

中文摘要

天线作为无线通信系统重要的组成部分，其性能要求随着移动通信的快速发展显著提高。与单个天线相比，阵列天线因具有高增益、高功率、方向图赋形等优势，在无线通信系统中得到了广泛的应用。然而，由于通信系统空间受限，实际中阵列天线单元的间距逐渐压缩，因此紧耦合阵列天线的研究得到学者的广泛关注。单元间的紧耦合使天线包络相关性增强，导致无线信道容量减小、效率降低以及方向图畸变等问题。传统的阵列天线解耦方法有缺陷地、电磁带隙以及解耦网络等，这些方法结构复杂，难以应用到大规模阵列中。超表面由金属单元周期排列而成，应用在紧耦合阵列天线设计中，通过改变耦合电磁波的传播实现解耦。本文的主要内容如下：

1. 设计一种基于耶路撒冷十字超表面的紧耦合阵列天线。在二单元紧耦合贴片天线上方加载 5×6 耶路撒冷十字单元组成的超表面减小天线单元间互耦，天线单元的间距仅为 $0.015\lambda_0$ 。测量结果表明，天线工作于 WiMAX 3.5GHz 频段，-10 dB 阻抗带宽展宽为 13.83% (3.23-3.71 GHz)，工作频带内隔离度达到 18 dB 以上，峰值增益提高至 4.52 dBi。天线具有较低的剖面高度、较小单元间距及稳定的辐射特性。

2. 设计一种基于圆环形超表面的紧耦合阵列天线。矩形贴片天线四周加载四个 L 形寄生贴片展宽带宽，天线单元的间距仅为 $0.015\lambda_0$ ，天线上方加载 5×5 圆环形单元组成的超表面减小天线单元间互耦。测量结果表明，天线工作于 5G Sub-6 GHz 频段，-10dB 阻抗带宽展宽为 23.49% (4.02-5.09 GHz)，工作频带内隔离度达到 16.3 dB 以上，峰值增益提高至 5.4 dBi。天线具有宽频带内的高隔离度及良好的辐射特性。

3. 设计一种基于椭圆形双层超表面的紧耦合阵列天线。在矩形贴片天线上刻蚀一对开路缝隙实现双频，天线单元的间距仅为 $0.008\lambda_0$ ，天线上方加载椭圆形贴片组成的双层超表面减少双频段互耦。测量结果表明，天线工作于 WiMAX 的 2.6 GHz 和 3.5 GHz 频段，-10 dB 阻抗带宽展宽为 8.83% (2.49-2.72 GHz)和 8.50% (3.38-3.68 GHz)，工作频段内隔离度分别达到 19 dB 和 20 dB 以上，峰值增益分别提高至 6.9 dBi 和 6.38 dBi。天线具有较低剖面高度、较小单元间距及良好的辐射特性。

关键词：紧耦合；阵列天线；超表面；解耦

目 录

中文摘要	I
ABSTRACT	II
1 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 传统解耦技术	1
1.2.2 超表面解耦技术	6
1.3 论文主要工作及章节安排	11
1.3.1 论文主要工作	11
1.3.2 论文章节安排	12
2 基于耶路撒冷十字超表面的紧耦合阵列天线	13
2.1 引言	13
2.2 耶路撒冷十字超表面	13
2.3 基于耶路撒冷十字超表面的紧耦合阵列天线	15
2.3.1 天线结构	15
2.3.2 解耦原理	17
2.3.3 参数分析	17
2.3.4 仿真与测试结果	19
2.4 本章小结	22
3 基于圆环形超表面的紧耦合阵列天线	23
3.1 引言	23
3.2 圆环形超表面	23
3.3 基于圆环形超表面的紧耦合阵列天线	25
3.3.1 天线结构	25
3.3.2 解耦原理	27
3.3.3 参数分析	27
3.3.4 仿真与测试结果	29

3.4 本章小结	32
4 基于椭圆形双层超表面的紧耦合阵列天线	33
4.1 引言	33
4.2 椭圆形双层超表面	33
4.3 基于椭圆形双层超表面的紧耦合阵列天线	35
4.3.1 天线结构	35
4.3.2 解耦原理	37
4.3.3 参数分析	38
4.3.4 仿真与测试结果	39
4.4 本章小结	43
5 结论	44
参考文献	46
攻读学位期间取得的研究成果	53
致谢	54
个人简况及联系方式	55
承诺书	56
学位论文使用授权声明	57

1 绪论

1.1 课题研究背景及意义

天线作为无线通信系统的重要组成部分，用于实现电磁波的发射和接收，其性能的好坏直接影响通信系统的传输质量。与单个天线相比，阵列天线具有高增益、相位扫描、方向图赋形等优势，在手机、平板电脑等移动通信设备和卫星导航、雷达检测等无线通信系统中得到了广泛的应用^[1]。实际应用中，通信系统空间有限，要求阵列天线在无线终端设备中紧凑放置。紧耦合阵列天线具有较小的单元间距、尺寸小、剖面低和易于共形等优点，在移动通信设备中具有巨大应用潜力。然而，较小的天线单元间距必然导致强烈的耦合，天线的增益和效率等辐射特性将会减小，天线的性能降低，因此研究紧耦合阵列天线的解耦具有应用价值^[2]。同时，降低单元间互耦可以提高天线系统的信噪比和增益，降低动态反射系数，改善方向图^[3]。但常见的解耦技术存在结构复杂及难以应用到大规模阵列中的问题，具有一定的局限性。

超材料作为新型人工复合材料，具有自然界已有材料所不具备的一些超常物理特性以及特殊的电磁学特性，已然成为现阶段研究热点^[4]。超材料具有的高度灵活性和强大电磁波调控能力使其具有十分广泛的应用，可应用于增强阵列天线的隔离度。而超表面（MS）作为二维超材料，其结构较为简单，易于加工且成本较低。相对于传统解耦方法，基于超表面的紧耦合阵列天线在降低天线单元间强烈耦合的同时，还可以展宽天线带宽，提高增益，适用于大规模天线阵列。基于以上分析，基于超表面的紧耦合阵列天线的研究与设计具有显著的现实意义以及广阔的应用前景。

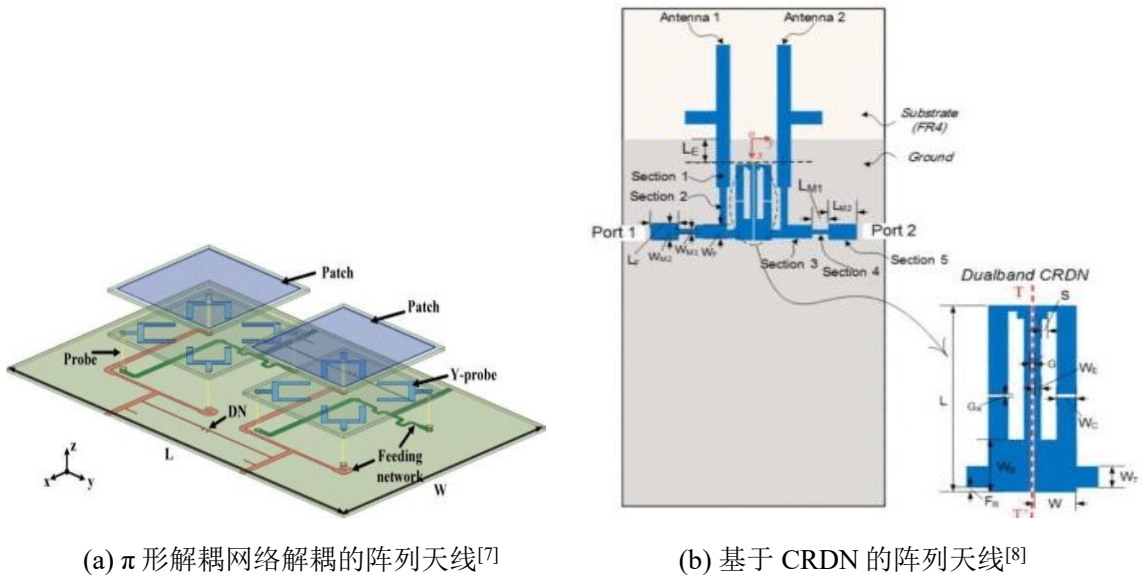
1.2 国内外研究现状

1.2.1 传统解耦技术

在实际应用中，阵列天线间存在严重的电磁耦合问题，国内外众多学者针对阵列天线的解耦方法开展了许多探索和研究。目前，阵列天线的解耦方法有：解耦网络、缺陷地结构、电磁带隙、地板枝节或寄生贴片、中和线、谐振器。

1.2.1.1 解耦网络

解耦网络通过在天线端口间添加由电路元件或者微带线组成的网络结构实现耦合路径的抵消^[5]。解耦网络的实质是通过引入间接耦合场实现与原始耦合场的抵消，实现天线与解耦网络之间的阻抗匹配，使得电磁能量耦合到解耦网络，从而提高天线间的隔离度^[6]。M. Yang 等人提出了一种由传输线和两个短截线组成的 π 形解耦网络以增强两个双极化天线之间的隔离^[7]，如图 1.1(a)所示。解耦网络放置在相邻天线元件的馈电网络之间，天线阵列的共极化隔离度提高了 24 dB，且对辐射性能没有影响。2014 年，赵鲁豫等人提出了一种由一对双频开口方环谐振器组成的紧凑型平面双频耦合谐振器解耦网络（CRDN）^[8]，如图 1.1(b)所示。CRDN 不仅可以减轻两个双频天线之间的强烈互耦，还提供了良好的匹配性能。



(a) π 形解耦网络解耦的阵列天线^[7]

(b) 基于 CRDN 的阵列天线^[8]

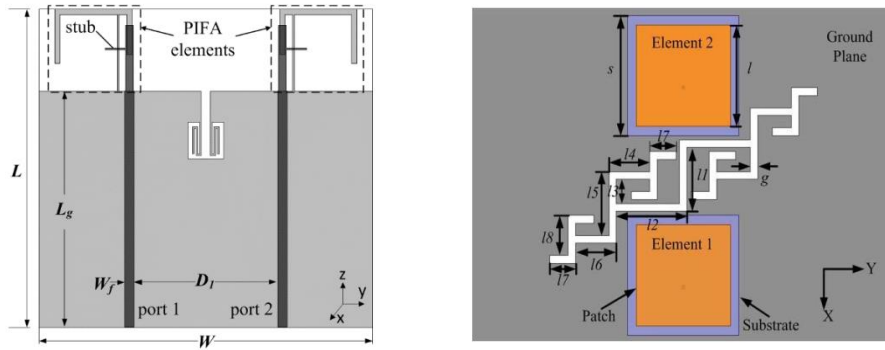
图 1.1 基于解耦网络的阵列天线

Fig.1.1 Array antennas using decoupling network

1.2.1.2 缺陷地结构

缺陷地（DGS）解耦结构的提出建立在 Yanfeng Li 等人所提出的光带隙结构^[9]的基础上，在接地板上刻蚀缝隙，可以将其看作接地板上的滤波器，通过控制接地板表面波的传播，改变表面电流分布，从而实现带阻特性达到解耦目的^[10]。S. W. Cheung 等人设计了一种双频 DGS^[11]，通过抑制表面波实现双频段内隔离度的改善。如图 1.2(a)所示，该天线由两个对称印刷的平面倒 F 天线（PIFA）组成，在天线单元之间加载由一个插槽和两条弯折线组成的双谐振 DGS 结构，天线在双频段的测量

带宽分别为 56%和 21%，天线间的隔离度提高到 15 dB 以上。文献[12]提出了一种新颖的分形缺陷接地结构（FDGS）以减少共面微带天线单元之间的相互耦合，如图 1.2(b)所示。通过使用 FDGS 的第三迭代结构，天线的隔离度提高了 30 dB 以上，效率从 93%提高到 96%，且天线的包络相关系数更小。



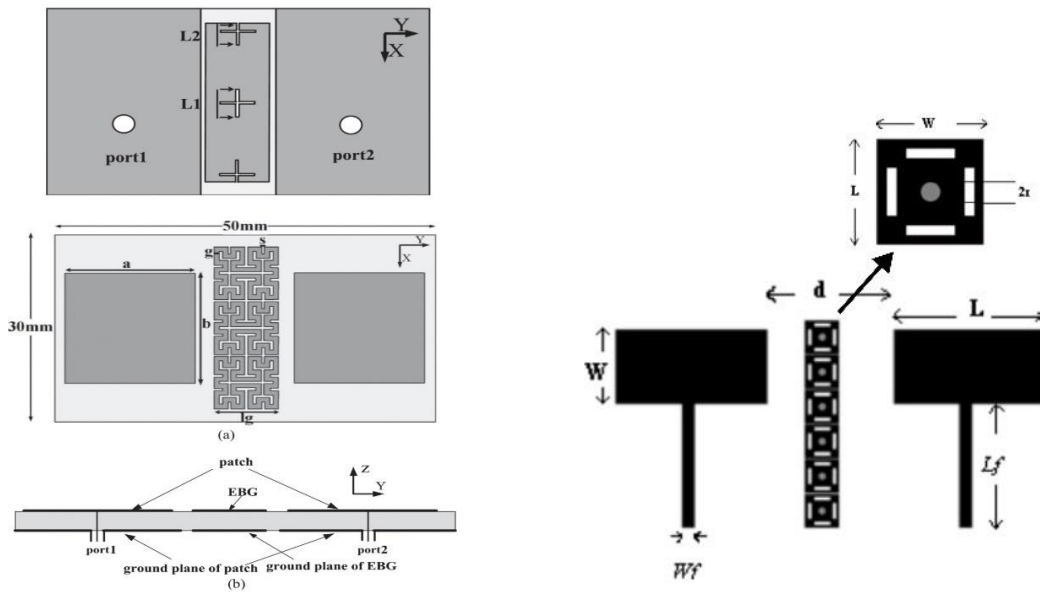
(a) 双谐振 DGS 解耦的阵列天线^[11] (b) FDGS 解耦的阵列天线^[12]

图 1.2 基于 DGS 解耦的阵列天线

Fig.1.2 Array antennas using DGS decoupling

1.2.1.3 电磁带隙

电磁带隙（EBG）解耦是利用人工周期电磁结构的一些物理性能，使 EBG 产生



(a) 分形 UC-EBG 解耦的阵列天线^[14] (b) 蘑菇型 EBG 解耦的阵列天线^[17]

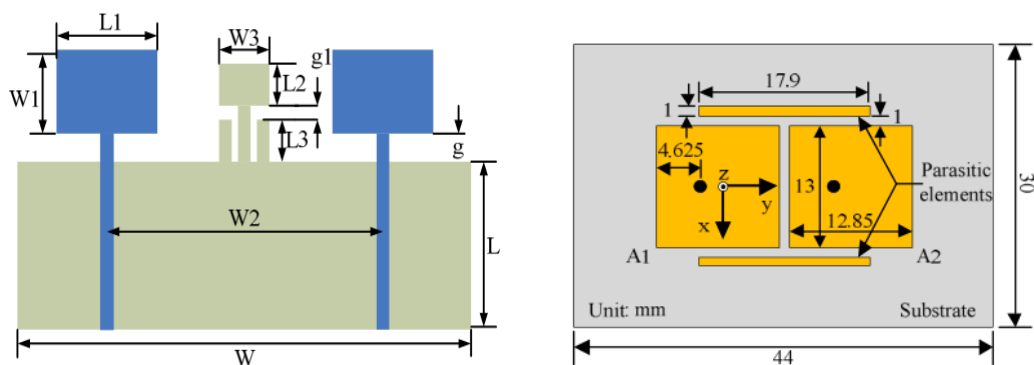
图 1.3 基于 EBG 解耦的阵列天线

Fig.1.3 Array antennas using EBG decoupling

电磁波带隙特性，能够有效抑制表面波，从而降低天线单元间的耦合^[13]。Xu Yang 等人提出了一种单面紧凑型电磁带隙（UC-EBG）结构和三个十字形槽两种解耦结构组成的高隔离度贴片阵列天线^[14]，如图 1.3(a)所示。该 UC-EBG 是基于摩尔曲线的第三次迭代结构^[15-16]，将其放置于两个辐射单元之间，不仅单元间隔离度提高了 13 dB 以上，而且 UC-EBG 和贴片天线位于同一平面降低了阵列的剖面。文献[17]采用一种刻蚀缝隙的蘑菇型 EBG 结构，如图 1.3(b)所示。将紧凑型 EBG 加载于阵列天线之间，解耦后天线的隔离度提高到 36 dB 以上。

1.2.1.4 枝节结构或寄生单元

加载枝节结构是在金属地上延伸出额外的枝节，加载寄生单元是在天线周围加入新的枝节，两种方式解耦原理相同，都是通过引入新的耦合路径与天线单元之间的耦合路径方向相反，从而抵消单元间部分耦合，提高天线隔离度^[18]。文献[19]提出的 MIMO 天线由两个超宽带单极子天线组成，分别在接地层使用套筒耦合矩形步进阻抗谐振器和套筒耦合圆度步进阻抗谐振器获得高隔离度，如图 1.4(a)所示。所提出的天线工作在 3.1 GHz 至 10 GHz 的宽阻抗带宽范围内，具有超过 23 dB 的高隔离度。文献[20]设计了一个贴片天线阵列，寄生单元由两个简单的微带线组成，分别位于天线的两侧，如图 1.4(b)所示。两个寄生单元引入额外的耦合抵消了两个贴片天线间的直接耦合，解耦后天线间的隔离度优于 20 dB。然而地板枝节的设计缺乏一般性，还会吸收一定的辐射能量，降低天线的辐射效率。



(a) 枝节结构解耦的阵列天线^[19]

(b) 寄生单元解耦的阵列天线^[20]

图 1.4 基于地板枝节/寄生贴片解耦的阵列天线

Fig.1.4 Array antennas using branch structure / parasitic element decoupling

1.2.1.5 中和线

中和线解耦技术通过连接两个天线单元，改变电流的传播路径，部分抵消两个

天线单元的耦合电流，从而提高天线隔离度^[21-22]。文献[23]首次提出一种适用于 UMTS Rx 频段的手持 MIMO 天线，如图 1.5(a)所示。通过在 PIFA 单元侧面加载弯折中和线，天线的谐振频率不受干扰，隔离度降低了 10 dB 以上，同时总效率达到 80%。文献[24]设计了一种适用于 WiFi/WiMAX 的新型单极子阵列天线，如图 1.5(b)所示。天线由两个对称放置的月牙形辐射单元组成，通过加载矩形 DGS 和三角形中和线结构实现良好的阻抗匹配和较低的相互耦合，其阻抗带宽为 54.5%，天线的隔离度提高了 22 dB 以上，所提出的天线可适用于 MIMO 便携式或移动设备中。

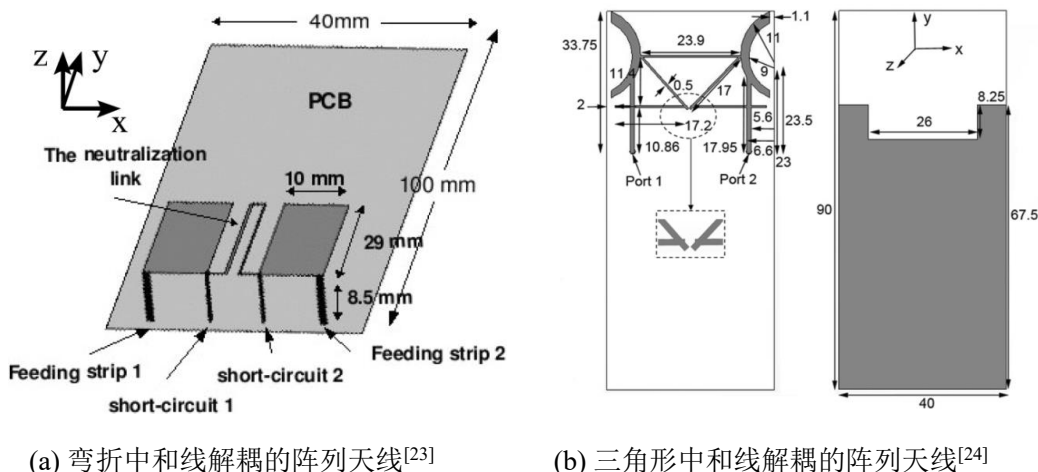


图 1.5 基于中和线解耦的阵列天线

Fig.1.5 Array antennas using neutralization line decoupling

1.2.1.6 谐振器

在耦合较强的两个天线之间引入谐振器是常见的解耦技术，通过抑制电流从天线的一个端口流向另一个端口，从而提高单元间的隔离度^[25-26]。文献[27]设计了一个缝隙弯折线谐振器 (SMLR)，如图 1.6(a)所示。将 SMLR 放置在两个贴片天线之间，用于阻断沿 H 平面耦合贴片天线间的表面电流。天线的工作频率为 4.8 GHz，解耦后天线的隔离度提高了 16 dB 以上，同时与 EBG 结构相比占用更少空间且仅使用单层基板。文献[28]提出的解耦谐振器单元由一个非对称环路谐振器组成，如图 1.6(b)所示。该谐振器带有一条耦合微带线，可实现 2 至 5 GHz 的宽阻带特性，同时设计了加载 V 形缝隙的双频贴片阵列天线，采用非对称环形谐振器满足天线单元的紧密封装同时减少相互耦合，隔离度达到 29 dB 以上，引入谐振器可以极大改善天线间耦合，但也会影响天线的辐射方向图。

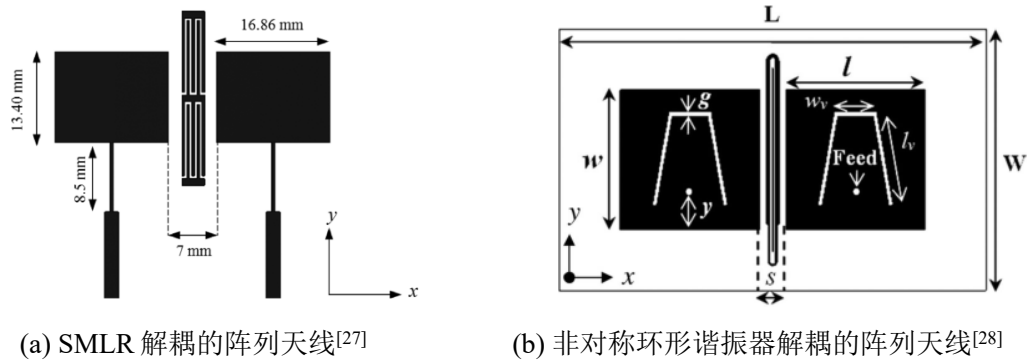


图 1.6 基于谐振器解耦的阵列天线

Fig.1.6 Array antennas using resonator decoupling

1.2.2 超表面解耦技术

上述解耦技术均能实现阵列天线解耦，但难以应用于大规模阵列中。同时，EBG 和谐振器解耦技术需要多个单元周期排列于天线单元之间，占用大量空间，较难应用在紧耦合阵列天线中；解耦网络技术需要与端口并联或级联，结构复杂；DGS、中和线、地板枝节解耦技术结构简单，但解耦效果不及以上解耦技术。近年来，超材料作为新型人工复合材料，具有自然界已有材料所不具备的一些超常物理特性以及特殊的电磁学特性。1968 年，物理学家 Veselago 首次提出介电常数和磁导率均为负值的负折射电磁材料^[29]，由此超材料作为一种新型电磁媒介被人们认识。超材料在特定的频段内具有特殊的电磁特性，能够产生电磁禁带，在禁带范围内抑制电磁波的传播，应用于阵列天线中能够降低互耦^[30]。超表面作为共面超表面放置在阵列天线平面可以减小单元之间的耦合，也可以作为覆层超表面放置在阵列天线上方实现阵列天线的解耦。

1.2.2.1 共面超表面

目前，加载共面超表面实现阵列天线解耦的设计层出不穷^[31-32]。文献[31]提出了开口谐振环形超表面单元组成的超表面，如图 1.7(a)所示。超表面加载于阵列天线四周实现宽带解耦，实测结果表明，在 5.0-6.0 GHz 的宽带中，二单元耦合天线的隔离度从 8 dB 大幅提高到 25 dB，同时天线具有低轮廓和紧凑尺寸的优点。文献[32]设计了有对角臂的方形环组成的超表面放置于天线之间和周围实现解耦，天线端口间的隔离度提高到 34 dB 以上。同时，超表面的对角臂上连接有电阻降低雷达散射截面。

超表面也可以放置于阵列天线单元之间实现解耦目的^[33-40]。文献[33]提出一种

分裂环谐振器超表面，如图 1.7(b)所示。通过在天线单元间插入超表面，抑制谐振频率下两个微带天线之间的表面电流传播，天线在工作频率 5.1 GHz 下实现了 10.8 dB 的互耦合改善，分裂环谐振器超表面为紧密间隔的微带天线提供了良好的解耦效果。文献[35]设计了一种方环超表面，将超表面加载于三角形单极子天线单元之间，可以实现 3-20 GHz 的宽频带解耦，天线具有高于 17 dB 的隔离度，可用于雷达、固定卫星服务、卫星应用、广播卫星服务等应用。文献[37]设计了 3.5 GHz 左右表现出负介电常数的互补螺旋环形谐振器（CSR）单元，如图 1.7(c)所示。通过在两个 H 面耦合贴片天线之间加载具有两个和三个同心环的 CSR，天线分别实现了 8.36 dB 和 11.2 dB 的互耦降低。文献[39]提出了一种双频超表面结构，如图 1.7(d)所示。超表面在 WLAN 频带的 2.4 GHz 和 5.8 GHz 有两个谐振频率，将其加载于双频阵列天线之间，双频段内的隔离度均优于 20 dB，且两个频点的辐射方向图几乎不变。

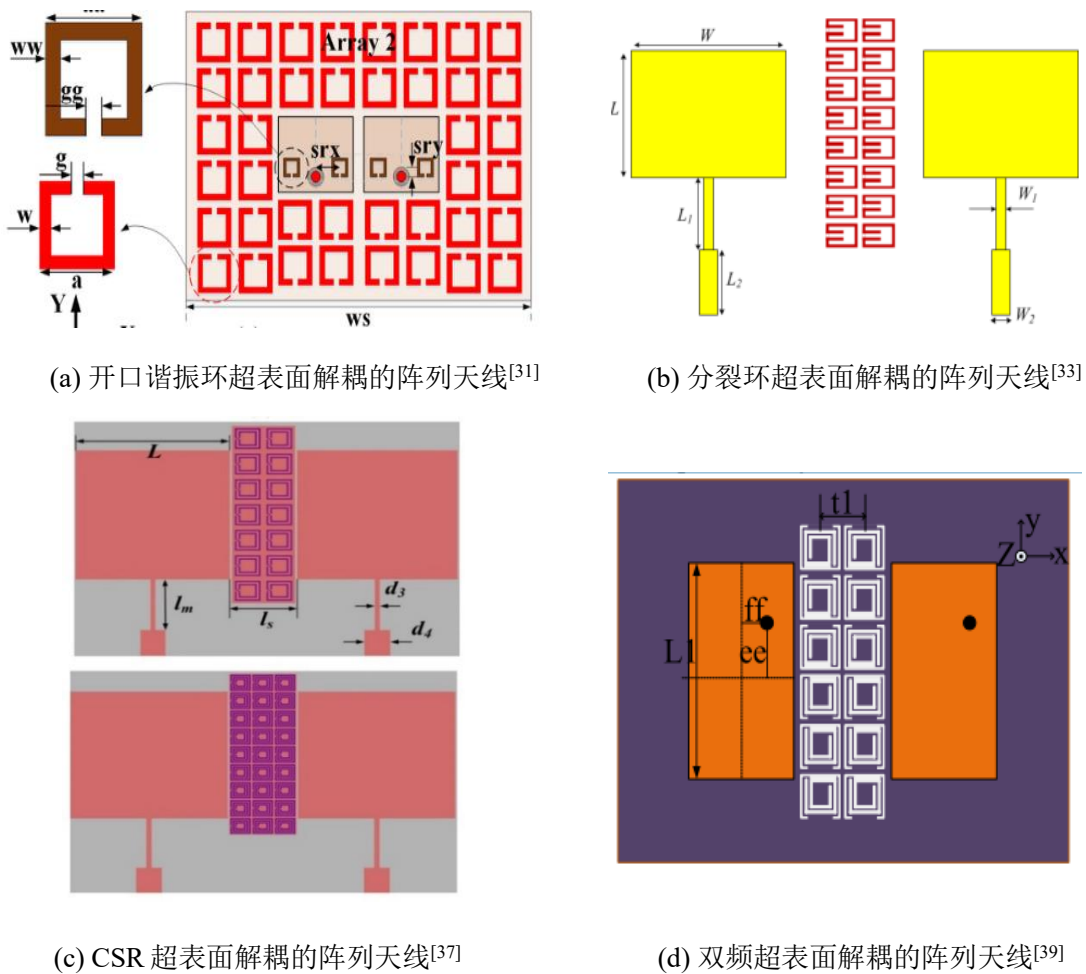


图 1.7 基于共面超表面解耦的阵列天线

Fig.1.7 Array antennas based on coplanar MS decoupling

1.2.2.2 覆层超表面

1) 解耦原理

二单元阵列天线可以等效为双端口网络，其输入输出的电压关系可以用公式(1.1)表示为^[41]:

$$\begin{bmatrix} V_1^o \\ V_2^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^i \\ V_2^i \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

其中 S_{11} 、 S_{22} 为两个端口的反射系数， S_{12} 、 S_{21} 为两个端口的耦合系数， V_1^i 、 V_2^i 、 V_1^o 和 V_2^o 分别为两个端口的输入输出电压。当双端口网络为无损耗、互易和匹配时，式(1.1)可进一步表示为:

$$\begin{bmatrix} V_1^o \\ V_2^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} \\ S_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^i \\ V_2^i \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

因此，当 $S_{12}=S_{21}=0$ 时，两个天线单元之间的耦合消失。

为了解释覆层超表面的解耦原理，以二单元贴片阵列天线为例进行电场分析。如图 1.8 所示，二单元贴片天线沿 x 轴排列，其中天线 1 被激励，天线 2 接 50Ω 负载，在天线上方加载超表面覆层实现解耦。未加载超表面时，两个单元之间存在强烈耦合，天线间的耦合电磁波沿 x 轴正方向传播，传播波数 k 可以表示为^[42]:

$$k = w \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \quad (1.3)$$

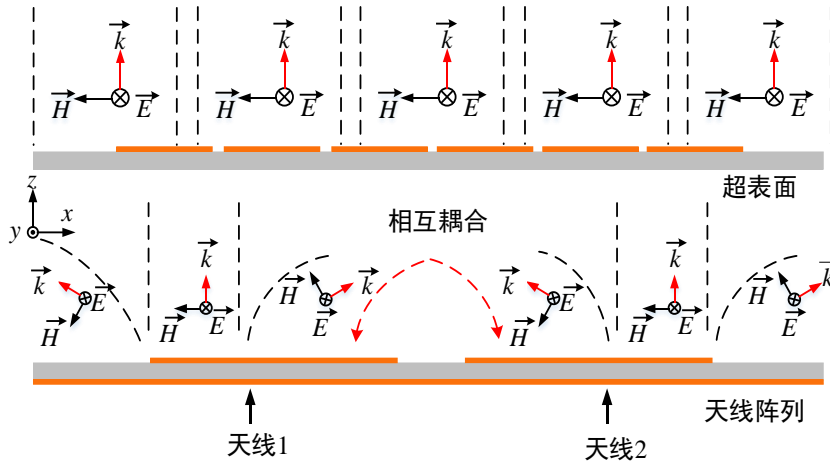


图 1.8 覆层超表面解耦原理

Fig.1.8 Principle of covering MS decoupling

在阵列天线上方加载不同属性介电常数和磁导率的覆层超表面，会对单元间耦合电

磁波的传播波数产生影响。根据公式(1.3)可知，在阵列天线上方加载覆层超表面后，耦合波的波数 k 可表示为：

$$\mathbf{k} = \mathbf{w} \cdot \sqrt{\mu_r \mu_0 \cdot \varepsilon_r \varepsilon_0} = \mathbf{j} \mathbf{k}_0 \cdot \sqrt{|\mu_r| \cdot |\varepsilon_r|} \quad (1.4)$$

因此，沿 x 轴正方向传输的耦合电场可以进一步表示为：

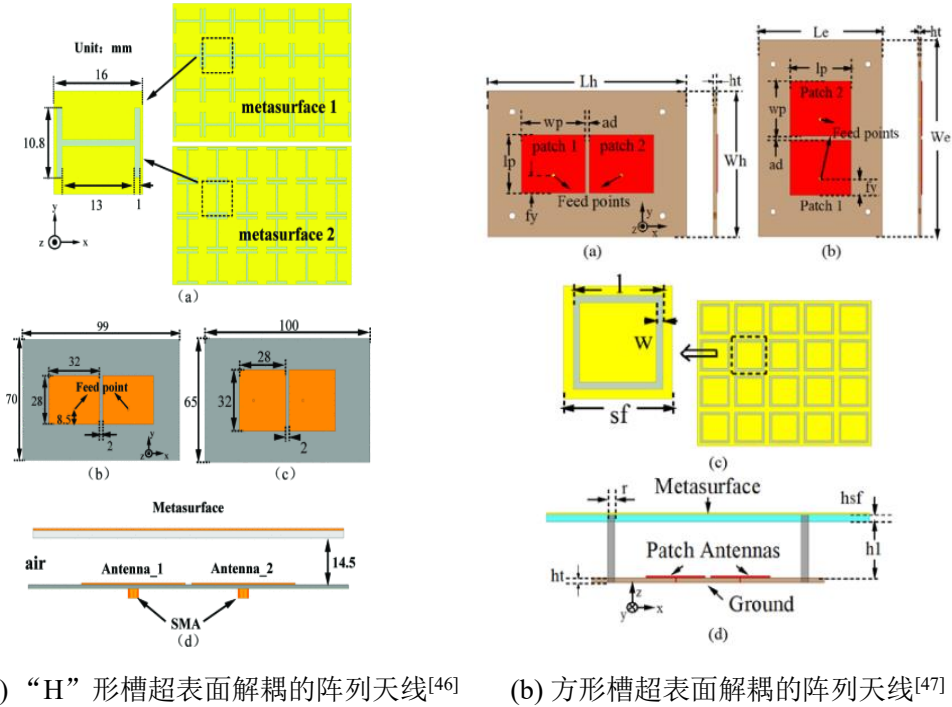
$$\mathbf{E}(x,t) = \mathbf{E}_0 e^{jkx} \cdot e^{j\omega t} = \mathbf{E}_0 e^{-k_0 \sqrt{|\mu_r| |\varepsilon_r|} x} \cdot e^{j\omega t} \quad (1.5)$$

公式(1.5)表明，在阵列天线上方加载单一负属性 ($\varepsilon_r < 0$ 、 $\mu_r > 0$ 或 $\varepsilon_r > 0$ 、 $\mu_r < 0$) 的超表面后，天线间的耦合电场在 x 轴方向上随着距离的增大而减小。由于超表面覆层的各向异性的性质^[43]，天线电磁波主要沿 z 轴方向传播，能够保持辐射，因此加载单一负属性的覆层超表面能有效减小天线单元间的相互耦合。

2) 解耦应用

近年来，覆层超表面被广泛应用在阵列天线的解耦设计中。Z. Wang 等人首次提出由周期性圆形分裂环谐振器 (CSRR) 组成的超表面覆层^[44]，将具有单一负属性的 CSRR 超表面放置于耦合天线上方，水平传播的耦合电磁波沿着超表面逐渐衰减，从而提高天线的隔离性能。2017 年，吴克利等人首次提出阵列天线解耦表面 (ADS) 的概念^[45]，将由各种反射器组成的 ADS 覆层，放置于阵列天线上方，使得引入的部分反射波可以有效抵消耦合波，减少天线单元之间的互耦。相比其他解耦方式，在阵列天线上方加载超表面覆层提高天线单元隔离度的同时，可以展宽带宽，提高天线增益，减小占用空间。目前，基于覆层实现阵列天线解耦的超表面可以分为开槽型超表面^[46-48]和贴片型超表面^[49-54]。

文献[46]提出了一种用于 E/H 耦合 MIMO 天线互耦减少的开槽型表面，超表面由周期排列的“H”形槽组成，如图 1.9(a)所示。“H”形槽超表面只能投射单一极化的入射波，通过中和近场耦合来改善耦合天线的隔离，隔离度优于 20 dB。文献[47]设计了由方环形槽周期排列组成的超表面，如图 1.9(b)所示，超表面可以抑制表面波并部分改变耦合模式，使得耦合贴片天线在谐振频率下 E/H 面隔离度均达到 40 dB 以上。在文献[46]中“H”形槽超表面基础上，文献[48]进一步提出由耶路撒冷十字缝隙组成的超表面，可以看作是两个“H”形槽正交叠加组成，耶路撒冷十字缝隙型超表面可以实现正交极化的电磁波的投射，且幅值和相位一致，因此可以实现双极化阵列天线的解耦。



(a) “H”形槽超表面解耦的阵列天线^[46] (b) 方形槽超表面解耦的阵列天线^[47]

图 1.9 基于开槽型超表面解耦的阵列天线

Fig.1.9 Array antennas based on slotted MS decoupling

文献[49]设计了由嵌套形开口谐振环单元组成的超表面，如图 1.10(a)所示，超表面在大角度范围内实现了负介电常数。矩形贴片上刻蚀 U 形缝隙改善天线匹配，在其上方加载双层超表面有效减少整个平面阵列上的相互耦合，隔离度在工作带宽内提高了 8 dB，最大提高了 25 dB。同时，双层超表面的设计更好地保持了天线的辐射模式。文献[50]提出了一种基于双层条带超表面解耦设计，如图 1.10 (b)所示。使用双层超表面减少了天线在 3.5 GHz 下的相互耦合，同时天线不使用额外的匹配技术。模拟结果表明，在 3.5 GHz 频率下，两个天线间的隔离度提高到 47 dB 以上，辐射效率提高到 18%，ECC 从 0.08 降低到了 0.0014。文献[51]设计了许多分裂环谐振器单元组成的超表面解耦双极化阵列天线，解耦后阵列天线可以工作在 2.4 GHz 左右，并且工作频带内相互耦合小于 -20 dB。文献[52]采用由 9×6 圆形分裂环 (CSR) 单元组成的超表面来提高天线的增益和隔离度，如图 1.10(c)所示。天线工作在 24.55-26.5 GHz 的毫米波频段，加载超表面后天线的隔离度提高了 5 dB，同时获得了 10.27 dBi 的峰值增益。文献[54]提出了一种太极八卦超表面，如图 1.10(d)所示。天线上方加载寄生贴片展宽带宽，将超表面覆盖在天线上实现解耦，仿真结果表明，天线的 -10 dB 带宽覆盖 4.73-5.20 GHz，隔离度高于 20 dB，在中心谐振频率处隔离度最高为 43 dB。此外，解耦前后天线的辐射方向图几乎不变。

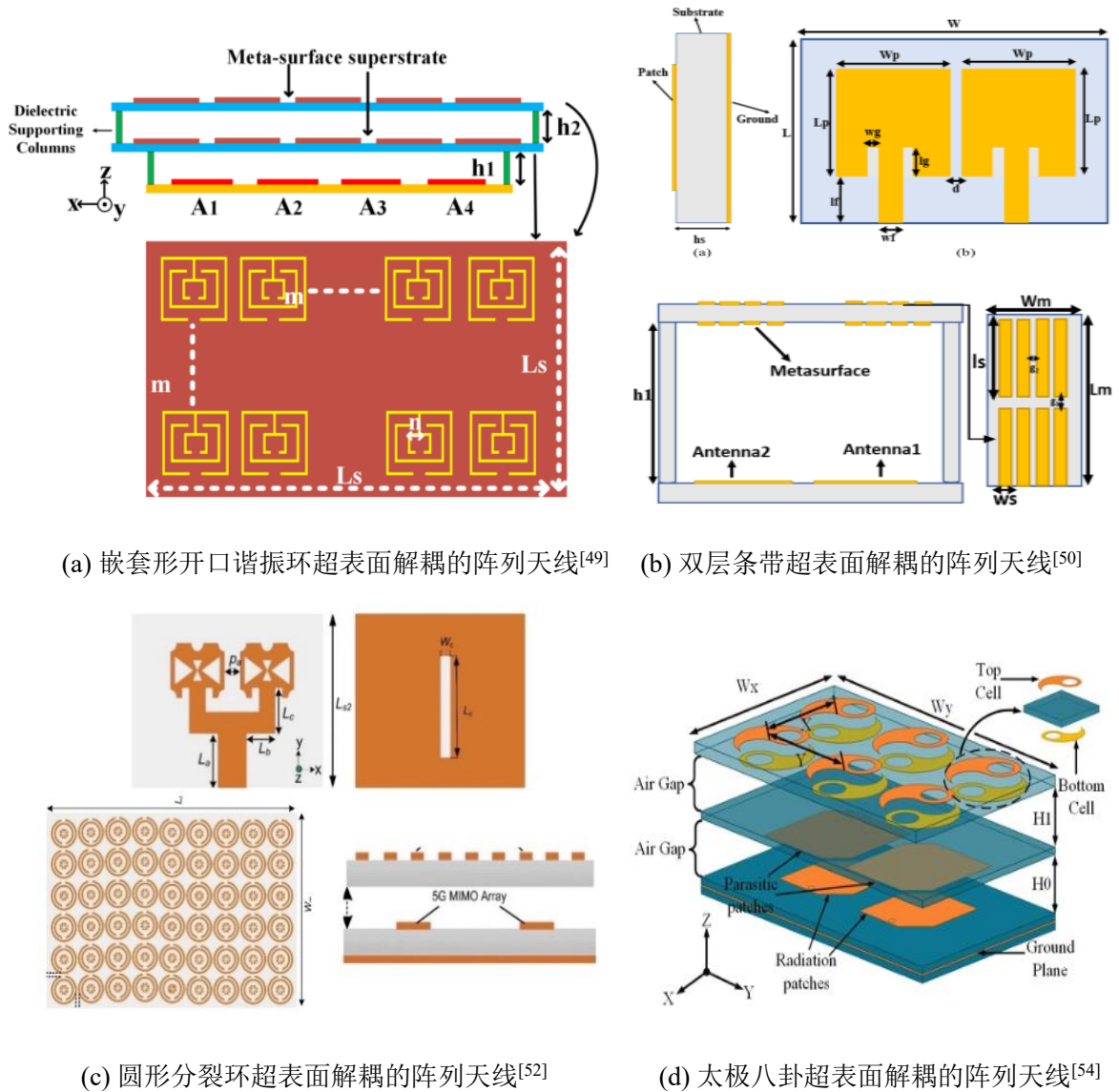


图 1.10 基于贴片型超表面解耦的阵列天线

Fig.1.10 Array antennas based on patch MS decoupling

1.3 论文主要工作及章节安排

1.3.1 论文主要工作

本文研究基于超表面解耦的紧耦合阵列天线，可概括为以下三部分：

(1) 设计一种基于耶路撒冷十字超表面的紧耦合阵列天线。在二单元紧耦合贴片天线上方加载 5×6 耶路撒冷十字单元组成的超表面减小天线单元间的相互耦合，天线单元的间距仅为 $0.015\lambda_0$ 。天线工作于 WiMAX 3.5 GHz 频段，-10 dB 阻抗带宽为 13.83% (3.23-3.71 GHz)，工作频带内隔离度达到 18 dB 以上，且具有较低的剖面高

度和较小单元间距。

(2) 设计一种基于圆环形超表面的紧耦合阵列天线。矩形贴片天线四周加载四个 L 形寄生贴片展宽带宽，天线上方加载 5×5 圆环形单元组成的超表面减小天线单元间的相互耦合。天线工作于 5G Sub-6G 频段，-10dB 阻抗带宽为 23.49% (4.02-5.09 GHz)，宽频带内隔离度达到 16.3 dB 以上，且天线具有良好的辐射特性。

(3) 设计一种基于椭圆形双层超表面的紧耦合阵列天线。在矩形贴片天线上刻蚀一对开路缝隙实现双频，在天线上方加载椭圆形双层超表面减少双频段的相互耦合。天线工作于 WiMAX 的 2.6GHz 和 3.5GHz 频段，-10 dB 阻抗带宽为 8.83% (2.49-2.72 GHz) 和 8.50% (3.38-3.68 GHz)，双频段内隔离度分别达到 19 dB 和 20 dB 以上，且天线具有较低的剖面高度。

1.3.2 论文章节安排

第一章介绍了基于超表面的紧耦合阵列天线这一课题的研究背景及意义，详细阐述了一些传统解耦技术和超表面解耦技术，最后对本课题主要研究工作和各部分安排做了概括说明。

第二章设计了一种基于耶路撒冷十字超表面解耦的紧耦合阵列天线。在超表面解耦原理的基础上，设计了耶路撒冷十字超表面单元。单元在 3.5 GHz 处介电常数实部为负，磁导率实部为正。将耶路撒冷十字超表面加载在紧耦合阵列天线上方，天线可应用于 WiMAX 3.5 GHz 频段，单元间的隔离度提高了 10.5 dB 以上。

第三章设计一种基于圆环形超表面解耦的紧耦合阵列天线。在超表面解耦原理的基础上，设计了圆环形超表面单元。单元在 4.5 GHz 处介电常数实部为负，磁导率实部为正。将圆环形超表面加载在紧耦合宽频阵列天线上方，天线应用于 5G Sub-6 GHz 频段，且宽频带内单元间隔隔离度提高了 8 dB 以上。

第四章设计了一种基于椭圆形双层超表面解耦的紧耦合阵列天线。在超表面解耦原理的基础上，设计了椭圆形双层超表面单元，由两个不同大小的椭圆形贴片组成。单元的介电常数和磁导率在 2.6 GHz 为正和负，在 3.5 GHz 为负和正。将椭圆形双层超表面加载在紧耦合双频阵列天线上方，天线工作在 WiMAX 的 2.6 GHz 和 3.5 GHz 频段，双频段内的隔离度分别提高了 13.5 dB 和 18.4 dB。

第五章对本文的研究工作做出总结及展望，并分析了工作中存在的问题及后续调整的方向。

2 基于耶路撒冷十字超表面的紧耦合阵列天线

2.1 引言

在无线通信系统中，天线作为发送和接受电磁波的装置，其性能的好坏直接影响通信系统的传输质量。阵列天线通过将信息分解到多个信道中同时工作，凭借其较大信道容量和较高数据速率得到广泛应用^[55]。但随之带来的大尺寸使阵列天线具有局限性，因此紧耦合阵列天线的研究尤为重要。近年来，超表面因其新颖的电磁特性和强大的电磁波调控能力引起国内外学者的广泛关注，在阵列天线解耦方面具有广阔的应用前景。

在紧耦合阵列天线中，天线单元间的强烈耦合导致阵列天线的性能恶化，将共面超表面或覆层超表面与紧耦合阵列天线结合，可以改善天线单元间的隔离度^[56-60]。文献[56]设计了由三个改进型分裂谐振环组成的共面超表面来减少表面波的传播，天线在 5.3 GHz 处的工作频段内隔离度提高了 12.5 dB 以上。相比共面超表面解耦，在阵列天线上方加载覆层超表面不仅可以提高天线单元隔离度，而且可以减小平面占用空间。文献[59]设计了放置在阵列天线上方半波长处的频率选择表面，由周期性排列的小金属贴片组成。该方法利用频率选择表面产生的部分反射波来消除天线单元之间的耦合波，从而实现了工作频率上-34 dB 的耦合抑制，且适用于大规模阵列天线。文献[60]设计了双层矩形条带组成的超表面，具有尺寸紧凑且入射角不变的特点。将超表面加载于巴伦馈电的领结形偶极子阵列天线上方实现解耦，该方法能够在 11.4% 带宽范围实现 25dB 以上的隔离度和 0.12 的包络相关系数，同时有可能扩展到多单元的线性阵列、同时具有 E 面和 H 面耦合的矩形阵列以及双极化阵列中。

本章设计了一种应用于 WiMAX 3.5 GHz 频段的紧耦合阵列天线。将 5×6 耶路撒冷十字覆层超表面加载于二单元紧耦合贴片天线上方减小天线单元间的相互耦合，矩形贴片上刻蚀一个 U 形缝隙用于改善天线的阻抗匹配。在工作频带内，天线单元间的隔离度大于 18 dB，且天线具有较低的剖面高度，较小单元间距及稳定的辐射特性。

2.2 耶路撒冷十字超表面

超表面的电磁特性可以通过超表面单元的周期边界模拟，提出的耶路撒冷十字

超表面单元结构如图 2.1 所示，黄色部分为金属，由两个正交放置的“I”形条带组成，单元印刷在厚度为 1.6 mm 的 FR4 介质基板上，相对介电常数和损耗角正切分别为 4.4 和 0.02，优化参数为： $s_2=9.4$ mm， $s_3=6$ mm， $f=0.5$ mm。超表面单元的 HFSS 仿真模型如图 2.2 所示，单元四周设置为主从边界模拟周期边界，垂直于 z 轴的平面设置为 Floquet 端口，当 y 极化波入射时，超表面被激励。图 2.3(a)给出模拟超表面的 S 参数，由图可知，耶路撒冷十字超表面在 3.5 GHz 处具有最大反射系数和最小透射系数。利用 MATLAB 编程的反演算法^[61]计算出超表面单元的介电常数和磁导率，如图 2.3(b)所示，在 3.3-3.7 GHz 频段，耶路撒冷十字超表面单元的介电常数实部为负，磁导率实部为正，满足超表面解耦原理的性质。

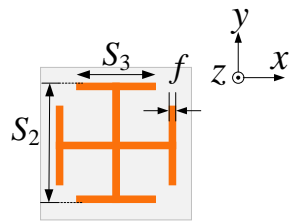


图 2.1 耶路撒冷十字超表面单元示意图

Fig.2.1 Schematic of Jerusalem-cross MS unit cell

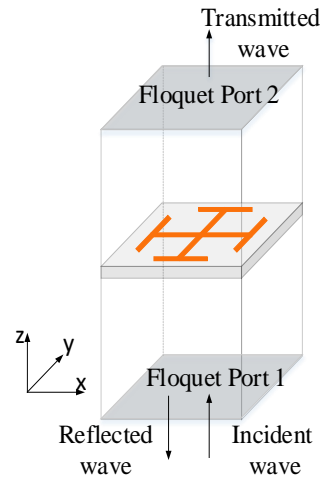
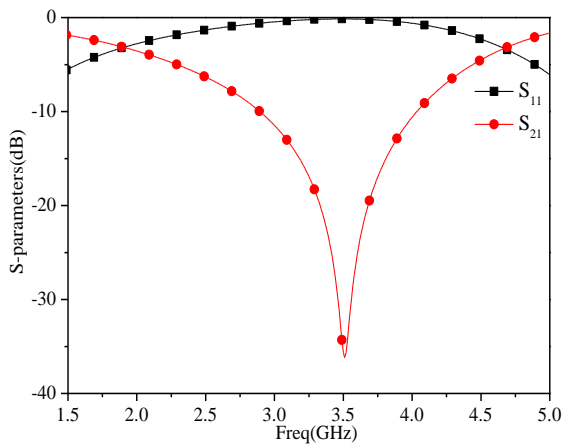
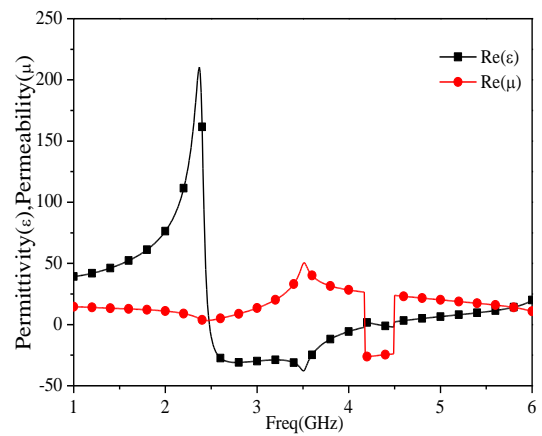


图 2.2 超表面的仿真模型

Fig.2.2 Simulation model of MS



(a) S 参数



(b) 介电常数和磁导率

图 2.3 超表面的 S 参数和电磁参数

Fig.2.3 S-parameters and electromagnetic parameters of MS

2.3 基于耶路撒冷冷十字超表面的紧耦合阵列天线

2.3.1 天线结构

基于耶路撒冷冷十字超表面解耦的阵列天线结构如图 2.4 所示，由超表面和阵列天线组成。超表面印刷在上层介质基板，2 单元贴片天线印刷在下层介质基板，采用微带线馈电，两层介质基板用高度 h_2 的空气层隔开。超表面由 5×6 耶路撒冷冷十字单元组成，加载于 H 面耦合阵列天线上方减小单元间互耦，矩形贴片上蚀一个 U 形缝隙用于改善天线的阻抗匹配。两层介质基板选用均厚度为 1.6 mm 的 FR4，相对介电常数和损耗角正切分别为 4.4 和 0.02，采用商业电磁软件 HFSS 仿真分析，优化的参数如表 2.1 所示。

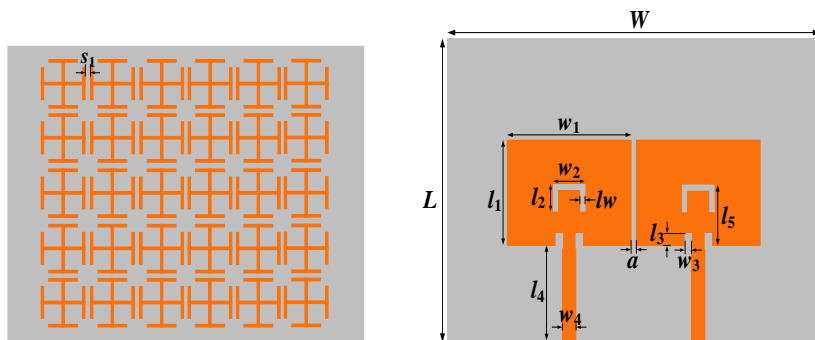
表 2.1 基于耶路撒冷冷十字超表面的阵列天线结构参数

Tab.2.1 Parameters of array antenna based on Jerusalem-Cross MS

参数	L	W	l_1	w_1	l_2	w_2	l_3	h_1
单位 (mm)	55	74	20	26	4.5	7	2	1.6
参数	w_3	lw	l_4	w_4	l_5	a	h_2	s_1
单位 (mm)	1.5	1	18	3	7	1.3	5	1



(a) 侧视图



(b) 超表面俯视图

(c) 耦合天线俯视图

图 2.4 基于耶路撒冷冷十字超表面的阵列天线示意图

Fig.2.4 Configuration of array antenna based on Jerusalem-Cross MS

图 2.5 为加载超表面前后阵列天线的 S 参数曲线，由图可知，天线工作在 WiMAX 的 3.5 GHz 频段。未加载耶路撒冷十字超表面时，天线的-10 dB 阻抗带宽为 4.3%(3.42-3.57 GHz)，单元间隔离度为 7.5 dB；加载耶路撒冷十字超表面后，由于阵列天线与耶路撒冷十字超表面之间耦合产生了新的谐振点，两个谐振频率分别出现在 3.37 GHz 和 3.56 GHz 处，-10dB 阻抗带宽展宽为 13.83%(3.23-3.71 GHz)，同时工作频带内天线隔离度均提高到 18 dB，最大提高到 25 dB 以上。图 2.6 为天线的仿真效率曲线，由图可知，加载超表面解耦后，天线辐射效率提高了 10% 以上。

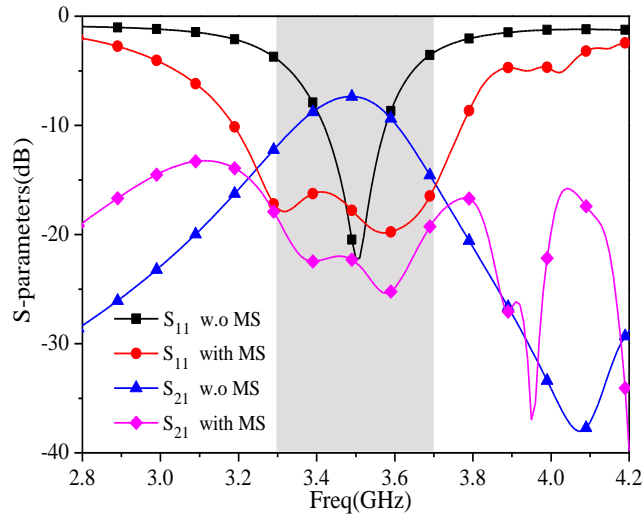


图 2.5 基于耶路撒冷十字超表面的阵列天线 S 参数

Fig.2.5 S-parameters of array antenna based on Jerusalem-Cross MS

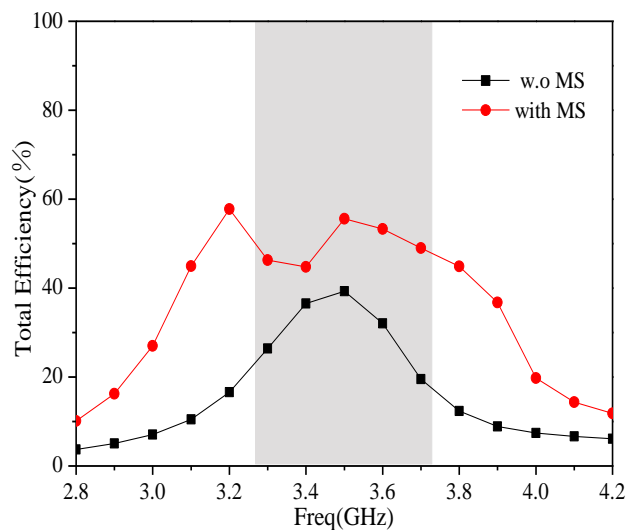


图 2.6 基于耶路撒冷十字超表面的阵列天线效率

Fig.2.6 Efficiency of array antenna based on Jerusalem-Cross MS

2.3.2 解耦原理

为了解释耶路撒冷十字超表面的解耦原理，研究了天线的表面电流分布。图 2.7 为阵列天线在 3.5 GHz 处的表面电流分布，天线 1 被激励，天线 2 接 $50\ \Omega$ 匹配负载。由图 2.7(a)可知，未加载耶路撒冷十字超表面时，耦合电流在天线 2 的微带馈线和矩形辐射贴片上均有较强的分布，使得天线的隔离度较差；由图 2.7(b)可知，加载耶路撒冷十字超表面之后，天线 2 的微带馈线和矩形辐射贴片上分布的耦合电流均明显减少，因此天线隔离度得到较大提高。综上所述，说明耶路撒冷十字超表面能有效地减少单频阵列天线单元间的耦合波，实现良好的解耦效果。

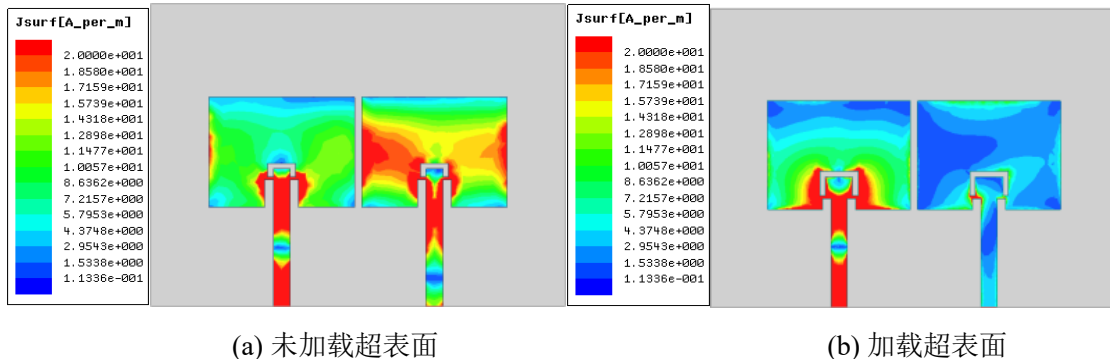


图 2.7 基于耶路撒冷十字超表面的阵列天线表面电流分布

Fig.2.7 Surface current distribution of array antenna based on Jerusalem-Cross MS

2.3.3 参数分析

通过对天线进行敏感性分析，发现 U 形缝隙的长度 l_s ($l_s = 2 * l_2 + w_2$)、空气层的高度 h_2 以及超表面单元的数量对天线性能影响较大。采用 HFSS 软件对敏感参数扫描分析以获得最佳的天线性能，分析某一参数对天线性能的影响时，其他参数不发生改变。

图 2.8 给出了 U 形缝隙的长度 l_s 对天线 S 参数的影响，由图可知，当 l_s 变化时，对天线的 S_{21} 影响不大，而对 S_{11} 影响较大。在工作频段内，随着 l_s 的增大，低频段的阻抗匹配逐渐变好，高频段的阻抗匹配逐渐变差，当 $l_s = 7\ \text{mm}$ 时，天线的 S_{11} 在 WiMAX 的 3.5 GHz 频段内达到 -18 dB 以下，匹配性能最好。图 2.9 给出空气层的高度 h_2 对天线 S 参数的影响，由图可知，当 h_2 变化时，对天线的 S_{11} 和 S_{21} 均有较大影响。在工作频带内，随着 h_2 的增大，天线的阻抗匹配逐渐变差，低频段隔离度逐渐增大，高频段隔离度逐渐减小。当 $h_2 = 5\ \text{mm}$ 时，天线的 S_{21} 在工作频段内达到 -18 dB 以下，同时满足 WiMAX 的 3.5 GHz 频段要求。图 2.10 给出耶路撒冷十字超表面单

元的数量对天线 S 参数的影响，由图可知，当超表面单元的数量变化时，天线的 S_{11} 和 S_{21} 均有较大变化。在工作频带内，随着超表面单元数量的增加，天线的阻抗匹配逐渐变好，低频段隔离度逐渐减小，高频段隔离度先增大后减小。当选择 5×6 耶路撒冷十字超表面时，天线的 S_{11} 达到 -15 dB 以下， S_{21} 达到 -18 dB 以下。综上所述，通过选择 $l_s=7$ mm、 $h_2=5$ mm 及加载 5×6 耶路撒冷十字超表面，使天线可以工作在 WiMAX 的 3.5 GHz 频段内，同时实现了最好的匹配性能和解耦效果。

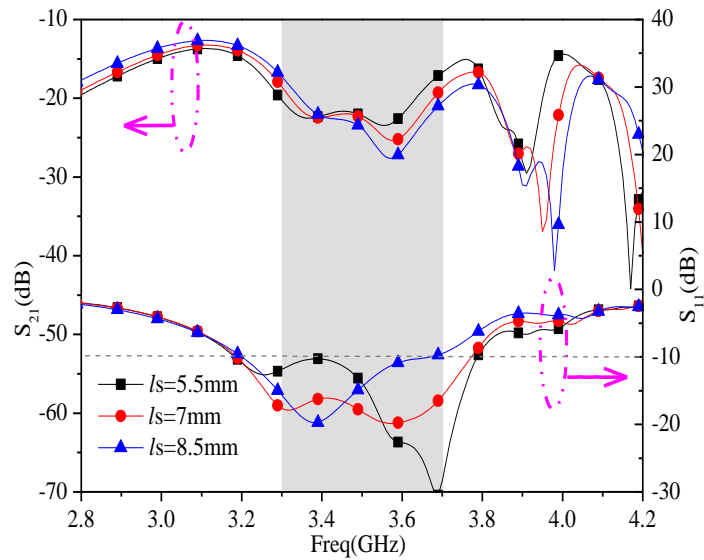


图 2.8 不同 l_s 时的 S 参数

Fig.2.8 S-parameters for different l_s

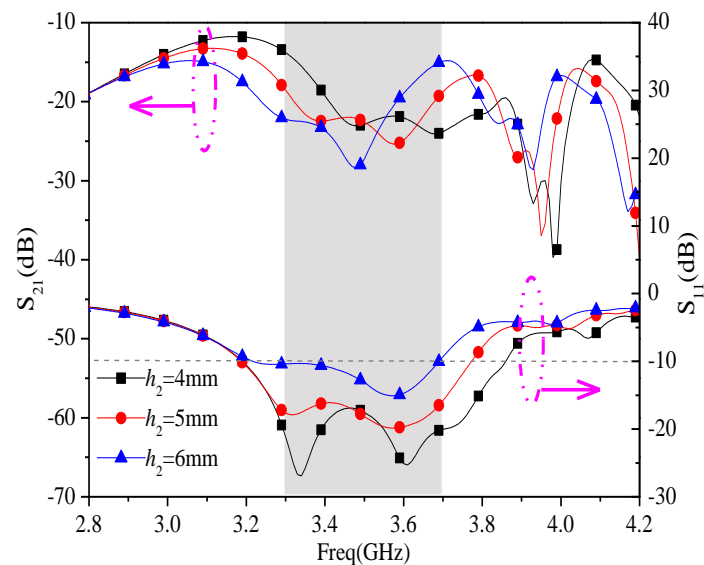


图 2.9 不同 h_2 时的 S 参数

Fig.2.9 S-parameters for different h_2

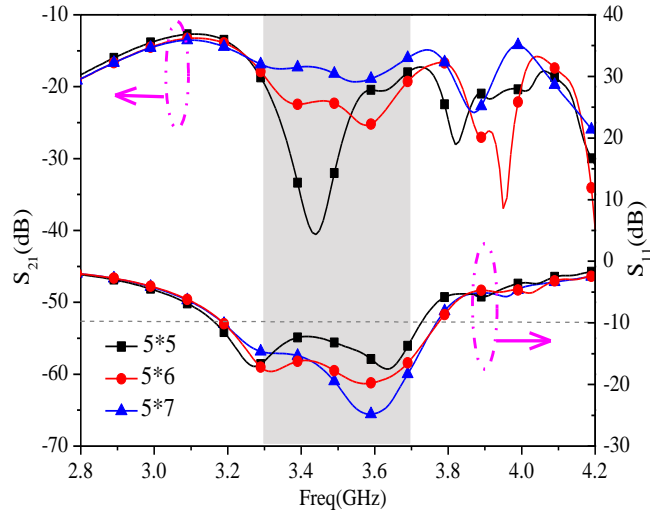


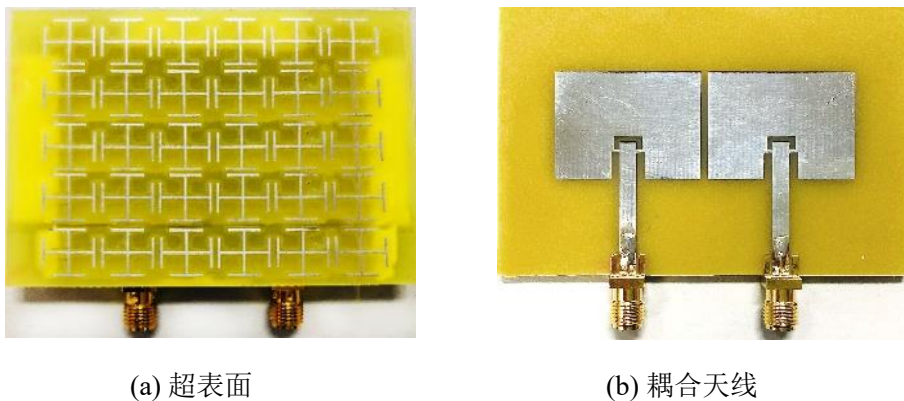
图 2.10 不同超表面单元数量的 S 参数

Fig.2.10 S-parameters for different numbers of MS unit

2.3.4 仿真与测试结果

天线印刷在相对介电常数为 4.4 的 FR4 介质基板上，图 2.11 为天线的实物图。采用 Agilent 公司 N5222A 矢量网络分析仪测量天线的 S 参数，Lab-Volt 公司 8092 型自动天线测量系统测量天线的辐射方向图。

图 2.12 为天线仿真和测量的 S 参数曲线，由图可知，天线工作在 WiMAX 的 3.5 GHz 频段，仿真与测量结果基本吻合。仿真的 -10 dB 阻抗带宽为 16.98% (3.18-3.77 GHz)，-18 dB 解耦带宽为 11.40% (3.3-3.7 GHz)；测量的 -10 dB 阻抗带宽为 13.83% (3.23-3.71 GHz)，天线在工作频段内的隔离度提高到 18 dB 以上，-18 dB 解耦带宽为 10.34% (3.3-3.66 GHz)。



(a) 超表面

(b) 耦合天线

图 2.11 基于耶路撒冷冷十字超表面的阵列天线实物图

Fig.2.11 Fabricated photographs of array antenna based on Jerusalem-Cross MS

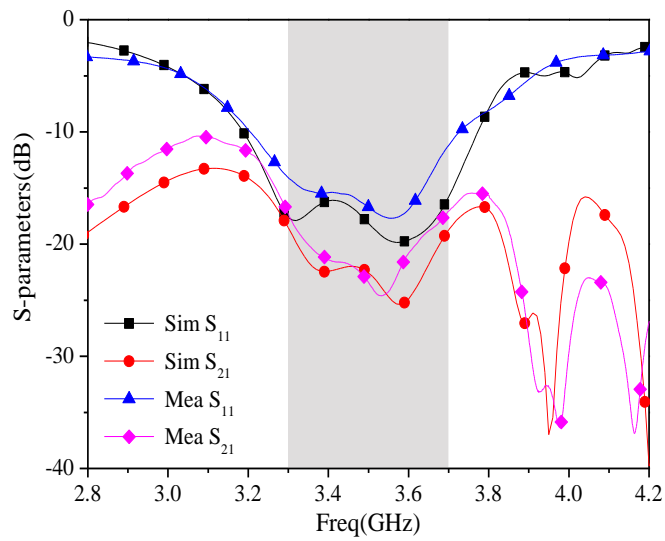


图 2.12 基于耶路撒冷十字超表面的阵列天线 S 参数

Fig.2.12 S-parameters of array antenna based on Jerusalem-Cross MS

图 2.13 为天线加载耶路撒冷十字超表面前后在 3.5 GHz 处的归一化辐射方向图，其中天线 1 被激励，天线 2 接 50Ω 匹配负载。由图可知，测量与仿真结果基本一致，加载 MS 前后，阵列天线的辐射特性基本不变，能够实现较好的宽边辐射。图 2.14 为天线的增益曲线，超表面与耦合天线通过形成法布里谐振腔提高了天线增益，由图可知，加载超表面后，天线的仿真峰值增益从 2.56 dBi 提高至 5.7 dBi，天线的实测峰值增益从 1.28 dBi 提高至 4.52 dBi，略低于仿真增益。

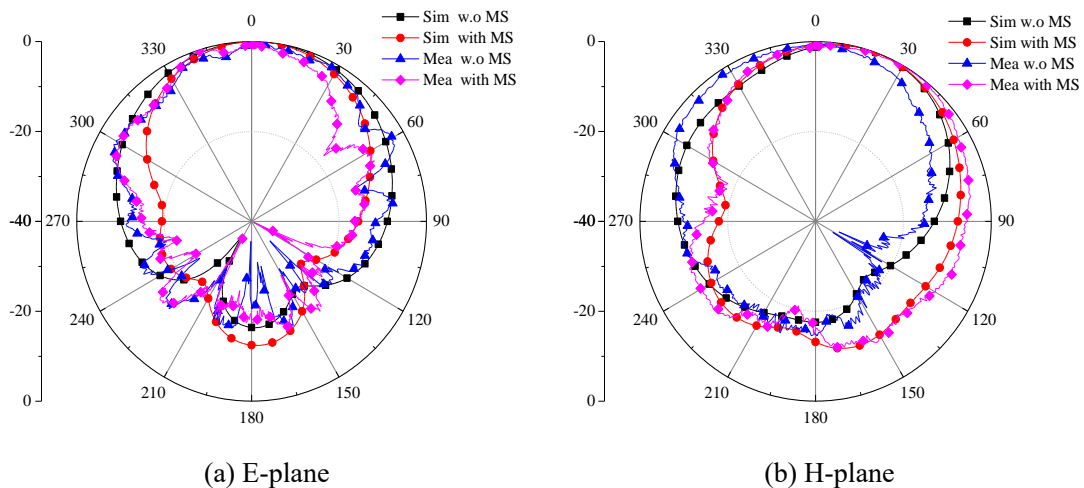


图 2.13 基于耶路撒冷十字超表面的阵列天线辐射方向图

Fig.2.13 Radiation patterns of array antenna based on Jerusalem-Cross MS

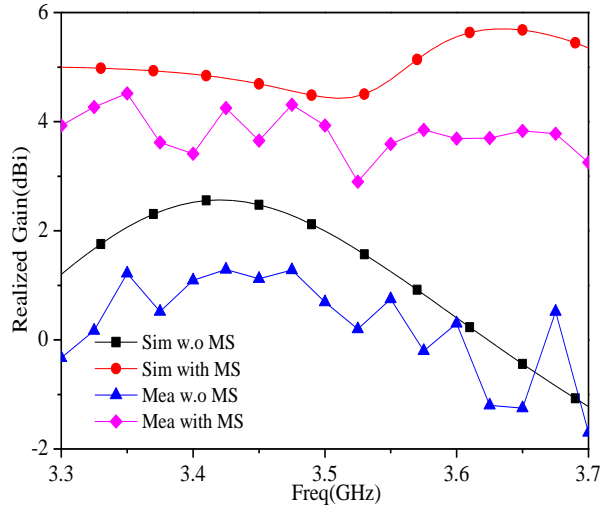


图 2.14 基于耶路撒冷冷十字超表面的阵列天线增益

Fig.2.14 Gain of array antenna based on Jerusalem-Cross MS

最后，表 2.2 给出了本章天线和文献报道的天线的性能比较，表中的 λ_0 指的是天线工作的中心频率对应的自由空间波长。由表可知，本章设计的基于耶路撒冷冷十字超表面解耦的紧耦合阵列天线单元间距最小为 $0.015\lambda_0$ ，剖面最低为 $0.1\lambda_0$ ，同时实现了较大的解耦带宽。文献[46],[47],[57],[58]设计的天线隔离度提高较大，但是解耦带宽较窄，均为 10% 以下。文献[60]设计的天线解耦带宽最宽，达到了 11.4%，但是剖面高度较高达到 $0.44\lambda_0$ 。因此综合各种性能，本章设计的天线在实现较大解耦带宽的同时，天线结构紧凑，剖面较低，相较于现有设计，具有一定竞争力。

表 2.2 基于超表面解耦的紧耦合单频天线的性能比较

Tab.2.2 Performance comparison of closely coupled single band antennas based on MS decoupling

文献	频率(GHz)	解耦带宽(%)	边-边距离(λ_0)	高度(λ_0)	隔离度提高 (dB)
[46]	3.5	1.14	0.023	0.19	15
[47]	3.51	1.4	0.023	0.32	15
[57]	5.8	7.69	0.09	0.18	12
[58]	5.8	8.69	0.02	0.15	12
[60]	3.5	11.4	0.035	0.44	15
本章	3.5	10.34	0.015	0.1	10.5

2.4 本章小结

本章设计了一种应用于 WiMAX 3.5 GHz 频段的基于耶路撒冷十字超表面的紧耦合阵列天线。在阵列天线上方加载具有负介电常数和正磁导率的耶路撒冷十字超表面减小单元间的相互耦合，矩形贴片上刻蚀 U 形缝隙改善天线的阻抗匹配。紧耦合天线单元间距仅为 1.3 mm($0.015\lambda_0$)，测量结果表明，-10 dB 阻抗带宽展宽为 13.83% (3.23-3.71 GHz)，工作频带内隔离度达到 18 dB 以上。紧耦合阵列天线具有较低剖面 and 较小单元间距，结构简单紧凑，具有良好的辐射特性，成本较低，易于加工。

3 基于圆环形超表面的紧耦合阵列天线

3.1 引言

随着移动通信技术的快速发展，窄带天线已经无法满足通信系统的要求，宽频天线凭借信道容量大、频带利用率高等优势，成为通信系统的主要发展趋势。同时阵列天线凭借高信道容量、较快信息传输速率，能够满足实际应用中的高需求，从而得到广泛应用。

目前，覆层超表面解耦技术被广泛应用于紧耦合宽频阵列天线中^[62-67]。文献[62]设计了巴伦馈电的方环形偶极子阵列天线，加载 4×10 矩形条带组成的双层超表面解耦。分别对沿 H 平面和 E 平面布置的阵列加载超表面进行解耦，在保证良好匹配的前提下，两种情况下的隔离度都可以达到 25 dB。此外，阵列天线的增益均得到了显著改善，该解耦方法可以广泛应用于尺寸约束严格的 5G 基站中。文献[64]设计了一种同轴馈电的贴片阵列天线，设计的“工”字形超表面结构在宽频带上具有正介电常数和负磁导率，可以用作减小 MIMO 天线系统的相互耦合。加载双层超表面展宽天线带宽，解耦带宽为 15.38%，隔离度提高了 8dB，适用于 5G MIMO 系统和大规模天线阵列。文献[65]设计了一种加载寄生贴片展宽带宽的阵列天线，采用新型混合解耦结构抑制相互耦合。在天线上方加载由六组窗型主反射器和三个十字形次反射器组成的 ADS 实现宽带解耦，同时在接地板上刻蚀矩形缝隙进一步减小天线单元互耦合，最终整个频带内隔离度提高到 30dB，解耦带宽为 21.59%。

本章设计了一种应用于 5G Sub-6 GHz 频段的紧耦合阵列天线。矩形贴片天线四周加载四个 L 形寄生贴片从而展宽带宽，天线上方加载 5×5 圆环形单元组成的覆层超表面减小天线单元间的相互耦合。阵列天线在 22.22% (4 GHz-5GHz) 的宽频带内工作，隔离度达到 16dB 以上，增益也得到了极大改善，且天线具有良好的辐射特性。

3.2 圆环形超表面

超表面的电磁特性可以通过超表面单元的周期边界模拟，提出的圆环形超表面单元如图 3.1 所示，黄色部分为金属层，印刷在厚度为 1.6 mm 的 FR4($\epsilon_r = 4.4$, $\tan \delta = 0.02$)介质基板上，优化参数为： $l_d = 8$ mm， $w_d = 0.5$ mm。超表面单元的 HFSS 仿真模型如图 3.2 所示，单元四周设置为主从边界模拟周期边界，垂直于 z 轴

的平面设置为 Floquet 端口，当 y 极化波入射时，超表面被激励。图 3.3(a)给出模拟超表面的 S 参数，由图可知，圆环形超表面在 4.5 GHz 左右具有最大反射系数和最小透射系数，工作频段为 4-5 GHz。采用 MATLAB 编程的反演算法提取超表面单元的介电常数 ϵ 和磁导率 μ 。由图 3.3(b)可知，在 4-5 GHz 的宽频段内， ϵ 的实部为负， μ 的实部为正。

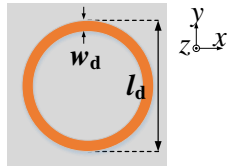


图 3.1 圆环形超表面单元示意图

Fig.3.1 Schematic of Circular ring MS unit cell

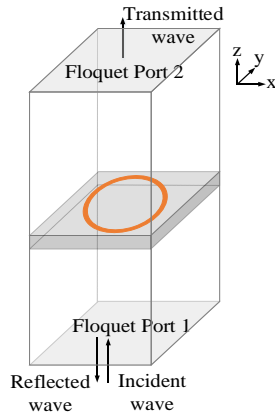
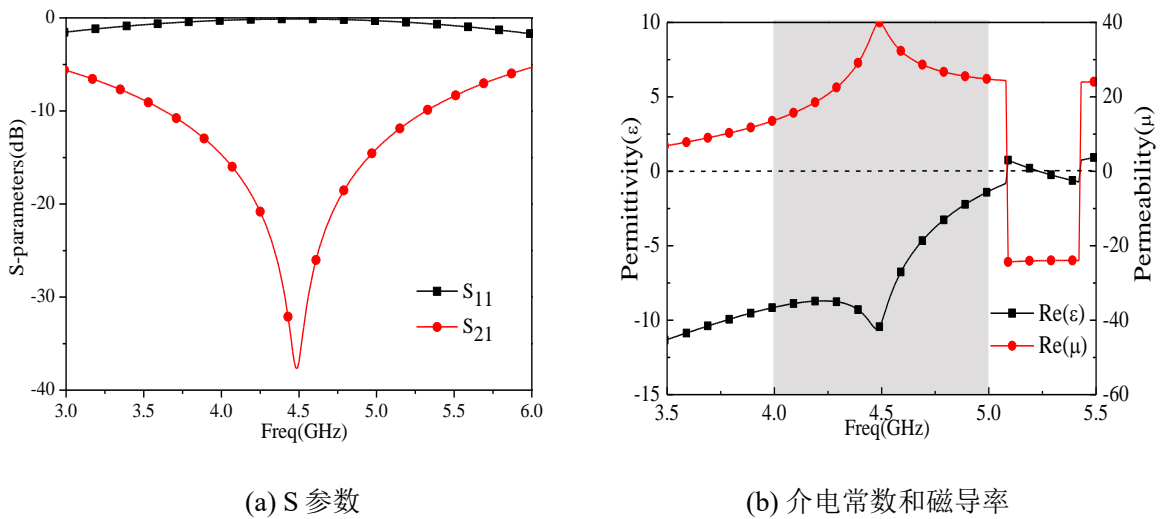


图 3.2 超表面的仿真模型

Fig.3.2 Simulation model of MS



(a) S 参数

(b) 介电常数和磁导率

图 3.3 超表面的 S 参数和电磁参数

Fig.3.3 S-parameters and electromagnetic parameters of MS

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/648001003063006127>