度值,当 θ = 0° 及 90° 时天线极化方式分别为右旋圆极化和左旋圆极化,且其性能基本一致,θ = 45° 及 135° 时均为线极化。本文所设计的天线上下 2 层介质均采用厚度 1.5 mm,介电常数为 4.3 的环氧玻璃布板。参数优化后的天线尺寸见表 1,其中 h、h₁ 分别为超表面和缝隙天线的厚度。

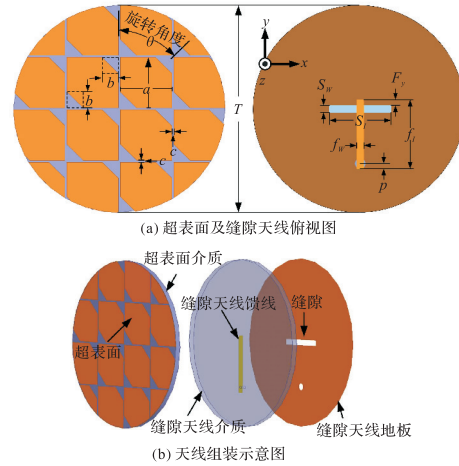


图 1 天线结构图

Fig.1 The antenna structure

表 1 天线尺寸

Tab.1 The value of each parameter mm

a	b	c	s _w	s _l	f _w	f _l	f _y	P	T	h	h ₁
17.6	5.6	0.6	2.5	21	2.5	24.5	2	1.25	72	1.5	1.5

2 理论分析

2.1 超表面等效电路分析

图 2 蓝色框内的部分可看作是超表面的一个基本单元。由于缝隙天线沿 y 轴是线极化,当超表面放在缝隙天线上时,超表面的电场 E 是沿 y 轴方向变化。可将超表面电场 E 分解成 2 个正交的分量 E₁ 与 E₂。当单元没有切角时,由于结构对称,正交分量 E₁ 与 E₂ 的等效电路可认为是相同的 RLC 电路。

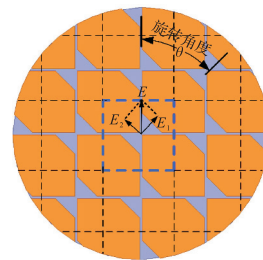


图 2 超表面单元结构及电场分解示意图

Fig.2 Metasurface unit structure and E-field development

电路的阻抗如下:

$$Z = 2R + j\omega(2L) + 1/j\omega C = R' + jX' \quad (1)$$

式中: R 和 L 分别代表每块贴片的电阻及电感值; C 表示由邻近 2 个对角单元之间缝隙而产生的电容。当单元有切角时, E_1 和 E_2 等效电路中的阻抗将不相等:

$$Z_1 = R'_1 + jX'_1 \quad (2) \quad Z_2 = R'_2 + jX'_2 \quad (3)$$

由于切角加宽了相邻对角之间的缝隙,使得 Z_1 中的阻抗值 X'_1 增大, Z_2 中的阻抗值 X'_2 减小。因此可通过改变切角值的大小来改变 Z_1 与 Z_2 的相位差。当超表面中 $|Z_1| = |Z_2|$, $\angle Z_1 - \angle Z_2 = 90^\circ$ 时,可得到 $|E_1| = |E_2|$ 及 $\angle E_1 - \angle E_2 = 90^\circ$, 因此天线可以实现圆极化。当 E_1 相位超前 E_2 相位 90° , 天线工作在右旋圆极化状态。而当超表面旋转 90° 时, E_2 相位超前 E_1 相位 90° , 天线工作在左旋圆极化状态。当超表面旋转 45° 或 135° 时, 超表面的基本单元关于 X 轴及 Y 轴是对称的, 等效电路的阻抗值也相等, 因此超表面的正交分量 E_1 与 E_2 等幅同相, 所以

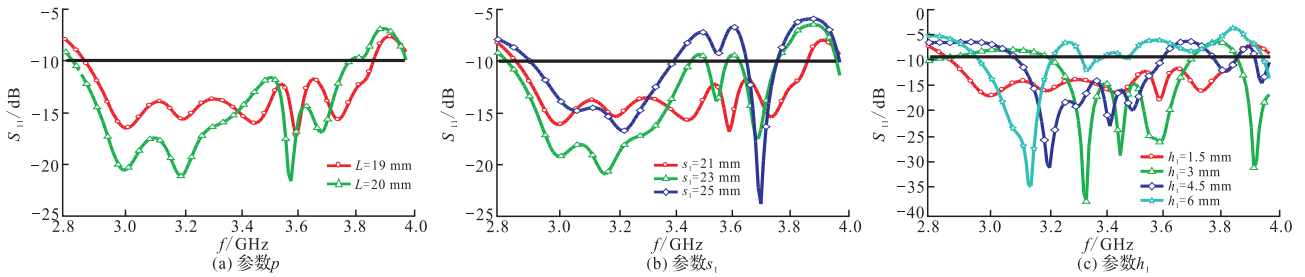


图3 缝隙天线参数优化

Fig.3 The Optimize of slot antennas dimensions

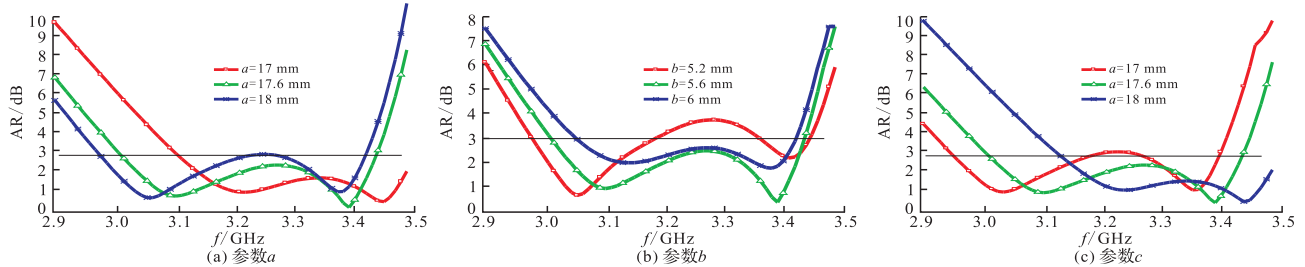
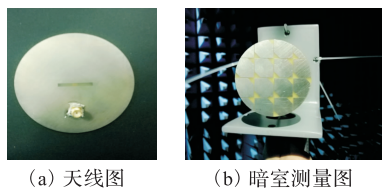


图4 轴比随参数变化

Fig.4 The impact on axial ratio bandwidth parameter

3 仿真计算与试验测试

图5为加工的天线实物和暗室测试图。分别就天线反射系数、轴比、增益的仿真和测试结果进行说明。



(a) 天线图 (b) 暗室测量图

图5 天线实物及测试

Fig.5 Prototype and measurement of the antenna

在 45° 及 90° 时天线工作在线极化状态。

2.2 分析设计

表2给出了天线优化前的参数,图3给出了阻抗带宽随参数 p, s_l, h_1 的变化曲线。

表2 参数优化前的天线尺寸

Tab.2 The value of each parameter before optimized mm

a	b	c	s_w	s_l	f_w	f_l	f_y	P	T	h	h_1
17.6	5.6	0.6	2.5	25	2.5	24.5	2	2.25	72	1.5	6

通过仿真分析发现,缝隙天线中馈电点位置 p 、耦合缝隙长度 s_l 、厚度 h_1 对天线阻抗带宽影响较大。同时也发现超表面的3个参数对天线轴比性能的影响最关键,分别是超表面的辐射单元长度 a , 切角边长 b , 以及单元间距 c 。本文以右旋圆极化为例,分析了上述3个参数对轴比的影响,如图4所示分别给出了轴比带宽随参数 a, b, c 的变化曲线。

3.1 反射系数 (S_{11})

图6分别给出了在不同旋转角度时反射系数 S_{11} 的仿真和实测曲线图。图6(a)是在旋转 0° 时,仿真带宽 ($S_{11} < -10$ dB) 为 $2.8 \sim 3.8$ GHz, 实测带宽为 $2.7 \sim 4$ GHz。图6(b)是在旋转 45° 时,仿真带宽为 $3.1 \sim 3.5$ GHz, 实测带宽为 $2.7 \sim 3.6$ Hz。图6(c)是在旋转 90° 时,仿真带宽为 $2.8 \sim 3.8$ GHz, 实测带宽为 $2.7 \sim 4$ GHz。图6(d)是在旋转 135° 时,仿真带宽为 $3.3 \sim 3.5$ GHz, 实测带宽为 $3.0 \sim 3.6$ Hz。由于天线结构对称,在 0° 和 90° 时右旋及左旋圆极化状态可互为镜像状态,在 45° 和 135° 时天线均工作线极化状态。

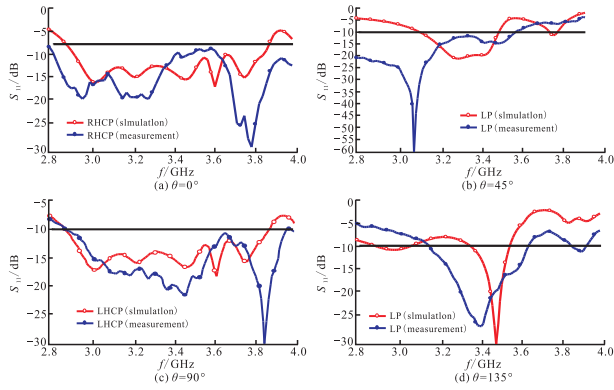


图 6 S₁₁ 的仿真和实测结果

Fig.6 Simulated and measured S₁₁

3.2 轴比 (AR)

图 7 给出了圆极化状态的轴比变化曲线,可以看出实测和仿真的结果吻合较好。图 7(a)和图 7(b)分别为旋转角度 0°和 90°时在右旋及左旋圆极化状态的轴比曲线。图 7(a)中仿真带宽 (AR < 3 dB) 为 3~3.45 GHz,相对带宽为 14%,实测带宽为 3.1~3.55GHz,由于加工精度误差等原因使轴比带宽向高频偏移 0.1 GHz。图 7(b)中仿真带宽为 3~3.45 GHz,相对带宽为 14%,实测为 3.05~3.55 GHz,向高频偏移 0.05 GHz,相对带宽为 15%。

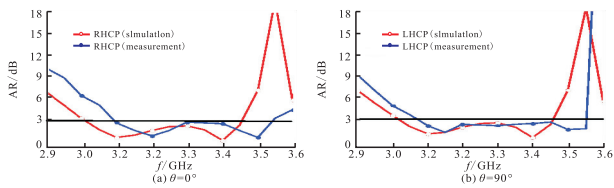


图 7 轴比的仿真和实测结果

Fig.7 Simulated and measured axial ratio

3.3 增益

图 8 给出了天线在不同旋转角度的增益曲线图。图 8(a)和图 8(c)是旋转角度分别为 0°及 90°时天线在右旋和左旋圆极化状态时的增益曲线。在圆极化工作带宽内的仿真和实测增益均大于 5dB,而交叉极化均在 -10 dB 以下。图 8(b)和 8(d)分别为旋转角度 45°和 135°时的轴比曲线,从图中可以看出天线仿真曲线分别在 3.55 GHz 和 3.85 GHz 处时是出现凹陷,增益下降,其他频点增益均在 4 dBi 及 5 dBi 以上。而实测结果中增益曲线的凹陷较小,图 8(b)中凹陷处的增益均在 2.5dBi 以上,其他频点处均在 6 dBi 以上。图 8(d)中实测曲线无凹陷,在整个工作带宽内增益均在 5 dBi 以上。

由于天线尺寸参数较多,加工精度及测量过程中也存在一定的误差,因此天线仿真与测量结果存在微小的偏差,但结果基本吻合。

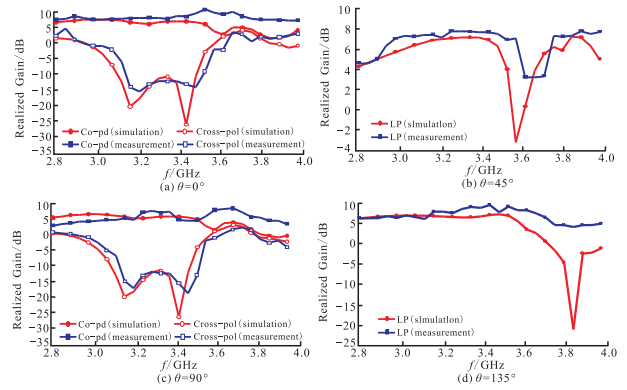


图 8 增益仿真和实测结果图

Fig.8 Simulated and measured realized gain

4 结语

本文提出一种基于超表面的极化重构天线,天线包括下层缝隙天线及上层超表面,通过中心旋转超表面就可得到不同的极化状态。仿真和实测结果表明,天线在圆极化状态时具有较宽的阻抗及轴比带宽,线极化时也有较宽的阻抗带宽,在工作频带内增益稳定性较好,进一步验证了该天线具有较好的极化重构特性。

参考文献 (References):

[1] Y J Sung, T U Jang, Y S Kim. A Reconfigurable Microstrip Antenna for Switchable Polarization[J]. IEEE Microw Wireless Compon Lett, 2004, 14(11): 534-536.

[2] O H Karabey, S Bildik, S Bausch, et al. Continuously Polarization agile Antenna by Using Liquid Crystal-based Tunable Variable Delay Lines [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2013, 61(1): 70-76.

[3] 陈铁博, 熊永昌, 张福顺, 等. 极化可变可重构微带天线[J]. 微波学报, 2008, 24(1): 40-41.

CHEN Yibo, JIAO Yongchang, ZHANG Fushun, et al. A Reconfigurable Microstrip Antenna with Switchable Polarization [J]. Journal of Microwaves, 2008, 24(1): 40-41. (in Chinese)

[4] Fazel F, Alfred G, Jafakhani H, et al. Space-time-state Block Coded MIMO Communication Systems Using Reconfigurable Antennas [J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Lett, 2009, 8(12): 6019-6028.

[5] A G, Besoli, F De Flaviis. A Multifunctional Reconfigurable Pixelated Antenna Using MEMS Technology on Printed Circuit Board [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2011, 59(12): 4413 - 4424.

[6] S Raman, P Mohanan, N Timmons, et al. Microstrip fed Pattern and Polarization reconfigurable Compact Truncated Monopole Antenna [J]. IEEE Antennas Wireless Propag Lett, 2013, 12: 710-713.

[7] H L Zhu, K L Chung, X L Sun, et al. CP Metasurfaced Antennas Excited by LP Dources [C]// In Proc IEEE Antennas Propag Soc Int Symp (APSURSD), 2012: 1-2.

[8] H L Zhu, S W Cheung, K L Chung, et al. Linear to Circular Polarization Conversion Using Metasurface [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2013, 61(9): 4615-4623.

[9] H L Zhu, S W Cheung, K L Chung, et al. Design of Polarization Reconfigurable Antenna Using Metasurface [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2014, 62(6): 2891-2898.

(编辑: 姚树峰)