



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111430891 B

(45) 授权公告日 2021.09.21

(21) 申请号 202010178031.1

(22) 申请日 2020.03.13

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 111430891 A

(43) 申请公布日 2020.07.17

(73) 专利权人 华南理工大学

地址 510640 广东省广州市天河区五山路
381号

(72) 发明人 车文荃 杨琬 陈东旭 薛泉

(74) 专利代理机构 广州粤高专利商标代理有限公司 44102

代理人 何淑珍 江裕强

(51) Int. Cl.

H01Q 1/36 (2006.01)

H01Q 1/38 (2006.01)

H01Q 15/24 (2006.01)

H01Q 21/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 109888480 A, 2019.06.14

US 2019356058 A1, 2019.11.21

CN 2877062 Y, 2007.03.07

CN 109088165 A, 2018.12.25

CN 205723942 U, 2016.11.23

CN 208315745 U, 2019.01.01

CN 110459864 A, 2019.11.15

CN 109088165 A, 2018.12.25

CN 109841965 A, 2019.06.04

CN 209401832 U, 2019.09.17

CN 108767489 A, 2018.11.06

CN 109904584 A, 2019.06.18

CN 108493593 A, 2018.09.04

CN 104584326 A, 2015.04.29

CN 110148829 A, 2019.08.20

CN 108767446 A, 2018.11.06

审查员 范巧音

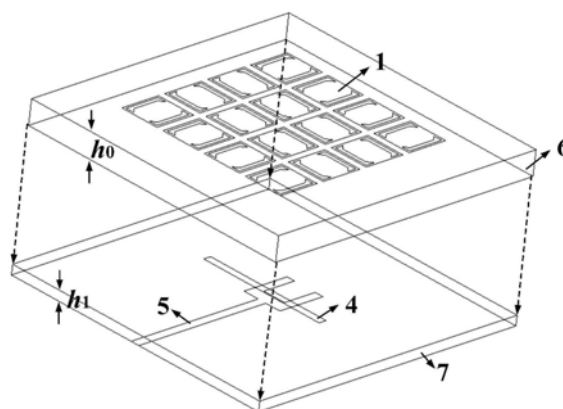
权利要求书1页 说明书6页 附图8页

(54) 发明名称

一种基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线

(57) 摘要

本发明公开了一种基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线。所述天线包括采用双层叠放方式放置的上层介质基板和下层介质基板；上层介质基板上表面印制有极化相关超表面结构，下表面印制有开有耦合缝隙的金属地板；下层介质基板上表面与金属地板贴合，下表面印制有馈电网络；能量由馈电网络输入，经金属地板上的耦合缝隙耦合到具有多谐振特性的极化相关超表面结构将能量定向地向上辐射，实现基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线。和经典的微带贴片天线相比，本发明能在实现低剖面的同时达到较宽的带宽和较高的增益。与周期超表面天线相比，本发明在保证了一定周期性的同时，提高设计自由度。本发明天线结构简单，加工容易，可以大规模生产。



1. 一种基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线,其特征在于,包括上层介质基板(6)和下层介质基板(7),上层介质基板(6)和下层介质基板(7)采用双层叠放方式放置;

上层介质基板(6)上表面印制有极化相关超表面结构(1),下表面印制有开有耦合缝隙(4)的金属地板(3);下层介质基板(7)上表面与金属地板(3)贴合,下表面印制有馈电网络(5);

所述极化相关超表面结构(1)呈中心对称,由若干个独立的极化相关超表面单元(2)和极化相关超表面单元(2)之间的窄型缝隙(8)构成;所述极化相关超表面结构(1)中的各行的极化相关超表面单元(2)沿着不同方向排列,在与耦合缝隙(4)垂直的方向上,由中心向外呈不同取向排列,为横纵向交叠规律排列或纵横向交叠规律排列;每个极化相关超表面单元(2)为具有轴对称且非中心对称的金属贴片;

能量由馈电网络(5)输入,经金属地板(3)上的耦合缝隙(4)耦合到具有多谐振特性的极化相关超表面结构(1),极化相关超表面结构(1)将能量定向地向上辐射,实现基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线。

2. 根据权利要求1所述的一种基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线,其特征在于,所述金属贴片的形状采用开缝的方形、开缝的圆形、矩形或者椭圆形。

3. 根据权利要求2所述的一种基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线,其特征在于,通过构建极化相关超表面单元(2),利用其极化相关特性,将不同取向的极化相关超表面单元(2)按照横纵向交叠规律排列或纵横向交叠规律排列,使得不同取向的极化相关超表面单元(2)在不同的谐振频点处被激励,实现具有多谐振特性的极化相关超表面结构(1)。

4. 根据权利要求1所述的一种基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线,其特征在于,所述金属地板(3)中心开有耦合缝隙(4),用于耦合所述具有多谐振特性的极化相关超表面结构(1),并使其将能量进行辐射;所述耦合缝隙(4)的形状包括矩形、阶梯状矩形或者梯形。

5. 根据权利要求4所述的一种基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线,其特征在于,选取耦合缝隙(4)的激励方式,使得具有多谐振特性的极化相关超表面结构(1),结合耦合缝隙(4)本身的谐振频点,从而形成多谐振,使带宽达到40%以上。

6. 根据权利要求1所述的一种基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线,其特征在于,所述馈电网络(5)包括微带金属片,用于耦合所述金属地板(3)上的缝隙(4)进行馈电,从而进一步使得极化相关超表面结构(1)将能量进行辐射;其中,所述微带金属片的形状包括Y型、矩形、阶梯状矩形。

一种基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线

技术领域

[0001] 本发明涉及超表面天线领域,具体涉及一种基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线。

背景技术

[0002] 随着现代无线通信系统的发展,宽带天线的需求日益增加。微带贴片天线由于其剖面低、重量轻、成本低,易于与印刷电路兼容等优点而受到广泛关注。但是,传统的微带贴片天线阻抗带宽较窄,虽然目前有许多技术可以克服这一缺点,比如利用电容探针馈电(H.W.Lai,K.M.Luk,“Design and study of wide-band patch antenna fed by meandering probe”,IEEE Trans.Antennas Propag.,vol.54,pp.564-571,2006.),L探针馈电(K.-F.Lee,K.-F.Tong,“Microstrip patch antennas-basic characteristics and some recent advances”,Proc.IEEE,vol.100,no.7,pp.2169-2180,Jul.2012.),孔径耦合,U/E开槽贴片(M.Khan,D.Chatterjee,“Characteristic mode analysis of a class of empirical design techniques for probe-fed U-slot microstrip patch antennas”,IEEE Trans.Antennas Propag.,vol.64,no.7,pp.2758-2770,Jul.2016.)和堆叠贴片(E.Nishiyama and M.Aikawa,“Wide-band and high-gain microstrip antenna with thick parasitic patch substrate”,Proc.IEEE Antennas Propag.Soc.Int.Symp.(APSURSI),vol.1.Jun.2004,pp.273-276.)等,但通常需要介电常数较低的厚介质基板,难以实现低剖面。

[0003] 近年来倍受关注的超表面天线,采用周期性的贴片单元,可以在实现低剖面的同时达到较宽的带宽和较好的辐射性能。W.Liu等人提出了口径耦合的超表面天线(W.Liu,Z.N.Chen,X.Qing,“Metamaterial-based low-profile broadband aperture-coupled grid-slotted patch antenna”,IEEE Trans.Antennas Propag.,vol.63,no.7,pp.3325-3329,Jul.2015.W.Liu,Z.N.Chen,X.Qing,“Metamaterial-based low-profile broadband mushroom antenna”,IEEE Trans.Antennas Propag.,vol.62,no.3,pp.1165-1172,Mar.2014.),在剖面仅为 $0.06\lambda_0$ 时,阻抗带宽达到28%。这一性能和传统的微带贴片天线相比,虽然剖面大大降低,但带宽优势并不明显。目前的超表面天线基本采用结构完全对称的单元形式进行周期性排列,例如方形、方环、圆形等结构,不仅实现的带宽比较有限(<35%),设计自由度也比较局限。

发明内容

[0004] 为了克服现有技术存在的缺点与不足,本发明提供一种基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线,通过合理优化极化相关超表面单元的结构排布,实现具有多谐振特性的超表面辐射结构。本发明能在较低的剖面下实现宽带、平稳高增益的超表面天线。

[0005] 本发明的目的至少通过如下技术方案之一实现。

[0006] 一种基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线,包括上层介质基板和下层介质

基板,上层介质基板和下层介质基板采用双层叠放方式放置;

[0007] 上层介质基板上表面印制有极化相关超表面结构,下表面印制有开有耦合缝隙的金属地板;下层介质基板上表面与金属地板贴合,下表面印制有馈电网络;

[0008] 能量由馈电网络输入,经金属地板上的耦合缝隙耦合到具有多谐振特性的极化相关超表面结构,极化相关超表面结构将能量定向地向上辐射,实现基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线。

[0009] 进一步地,所述极化相关超表面结构呈中心对称,由若干个独立的极化相关超表面单元和极化相关超表面单元之间的窄型缝隙构成;所述极化相关超表面结构中的各行的极化相关超表面单元沿着不同方向排列,在与耦合缝隙垂直的方向上,由中心向外呈不同取向排列,为横纵向交叠规律排列或纵横向交叠规律排列。

[0010] 进一步地,每个极化相关超表面单元为具有轴对称且非中心对称的金属贴片;所述金属贴片的形状采用开缝的方形、开缝的圆形、矩形或者椭圆形。

[0011] 进一步地,通过构建极化相关超表面单元,利用其极化相关特性,将不同取向的极化相关超表面单元按照横纵向交叠规律排列或纵横向交叠规律排列,使得不同取向的极化相关超表面单元在不同的谐振频点处被激励,实现具有多谐振特性的极化相关超表面结构。

[0012] 进一步地,所述金属地板中心开有耦合缝隙,用于耦合所述极化相关超表面结构并使其将能量进行辐射;所述耦合缝隙的形状包括但不限于矩形、阶梯状矩形、梯形。

[0013] 进一步地,选取耦合缝隙的激励方式,使得具有多谐振特性的极化相关超表面结构,结合耦合缝隙本身的谐振频点,从而形成多谐振,使带宽达到40%以上。

[0014] 进一步地,所述馈电网络包括微带金属片,用于耦合所述金属地板上的缝隙进行馈电,从而进一步使得极化相关超表面结构将能量进行辐射;其中,所述微带金属片的形状包括但不限于Y型、矩形、阶梯状矩形。

[0015] 相比于现有技术,本发明的优点在于:

[0016] 本发明首次采用极化相关超表面结构,根据其极化相关特性,将其沿着不同方向进行排列,实现具有多谐振特性的超表面辐射结构;

[0017] 本发明采用同一结构、不同取向的极化相关超表面单元,在保证一定周期性的同时,提高设计自由度;将具有多谐振特性的极化相关超表面辐射结构应用于天线设计中,并选取合适的馈电形式,从而实现具有低剖面、宽带、平稳高增益等特性的超表面天线。

[0018] 本发明采用缝隙耦合的馈电方式,激励不同取向的极化相关单元,进一步产生谐振点形成多谐振,从而进一步扩大带宽;

[0019] 本发明结构简单,加工容易,成本和重量都相对较小,可以大规模生产。

附图说明

[0020] 图1为基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线的结构示意图,其中,图1a为3D结构图,图1b为俯视图,图1c为仰视图,图1d为侧视图。

[0021] 图2为常见的中心对称的超表面单元结构与轴对称(非中心对称)的极化相关超表面单元的结构对比示意图,其中,图2a为中心对称的方形超表面单元结构的俯视图,图2b为本发明中的极化相关超表面单元结构的俯视图,图2c为两种超表面单元共同的侧视图。

[0022] 图3为基于图2的两种超表面单元结构的反射特性对比示意图,其中,图3a为反射相位曲线对比示意图,图3b为反射系数曲线对比示意图。

[0023] 图4为本发明的宽带低剖面超表面天线与用作参考的其它三种周期超表面天线的结构对比示意图,其中,图4a为常见的方形超表面天线,图4b为同一单元取向且均为纵向排布的极化相关超表面天线,图4c为同一单元取向且均为横向排布的极化相关超表面天线,图4d为本发明的基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线,其单元取向不一致,为横向、纵向交叠排布。

[0024] 图5为基于图4的四种天线的性能对比示意图,其中,图5a为 S_{11} 曲线对比示意图,图5b为增益曲线对比示意图。

[0025] 图6为本发明的基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线在各谐振点处的表面电流分布图,其中,图6a为4.96GHz处,图6b为5.98GHz处。

[0026] 图7为本发明的基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线在各谐振点处的电场幅度分布图,其中图7a为4.96GHz处,图7b为5.98GHz处。

[0027] 图8为单个缝隙天线的反射系数和增益曲线示意图。

[0028] 图9为本发明的基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线在各谐振点处的辐射方向图,其中图9a为5GHz处,图9b为6GHz处,图9c为7GHz处。

具体实施方式

[0029] 下面结合实施例及附图,对本发明作进一步地详细说明,但本发明的实施方式不限于此。

[0030] 实施例:

[0031] 如图1a、图1b、图1c、图1d所示,一种基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线,包括上层介质基板6和下层介质基板7,上层介质基板6和下层介质基板7采用双层叠放方式放置;

[0032] 所述上层介质基板6的介电常数为 $[2.2, 10.2]$,厚度 h_0 为 $[0.001\lambda_0, 0.1\lambda_0]$,下层介质基板7的介电常数为 $[2.2, 10.2]$,厚度 h_1 均为 $[0.001\lambda_0, 0.1\lambda_0]$,其中 λ_0 为自由空间波长;本实施例中,上层介质基板6的介电常数 ϵ_r 为3.55,厚度 h_0 为3.25mm;下层介质基板7的介电常数 ϵ_r 为3.55,厚度 h_1 为0.813mm;

[0033] 上层介质基板6上表面印制有极化相关超表面结构1,下表面印制有开有耦合缝隙4的金属地板3;下层介质基板7上表面与金属地板3贴合,下表面印制有馈电网络5;

[0034] 能量由馈电网络5输入,经金属地板3上的耦合缝隙4耦合到具有多谐振特性的极化相关超表面结构1,极化相关超表面结构1将能量定向地向上辐射,实现基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线。

[0035] 如图1b、图2b所示,所述极化相关超表面结构1呈中心对称,由若干个独立的极化相关超表面单元2和极化相关超表面单元2之间的窄型缝隙8构成;所述极化相关超表面结构1中的各行的极化相关超表面单元2沿着不同方向排列,在与耦合缝隙4垂直的方向上,由中心向外呈不同取向排列,为横纵向交叠规律排列或纵横向交叠规律排列;

[0036] 每个极化相关超表面单元2为具有轴对称且非中心对称的金属贴片;如图2b所示,本实施例中,金属贴片的形状采用开缝的方形。

[0037] 极化相关超表面结构1呈中心对称设置,由 $N \times N$ 个极化相关超表面单元2组成,其中 N 为大于2的整数;极化相关超表面单元2中的尺寸 W 为 $[0.05\lambda_0, 0.3\lambda_0]$;极化相关超表面单元2间的间距 g 为 $[0.001\lambda_0, 0.02\lambda_0]$;天线的整体尺寸 GL 为 $[0.3\lambda_0, 1.5\lambda_0]$,其中 λ_0 为自由空间波长。

[0038] 本实施例中,极化相关超表面结构1呈中心对称设置,由 4×4 个极化相关超表面单元2组成;极化相关超表面单元2采用开有弯折缝隙的方形金属贴片结构,其尺寸具体为: $W = 9\text{mm}$, $W_1 = 6.4\text{mm}$, $d_1 = 8\text{mm}$, $d_2 = 1.8\text{mm}$;极化相关超表面单元2的间距 g 为 1mm 。

[0039] 如图1b所示,本实施例中,通过构建极化相关超表面单元2,利用其极化相关特性,所述极化相关超表面结构1中的各行的极化相关超表面单元2按照横纵向交叠规律排列,使得不同取向的极化相关超表面单元2在不同的谐振频点处被激励,实现具有多谐振特性的极化相关超表面结构1。

[0040] 所述金属地板3中心开有耦合缝隙4,用于耦合所述极化相关超表面结构1并使其将能量进行辐射;如图1c所示,所述耦合缝隙4的形状为矩形。选取耦合缝隙4的激励方式,使得具有多谐振特性的极化相关超表面结构1,结合耦合缝隙4本身的谐振频点,从而形成多谐振,使带宽达到40%以上。

[0041] 金属地板3的大小 GL 为 $[0.3\lambda_0, 1.5\lambda_0]$;在金属地板3上所开的矩形的耦合缝隙4的整体长度 $2 \times L_{ss}$ 为 $[0.1\lambda_g, 0.8\lambda_g]$,宽 W_s 为 $[0.05\lambda_g, 0.5\lambda_g]$,其中 λ_g 为上层介质基板6的介质有效波长。

[0042] 本实施例中,金属地板3的大小 GL 为 60mm ;在金属地板3上所开的矩形的耦合缝隙4尺寸具体为: $L_{ss} = 14\text{mm}$, $W_s = 1.6\text{mm}$ 。

[0043] 所述馈电网络5包括微带金属片,用于耦合所述金属地板3上的缝隙4进行馈电,从而进一步使得极化相关超表面结构1将能量进行辐射;如图1c所示,本实施例中,所述微带金属片的形状为Y型。

[0044] Y-型的微带金属片长 s 为 $[0.1\lambda_{g1}, 0.8\lambda_{g1}]$,宽度 W_f 为 $[0.1\lambda_{g1}, 0.5\lambda_{g1}]$,其中 λ_{g1} 为下层介质基板7的介质有效波长。

[0045] 本实施例中,馈电网络5中Y-型的微带金属片的尺寸具体为: $W_f = 1.85\text{mm}$, $s = 9.6\text{mm}$ 。

[0046] 结合图1,所述极化相关超表面结构1呈中心对称设置,由 4×4 个极化相关超表面单元2和极化相关超表面单元2之间的窄型缝隙8构成;极化相关超表面单元2采用开有弯折缝隙的方形金属贴片结构,将极化相关超表面单元2沿着不同的方向,呈横纵向交叠规律排列,可以得到具有多谐振特性的极化相关超表面结构1。所述耦合缝隙4的作用在于耦合能量,以激励起上层的极化相关超表面结构1。此时,由于极化相关超表面结构1是由不同取向的极化相关超表面单元2组成的,那么不同取向的极化相关超表面单元2将分别在不同的谐振频点处被激励。耦合缝隙4本身产生的谐振点将与具有多谐振特性的极化相关超表面结构1产生的谐振点形成多个谐振频点,从而实现宽带特性。

[0047] 结合图2a、图2b、图2c,通过常见的方形超表面结构单元与本发明中的极化相关超表面结构1的对比,可以发现,常见的超表面结构通常为中心对称结构,而极化相关超表面结构1通常由具有轴对称且非中心对称的金属贴片构成,通常金属贴片的形状采用开缝的方形、开缝的圆形、矩形或者椭圆形等各种非中心对称形式。

[0048] 结合图3a、图3b,通过方形超表面结构与本发明的极化相关超表面结构的反射特性的对比,可以发现,与通常超表面结构不同的是,本发明的极化相关超表面结构1具有极化相关特性,即其反射相位与入射波的极化状态相关,在不同极化波的入射下,其反射特性不同;具体为:当入射波为x极化时,极化相关超表面结构1在6GHz左右反射相位为 0° ,此时超表面结构产生谐振;当入射波为y极化时,极化相关超表面结构1在5.05GHz左右反射相位为 0° ,此时超表面结构产生谐振。

[0049] 结合图4和图5a、图5b,可以发现,对于基于极化相关超表面结构的宽带低剖面超表面天线(方案1),其反射系数低于-10dB的工作频带为4.51GHz~7.08GHz,相对带宽为44.35%,带内三个谐振频点,分别在4.96GHz、5.98GHz、6.85GHz处;最大增益可以达到10.95dBi,且整个频带内增益非常平稳,2dB增益带宽为32.25%;此外,通过与相同尺寸下周期方形结构的超表面天线和同一单元取向的极化相关超表面天线的比较,可以发现,本发明通过将极化相关超表面单元2进行横向、纵向交叠排布,可以使得超表面天线的增益、增益平坦度、口径效率、带宽均有较大改善。

[0050] 结合图6a、图6b,由基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线在各谐振点处的表面电流分布图可以发现,在第一个谐振频点处(4.96GHz),整个超表面的电流矢量方向基本保持一致,且中间两排横向排布的极化相关超表面单元2上的表面电流幅度最强;在第二个谐振频点处(5.98GHz),整个超表面的电流矢量方向基本保持一致,且边缘两排纵向排布的极化相关超表面单元2上的表面电流幅度最强;这说明,中间两排极化相关超表面单元2主要对低频处的谐振起作用,而边缘两排极化相关超表面单元2主要对高频处的谐振起作用;这也与图3中“在不同极化波的入射下,其反射特性不同,谐振频点也不同”的规律是一致的。

[0051] 结合图7a、图7b,由基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线在各谐振点处的电场幅度分布图可以发现,在第一个谐振频点处(4.96GHz),中间两排横向排布的极化相关超表面单元2使得超表面中间的辐射间隙处发生谐振,其电场强度最强,说明其在低频进行辐射;在第二个谐振频点处(5.98GHz),边缘两排纵向排布的极化相关超表面单元2使得超表面边缘两排的辐射间隙处发生谐振,其电场强度最强,说明其在高频进行辐射。结合图6和图7,可以得到,第一个(4.96GHz)和第二个谐振频点(5.98GHz),均由超表面结构引起。

[0052] 结合图8,由去除超表面结构之后的单个缝隙天线的反射系数和增益曲线可以得到,第三个谐振频点由单个缝隙天线本身引起:单个缝隙天线的谐振频点大概在6.95左右,这与第三个谐振频点(6.85GHz)基本保持一致。

[0053] 结合图9a、图9b、图9c,由基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线的带内三个频点处的辐射方向图可以发现,其交叉极化抑制效果较好,可达到24dB左右。

[0054] 结合表1,与相同尺寸下的周期方形超表面天线、同一单元取向排布的极化相关超表面天线相比,本发明中基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线,通过横向、纵向交叠排布,在保证低剖面的情况下,可以获得更多的谐振点、更宽的带宽,以及更大更平稳的增益。有三个谐振频点,带宽可高达44.35%;最大增益可以达到10.95dBi,2dB增益带宽为32.25%。

[0055] 表1

[0056]	天线类型	阻抗带宽	最大增益	2-dB 增益带宽	强谐振 点数目
	参考 1-传统周期方形超 表面天线	29.3% (4.39-5.90GHz)	10.77 dBi (5.64GHz)	18.3% (4.91-5.90GHz)	2
	参考 2-纵向排布的周期 极化相关超表面天线	29.2% (4.42-5.93GHz)	10.35 dBi (5.85GHz)	20.9% (4.79-5.91GHz)	2
	参考 3-横向排布的周期 极化相关超表面天线	28.6% (4.07-5.43GHz)	10.66 dBi (5.32GHz)	13.78% (4.73-5.43GHz)	2
	方案 1-横纵向排布的极 化相关超表面天线	44.35% (4.51-7.08GHz)	10.95dBi (6.02GHz)	32.25% (4.76-6.59GHz)	3

[0057] 由上可知,本发明的基于极化相关超表面结构的宽带低剖面天线可以有效地实现宽带、平稳高增益、低剖面等特性。

[0058] 本发明通过构建具有极化相关特性的超表面单元,利用其极化相关特性,将不同取向的极化相关超表面单元进行合理排布,使得不同取向的极化相关超表面单元在不同的谐振频点处被激励,实现了具有多谐振特性的超表面辐射结构;通过缝隙激励的方式,使得具有多谐振特性的极化相关超表面结构辐射,从而形成宽带低剖面的超表面天线。最终实现3个谐振频点,高达44.35%的带宽,10.95dBi的最大增益,以及32.25%的2dB增益带宽。

[0059] 上述实施例为本发明较佳的实施方式,但本发明的实施方式并不受所述实施例的限制,其他的任何未背离本发明的精神实质与原理下所作的改变、修饰、替代、组合、简化,均应为等效的置换方式,都包含在本发明的保护范围之内。

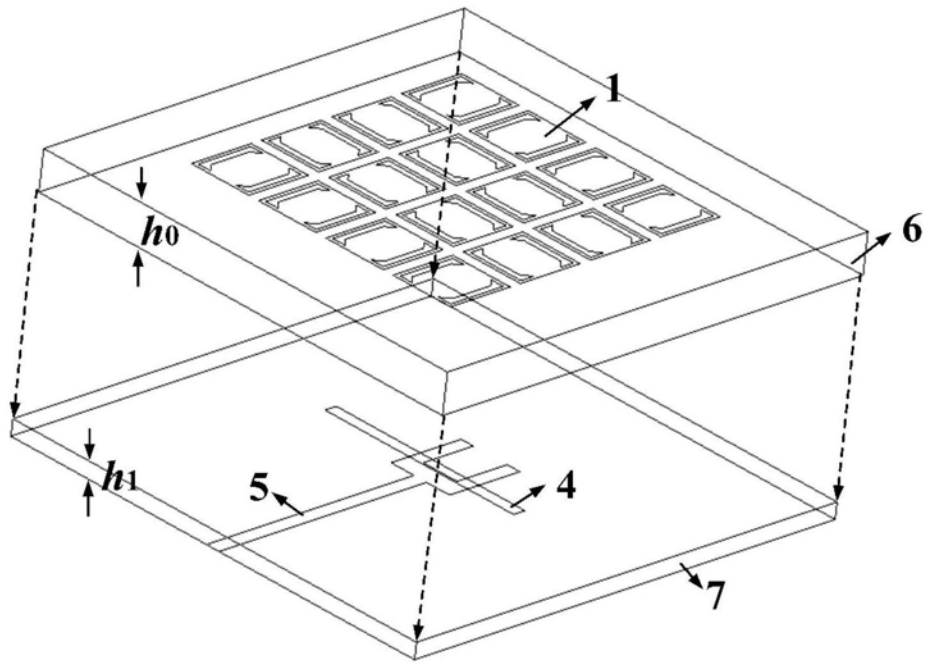


图1a

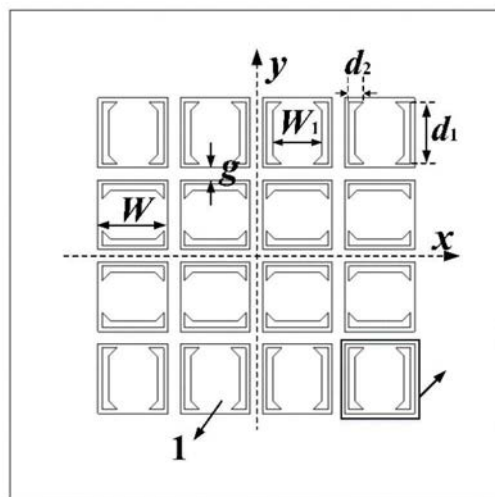


图1b

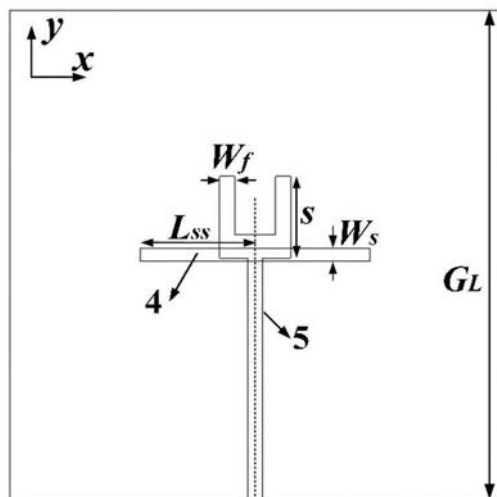


图1c

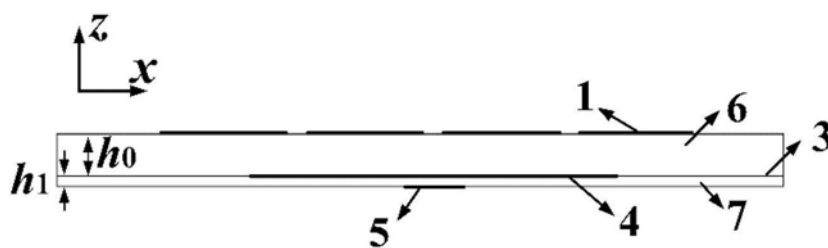


图1d

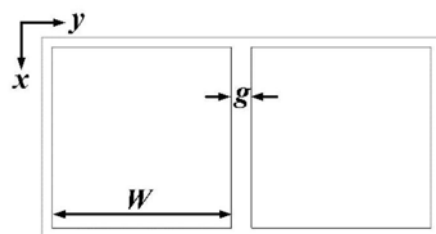


图2a

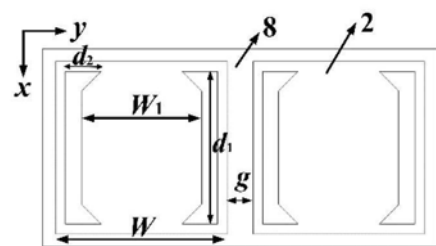


图2b

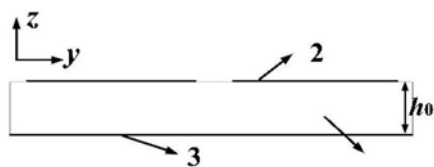


图2c

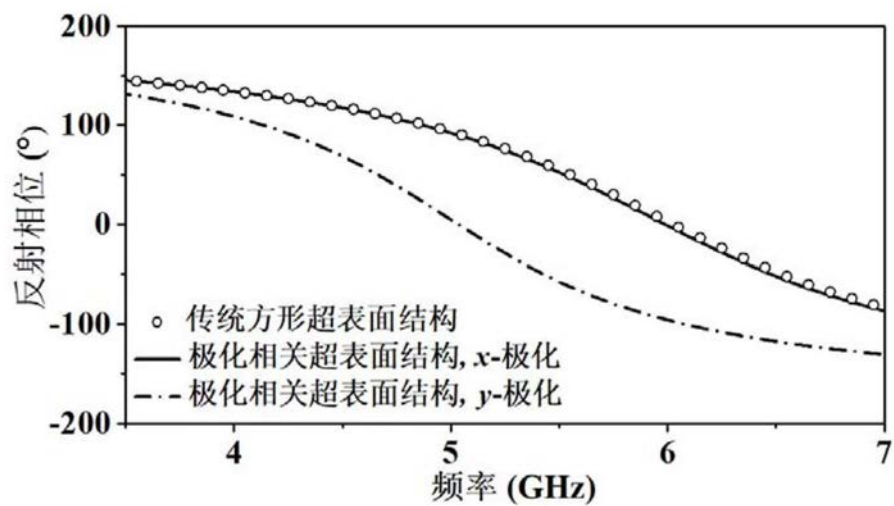


图3a

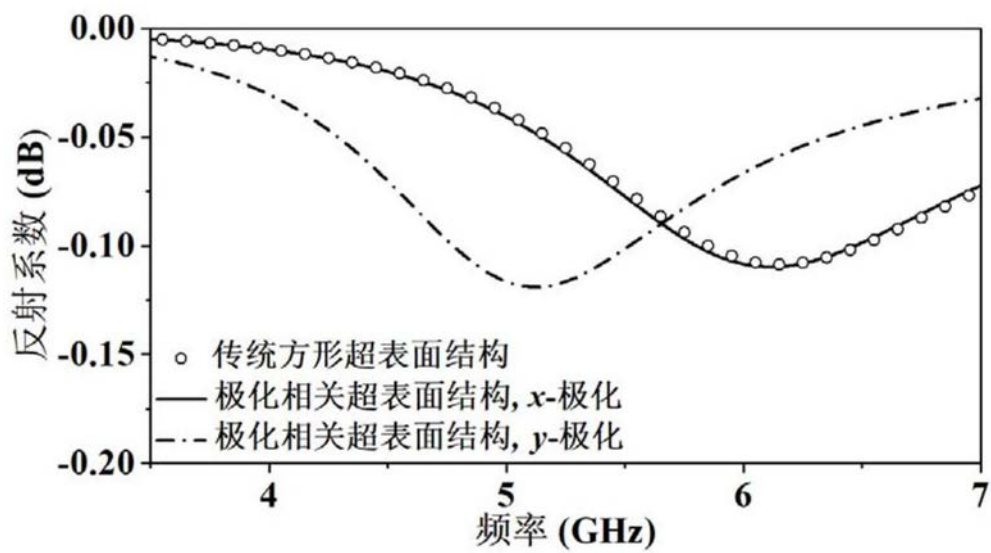


图3b

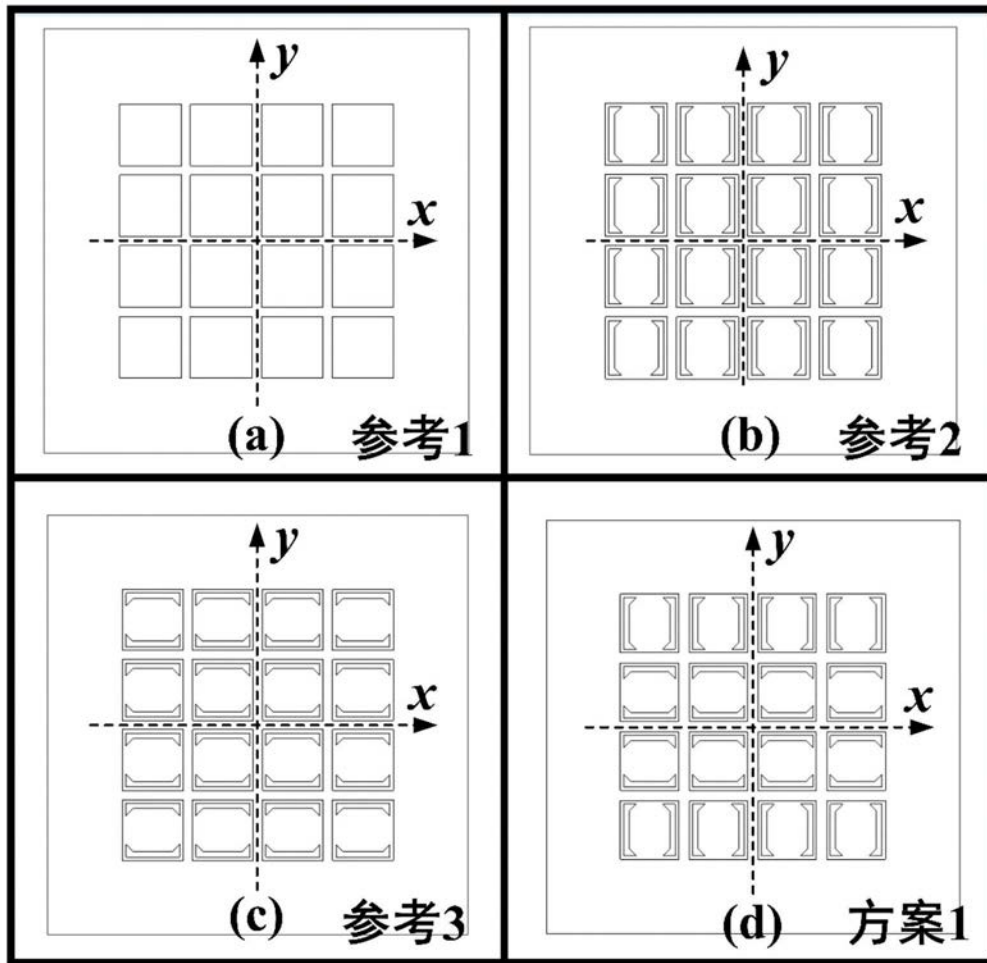


图4

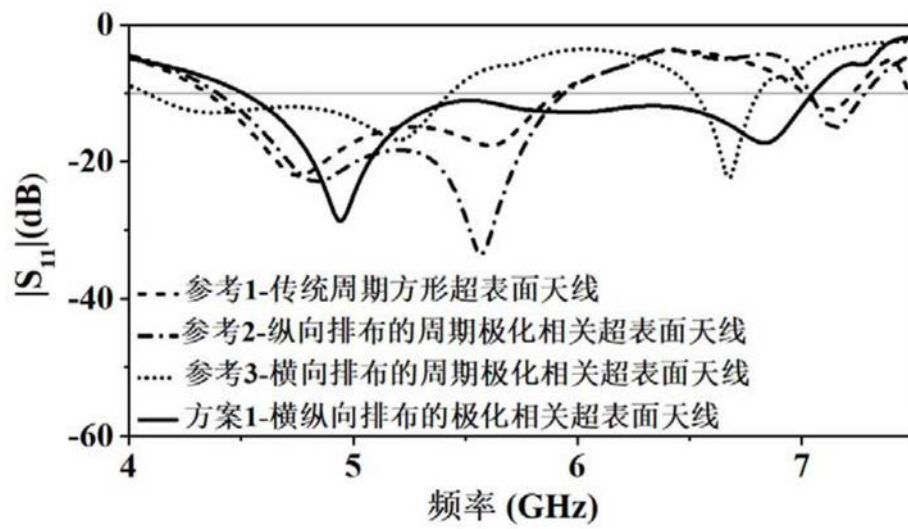


图5a

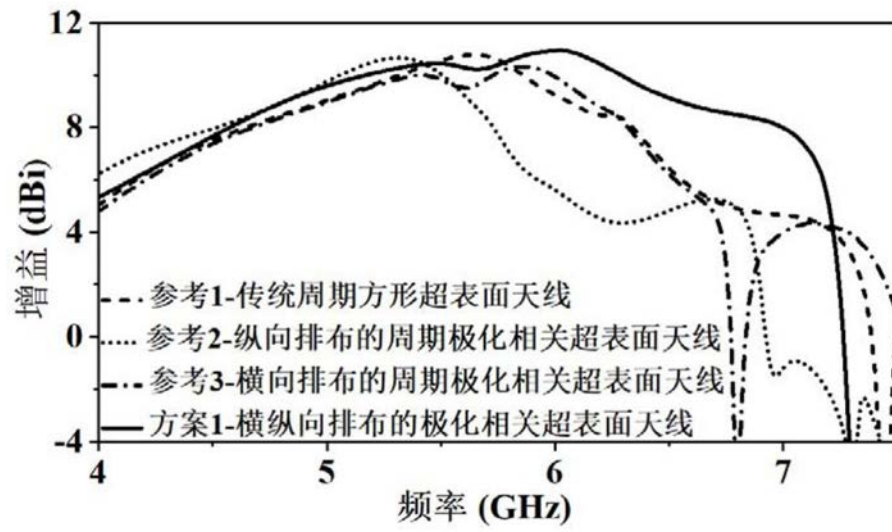


图5b

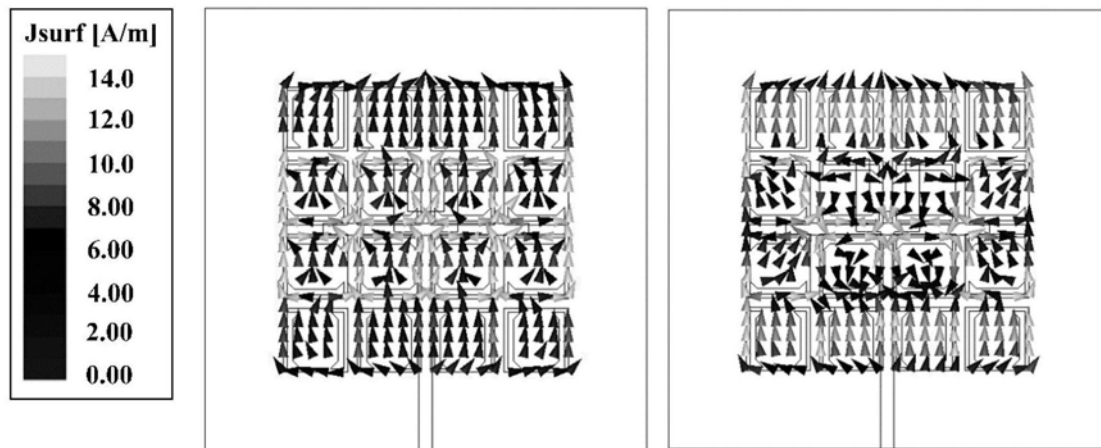


图 6a

图 6b

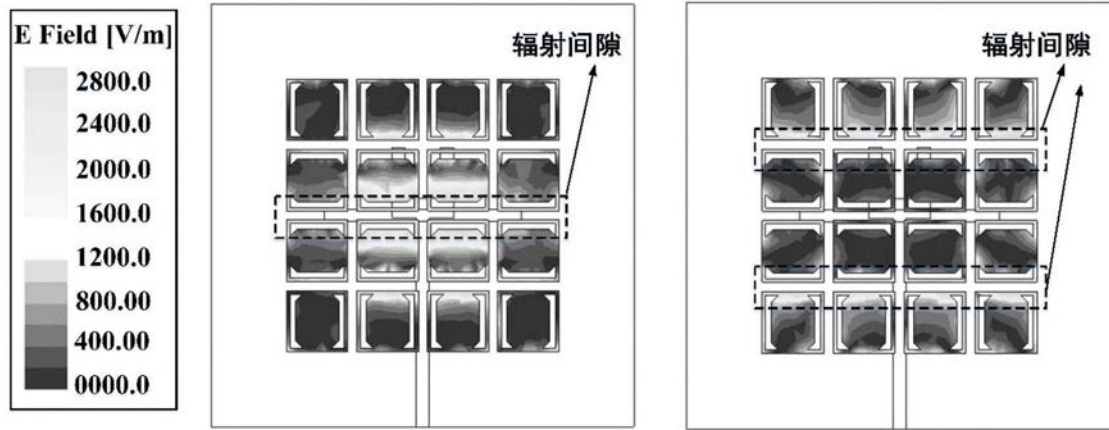


图 7a

图 7b

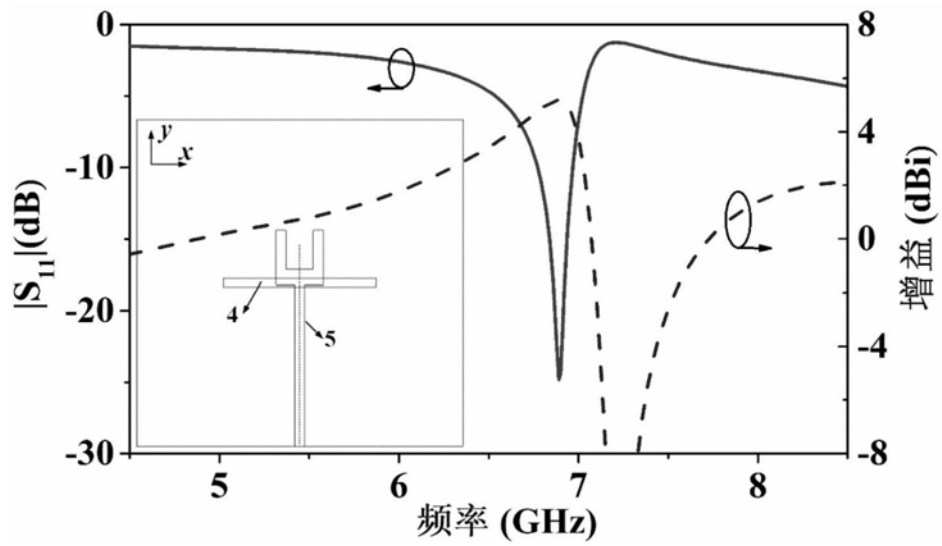


图8

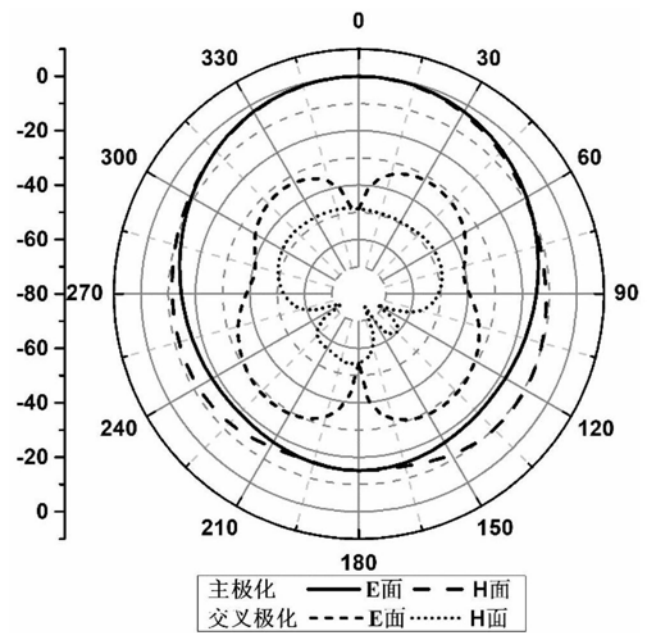


图9a

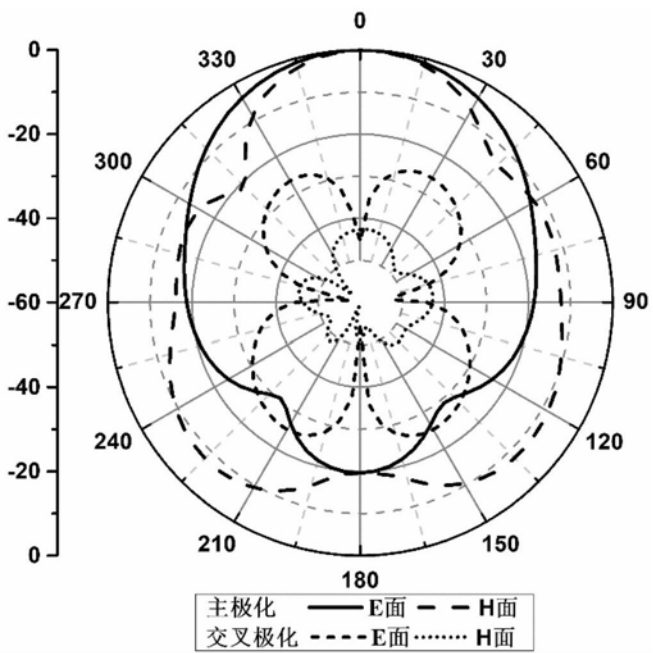


图9b

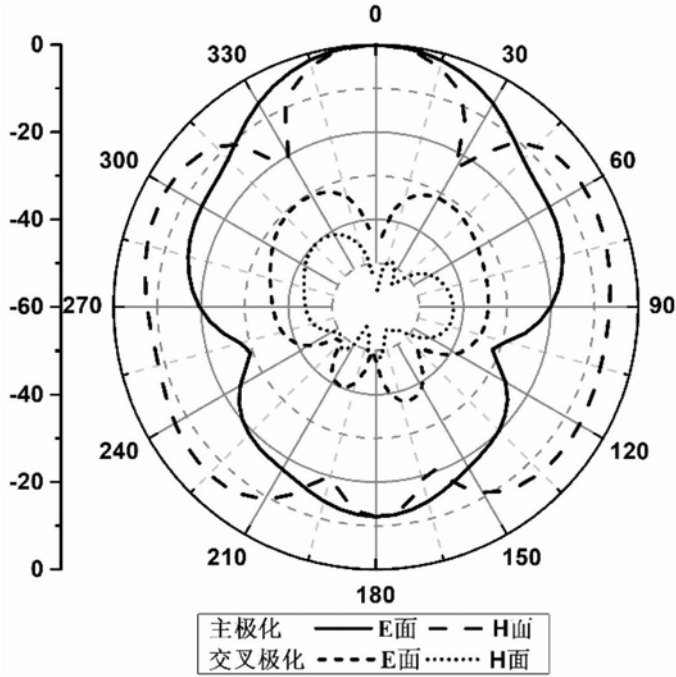


图9c