

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201909005



60 GHz 低损耗宽带的超表面天线阵列

柯翔敏¹, 施晨昀², 陈江¹, 陈瑞虹¹

(1. 华侨大学 网络与教育技术中心, 福建 厦门 361021;
2. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210000)

摘要: 研究一种基于超表面的 60 GHz 1×2 宽带天线阵列. 为降低传输损耗, 天线阵列由间隙波导功分器馈电, 间隙波导传输线两侧放置电磁带隙结构, 能量通过缝隙与顶层超表面耦合, 从而向空间辐射. 天线阵列安装在 Rogers 4350b 介质基板上, 由超表面辐射器引入的准 TM_{30} 谐振模式与缝隙辐射单元的本征模式结合, 从而拓展天线带宽, 改善天线增益. 研究表明: 天线阵列 -10 dB $|S_{11}|$ 带宽仿真结果为 49.3~65.0 GHz, 实测结果为 48.5~64.8 GHz, 覆盖 57.0~64.0 GHz 范围的无授权毫米波通信频段; 在匹配带宽内, 天线的最大增益为 11.8 dB, 3 dB 增益带宽为 15%.

关键词: 超表面; 间隙波导; 毫米波天线阵列; 低损耗宽带

中图分类号: TN 820.152 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)05-0654-05

60 GHz Low-Loss Wideband Metasurface Antenna Array

KE Xiangmin¹, SHI Chenyun², CHEN Jiang¹, CHEN Ruihong¹

(1. Center of Network and Educational Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. School of Electronic Engineering and Optical Electronic Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract: A 60 GHz 1×2 gap waveguide coupled feed broadband antenna array based on hypersurface is studied. In order to reduce the transmission loss, the antenna array is fed by an optimized gap waveguide power divider. The electromagnetic band gap structure is placed on both sides of the gap waveguide transmission line, and the energy is coupled with the super surface of the top layer through the gap, so as to radiate into space. The antenna array is mounted on the Rogers 4350b dielectric substrate. The quasi TM_{30} resonant mode introduced by the hypersurface radiator is combined with the eigenmode of the slot radiating element to improve the bandwidth and gain of the antenna. The research results show that the antenna array -10 dB $|S_{11}|$ bandwidth, the simulation results are 49.3 to 65.0 GHz, the measured one ranges from 48.5 to 64.8 GHz, covering 57.0 to 64.0 GHz unauthorized millimeterwave communication band; in the matching bandwidth, the maximum gain of the antenna is 11.8db, and the 3dB gain bandwidth is 15%.

Keywords: metasurface; gap waveguide; millimeter wave antenna array; low-loss wideband

在 5G 概念提出后, 人们对于更高速率通信的需求日益迫切, 其中, 毫米波频段通信技术受到人们更多的关注. 毫米波系统因为工作频段高, 有着通信速率快、穿透性强, 分辨率高的优点. 天线作为毫米波无线通信系统最前端, 是决定整个系统通信速率和通信带宽的重要组件. 文献[1]提出一种基于低温共烧陶瓷(LTCC)工艺的高性能毫米波天线, 但其造价高昂无法进行稳定量产. 介质集成波导是毫米波天线的另一备选方案, 但其本身的传输带宽较窄约为 7%^[2-3]. 文献[4]基于介质集成波导提出一种背腔

收稿日期: 2019-09-04

通信作者: 柯翔敏(1987-), 男, 工程师, 主要从事计算机技术的研究. E-mail: kexiangmin@hqu.edu.cn.

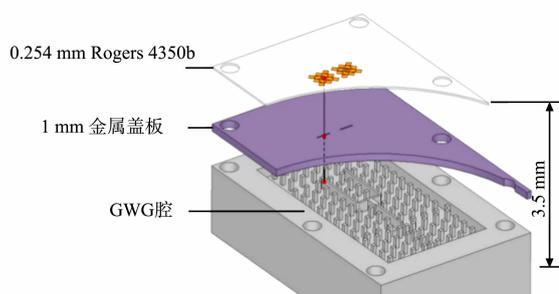
基金项目: 福建省中青年教师科研基金资助项目(JZ180187, JZ180193)

宽带天线,但其纵向剖面为 3.6 倍的波导波长,不利于集成,且传输损耗随阵列尺寸增大而快速上升.

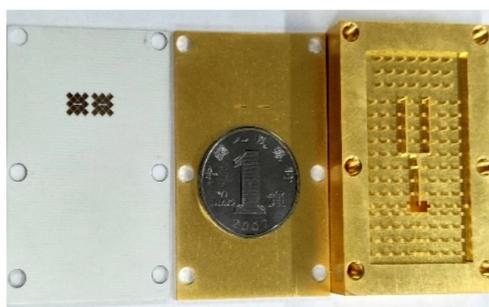
Kildal 等^[5]于 2012 年首次提出了间隙波导传输线概念. 间隙波导传输线比等长度微带线和空气波导拥有更低的传输损耗,随后陆续报导了基于间隙波导的几种毫米波天线^[6-7]. 但是,文献中为了天线宽带效果增设的附加结构依然具有高剖面的缺点. 近年来关于宽带超表面天线的研究成果给出了可能的解决方案^[8-10],文献[7]基于文献[11-15]的研究成果,提出了适用于 sub-6 GHz 频段的宽带超表面,该天线具有超低剖面宽带特性. 在此基础上,本文提出一种结合宽带超表面和间隙波导传输结构的毫米波天线阵列,并进行实际的安装测试.

1 天线主体结构

天线阵列分为辐射结构和馈电网络两部分,如图 1 所示. 图 1 中:上部辐射结构由金属盖板上的耦合缝隙与顶层的超表面组成,馈电网络是间隙波导结构,它包含了一分二金属条带传输线和周期性金属柱构成的带阻结构. 金属条带传输线末端为 WR-15 过度结构,能量从背面波导口馈送进入天线. 天线阵列剖面为 3.5 mm,约等于 0.67 倍的波长(60 GHz).



(a) 天线结构示意图



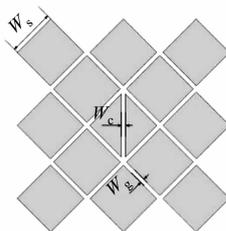
(b) 实际加工的天线阵列

图 1 天线阵列的主体结构

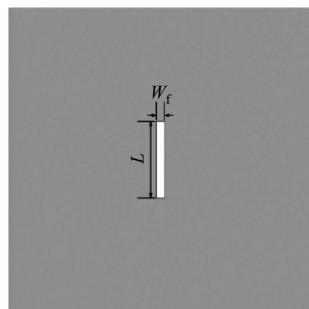
Fig. 1 Main structure of antenna array

1.1 超表面结构的设计

图 2 为超表面的结构设计,图 3 为超表面辐射体的特征模电流. 图 2 中: w_s 为枝节宽度; w_g 为缝隙宽度; w_c 为中缝宽度; w_f 为馈电缝隙宽度; l_f 为馈电缝隙长度. 由图 2 可知:超表面由 13 块间隔 0.1 mm 的矩形贴片($0.85\text{ mm} \times 0.85\text{ mm}$)组成,超表面底层为馈电缝隙($2.5\text{ mm} \times 1\text{ mm}$). 通过电磁仿真可以发现,其表面电流幅度存在 3 个零点(图 3(a)),验证了超表面结构引入的是准 TM_{30} 的谐振模式.



(a) 超表面顶层

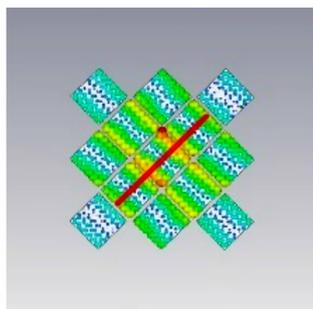


(b) 超表面底层

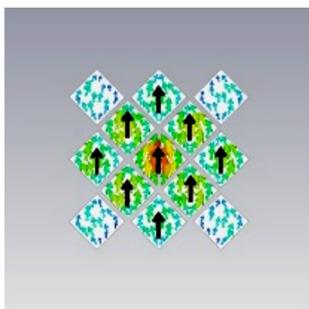
图 2 超表面的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of super surface

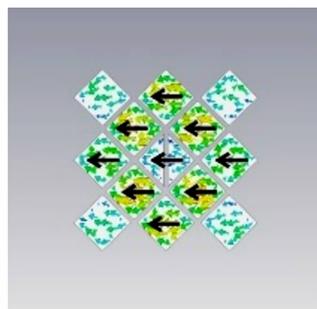
超表面辐射体的特征模电流依次对应天线的正交特征模 model 4,如图 4 所示.



(a) 天线表面电流



(b) 模式电流 1



(c) 模式电流 2

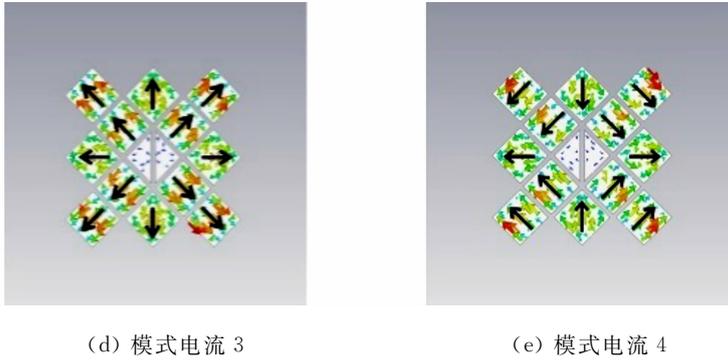


图3 超表面辐射体的特征模电流

Fig. 3 Characteristic mode current of trans-supersurface radiator

图4中: $|\eta_{MS}|$ 为模式效率; f 为频率. 由图4可知: mode 1 与 mode 2 的中心点表面电流幅值最高, 为法向辐射模式, 而 mode 3 与 mode 4 的中心点为表面电流零点, 是全向辐射模式.

根据特征模理论, 辐射结构的特征电流可以被视为几个正交电流对叠加的结果^[12]. 即

$$\text{Im } \mathbf{J}_n = \lambda_n \cdot \text{Re } \mathbf{J}_n, \quad (1)$$

$$|\eta_{MS}| = \left| \frac{1}{1 + j\lambda_n} \right|, \quad (2)$$

式(1), (2)中: Re 和 Im 分别为特征输入阻抗实部和虚部; \mathbf{J}_n 为特征表面电流; λ_n 为特征电流的本征值; $|\eta_{MS}|$ 为模式效率, 当其大于 0.8 时, 表示所对应的模式为主要工作模式. 对上部辐射结构利用特征模工具计算模式效率, 并按照谐振频点由低到高进行模式分类.

由图4可知: 位于超表面下方的缝隙谐振为 49.8~56.6 GHz, 准 TM_{30} 模式即 mode 1 的谐振为 53.0~70.0 GHz; 当工作频率大于 65 GHz 时, 作为 mode 1 的正交特征模的 mode 2 与高阶全向辐射模式 mode 4 也开始辐射. 考虑到天线交叉极化电平与天线辐射方向图的稳定性, 天线应当工作于 49.8~65.0 GHz 的频带范围内.

1.2 间隙波导功分器的设计

间隙波导功分器中, 通过调整周期性金属柱的尺寸和分布距离可以在特定频段内形成人造磁导体. 根据微波理论, 人造磁导体等效微波开路可以屏蔽电磁波泄露, 并降低传输损耗. 图5为周期性单元禁带图. 图5中: β 为相移常数; f 为频率; 电磁波能量在传输线上方 0.1 mm 厚度的空气层中传播, 其他方向传播的能量都会被周期性单元屏蔽, 而周期性单元能提供的禁带为 48.0~67.0 GHz.

间隙波导功分器的基本形式, 如图6所示, 其由传统的一分二金属脊线和人造磁导体填充结构共同组成. 具体的尺寸参数如下: 枝节宽度(W_s)为 0.86 mm; 枝节长度(L_s)为 0.68 mm; 变换端宽度(W_t)为

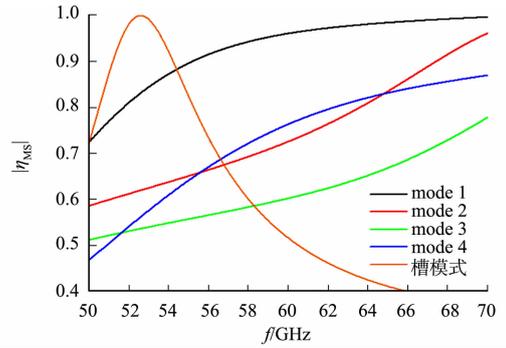


图4 不同特征模电流的模式效率

Fig. 4 Mode efficiency of different characteristic mode currents

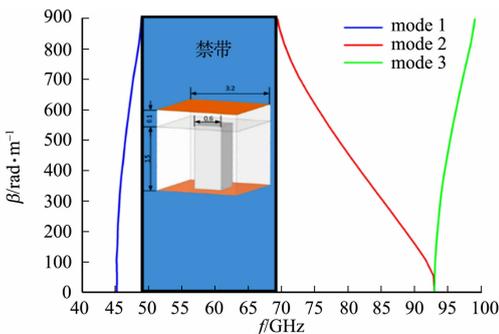


图5 周期性单元禁带图

Fig. 5 Stopband diagram of periodic structure

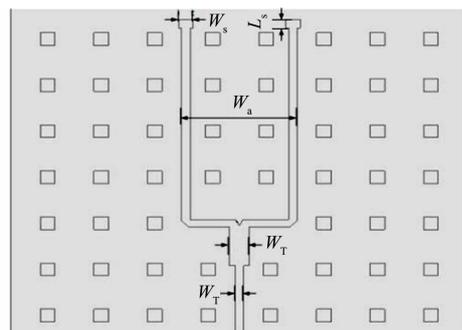


图6 间隙波导功分器

Fig. 6 Gap waveguide power divider

0.8 mm; 变换端长度(L_1)为 2.2 mm; 传输线宽度(W_T)为 0.34 mm; 缝隙中心距离(W_a)为 5.15 mm. 传输线末端为一阻抗变换结构, 用于调整功分器和馈电缝隙之间的阻抗匹配.

当电磁波能量传输至传输线末端时, 能量透过上方金属层的缝隙与微带超表面进行耦合, 进而辐射到空间中. 间隙波导与其他传输结构的 60 GHz 单位长度传输损耗对比, 如表 1 所示. 表 1 中: f 为工作频率. 由表 1 可知: 间隙波导的传输损耗相比微带线降低了 87%, 与矩形波导的传输损耗最为接近, 且无需精密焊接, 制造成本下降 50% 以上.

2 天线阵列性能对比

使用 HFSS 对天线阵列进行有限元仿真, 得到阵列的匹配带宽在 49.0~64.0 GHz, 如图 7~10 所示. 由图 7~10 所示可知: 实际测量结果显示天线能够工作在 48.5~64.8 GHz, 与仿真结果一致性较好, 覆盖了 5G 毫米波通信的无授权频段. 实测天线增益在工作频段内可达 11.8 dB, 且交叉极化电平在 -25 dB. 基本满足室内短距离通信的需求.

表 1 不同传输类型的传输损耗对比

Tab. 1 Comparison of transmission loss of different transmission types

传输类型	中心频点损耗/ dB · cm ⁻¹	f /Hz
矩形波导(空气介质)	0.013	50.0~75.0
微带线(介质: RogersRT5880)	0.254	50.0~75.0
间隙波导	0.037	48.0~68.0
SIW(介质: RogersRT5880)	0.132	55.0~65.0

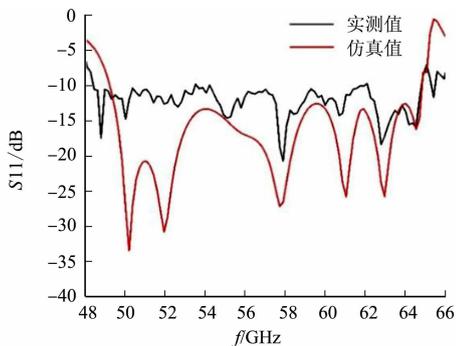


图 7 天线的工作带宽

Fig. 7 Operating band of proposed antenna

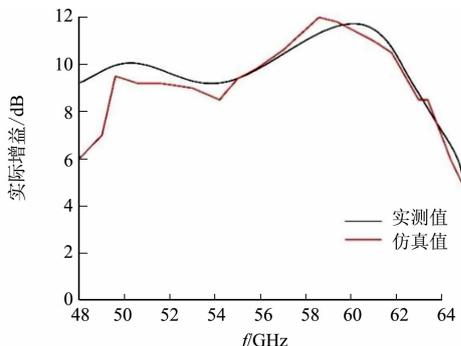


图 8 天线的阵列增益

Fig. 8 Realized gain of antenna array

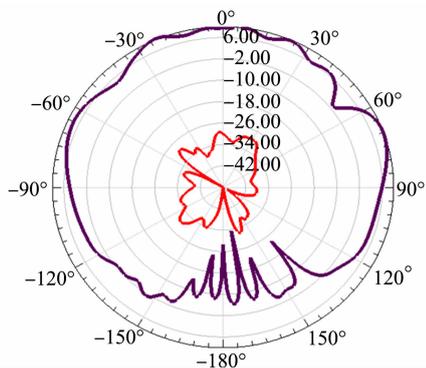


图 9 XOZ 平面方向图

Fig. 9 Radiation pattern (XOZ plane)

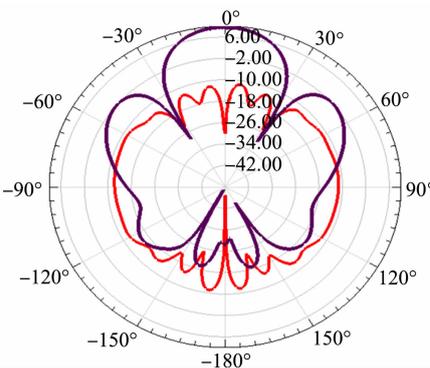


图 10 YOZ 平面方向图

Fig. 10 Radiation pattern (YOZ plane)

文中所设计的天线阵列与参考文献中的天线性能对比, 如表 2 所示. 由表 2 可知: 相比较其他文献提供的天线阵列, 文中所提出的天线阵列具有宽带、低剖面的优势.

3 结束语

基于特征模理论, 提出一种 60 GHz 毫米波天线阵列, 并对天线性能和表面辐射做出预测. 天线具有低损耗, 宽带的优点. 经过

表 2 不同设计的天线性能对比
Tab. 2 Antenna performance comparison of different designs

来源	带宽/%	剖面高度
文献[1]	17	1.6λ ₀
文献[4]	25	3.6λ ₀
文献[6]	24	2.5λ ₀
文中设计	27	0.67λ ₀

实测验证,该天线能够工作于48.5~64.8 GHz的范围,覆盖了57.0~64.0 GHz的无授权通信频段,且具有11.8 dB的增益,结果与理论分析结果吻合.

参考文献:

- [1] XU Junfeng, CHEN Zhining, QING Xianming, *et al.* Bandwidth enhancement for a 60 GHz substrate integrated waveguide fed cavity array antenna on LTCC[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2011, 59(3): 826-832. DOI: 10.1109/TAP.2010.2103018.
- [2] SUN Ling, SUN Baohua, YUAN Jiangpeng, *et al.* Low-profile, quasi-omnidirectional substrate integrated waveguide (SIW) multihorn antenna[J]. *IEEE Antennas Wireless Propag Lett*, 2016, 15: 818-821. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2476346.
- [3] MENCARELLI D, MORINI A, PRUDENZANO F, *et al.* Broadband single-layer slotted array antenna in SIW technology[J]. *IEEE Antennas Wireless Propag Lett*, 2016, 15: 263-265. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2440334.
- [4] LI Yujian, LUK K M. A 60-GHz wideband circularly polarized aperture coupled magneto-electric dipole antenna array[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2016, 64(4): 1325-1333. DOI: 10.1109/TAP.2016.2537390.
- [5] KILDAL P S, ALFONSO E, VALERO-NOGUEIRA A, *et al.* Local metamaterial-based waveguides in gaps between parallel metal plates[J]. *IEEE Antennas Wireless Propag Lett*, 2009, 8: 84-87. DOI: 10.1109/LAWP.2008.2011147.
- [6] DADGARPOUR A, SORKHERIZI M S, KISHK A A. Wideband low loss magneto-electric dipole antenna for 5G wireless network with gain enhancement using meta lens and gap waveguide technology feed[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2016, 64(12): 5094-5101. DOI: 10.1109/TAP.2016.2620522.
- [7] LIN Fenghan, CHEN Zhining. Low-profile wideband metasurface antennas using characteristic mode analysis[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2017, 65(4): 1706-1713. DOI: 10.1109/TAP.2017.2671036.
- [8] ZHANG Lei, WAN Xiang, LIU Shuo, *et al.* Realization of low scattering for a high-gain fabry-perot antenna using coding metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(7): 3374-3383. DOI: 10.1109/TAP.2017.2700874.
- [9] LIN Fenghan, CHEN Zhining. Truncated impedance sheet model for low-profile broadband nonresonant-cell metasurface antennas using characteristic mode analysis[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(10): 5043-5051. DOI: 10.1109/TAP.2018.2854366.
- [10] MORADI A, MOHAJERI F. Side lobe level reduction and gain enhancement of a pyramidal horn antenna in the presence of metasurfaces[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2018, 12(3): 295-301. DOI: 10.1049/iet-map.2017.0376.
- [11] CHEN Ke, YANG Zhongjie, FENG Yijun, *et al.* Improving microwave antenna gain and bandwidth with phase compensation metasurface[J]. *AIP Adv*, 2015, 5(6): 067152(1-8). DOI: 10.1063/1.4923195.
- [12] AL-JOUMAYLY M A, BEHDAD N. Wideband planar microwave lenses using sub-wavelength spatial phase shifters[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2011, 59(12): 4542-4552. DOI: 10.1109/TAP.2011.2165515.
- [13] LIN Fenghan, CHEN Zhining, LIU Wei, *et al.* A metamaterial-based broadband circularly polarized aperture-fed grid-slotted patch antenna[C] // *Proc IEEE Asia-Pacific Conf Antennas Propag (APCAP)*. Kuta: IEEE Press, 2015: 353-354. DOI: 10.1109/APCAP.2015.7374401.
- [14] LIU Wei, CHEN Zhining, QING Xianming. Metamaterial-based low-profile broadband mushroom antenna[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2014, 62(3): 1165-1172. DOI: 10.1109/TAP.2011.2165515.
- [15] CHEN Yikai, WANG Chaofu. *Characteristics modes theory and applications in antenna engineering*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2015.

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 吴逢铁)