

用于大规模多输入多输出系统的波束收缩偶极子天线

黄 河

(西安电子科技大学空间科学与技术学院,陕西西安710126)

摘 要: 为满足第五代(Fifth Generation, 5G)通信系统中大规模多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)基站进一步小型化的需求,本文提出了单个偶极子天线替代原有 1×2 子阵的方法.为实现等效替代,单个偶极子天线的波宽应压缩到原来的二分之一.因此,作者在传统的偶极子上方放置了具有相位梯度特性的两层超表面以聚焦偶极子的能量.加载了该超表面的偶极子的半功率波瓣宽度(Half Power Beam Width, HPBW)的仿真值减小到 37° ,增益仿真值提高到14.1 dBi,主瓣平均交叉极化鉴别度(Cross Polarization Discrimination, XPD)提高了3.3 dB至8.5 dB.为了验证天线设计,作者制作并测试了样机,仿真结果与实测结果较为吻合.综上所述,添加超表面的单个偶极子可以替代普通的 1×2 子阵,相当于在后续组阵过程中可以缩小一半的尺寸.这一方案在第五代通信系统大规模多输入多输出天线系统中具有重要应用价值.

关键词: 波束收缩; 偶极子天线; 双极化天线; 大规模多输入多输出系统; 基站天线; 天线小型化

中图分类号: TN821+.4; TN828.6

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)09-2299-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210042

A Beam Contracted Dipole Antenna for Massive MIMO System

HUANG He

(School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710126, China)

Abstract: To cater to the needs of further miniaturization of antenna array in massive multiple input multiple output (MIMO) base station of the fifth generation(5G) communication system, a new single dipole is proposed in this paper to replace the original 1×2 array. To achieve equivalent substitution, the beam width of a single dipole should be halved. Therefore, a two-layered metasurface equipped with phase gradient property is placed above the traditional dipole. It concentrates the energy radiated from the dipole. The simulated half power beam width(HPBW) of the dipole is decreased to 37° , the simulated gain is enhanced to 14.1 dBi, and the average cross polarization discrimination(XPD) within the main beam is improved by 3.3~8.5 dB. To verify the antenna design, a prototype is manufactured and tested. Good agreement between the simulation and measurement results are obtained. In conclusion, the single dipole with metasurface added can replace the ordinary 1×2 array, equivalent to reduce the ordinary array size by half. The above scheme is very potential in 5G massive MIMO application.

Key words: beam contracted; dipole antenna; dual-polarized antenna; massive MIMO system; base station antenna; antenna miniaturization

1 引言

大规模MIMO已成为第五代移动通信^[1]的关键技术之一.在基站收发器上使用大量天线,可以实现高速数据传输,提高连接的可靠性.在这种情况下,天线小型化就显得更加迫切.目前,实现天线小型化有两种方

法.一是减小天线的尺寸,例如,在主辐射体上设置各种槽,减小其横截面积^[2,3],或者,在主辐射体下方放置人工磁导体,降低其剖面^[4,5].另一种减小天线尺寸的方法是像文献[6]那样减小单元间距并优化单元排布方式.

本文提出了一种等效减小天线阵列尺寸的新方

法,即采用一个加载超表面的偶极子天线替代普通的 1×2 子阵.如图1所示,放置在地板上(地板长宽约为 1.2λ , λ 为 3.55 GHz 对应的自由空间波长)的单个偶极子的半功率波瓣宽度约为 $65^\circ \pm 10^\circ$,在组成 1×2 子阵后,E面半功率波瓣宽度收缩到 $35^\circ \pm 5^\circ$,此时单元间距需保持在 0.7λ 左右;而通过使用本文提出的两层透射平面梯度结构^[7-10]置于单个偶极子上方,可使入射的平面波实现高效的聚焦,传统定向偶极子的波宽也由原来的 $65^\circ \pm 10^\circ$ 减小到 $35^\circ \pm 5^\circ$,等于 1×2 子阵的E面波宽.本文单个偶极子尺寸约为 $1.2\lambda \times 1.2\lambda \times 0.25\lambda$;组成 1×2 的子阵后,整体尺寸约为 $1.9\lambda \times 1.9\lambda \times 0.25\lambda$;在单个偶极子上方加载两层超表面后,由于超表面长宽未超过地板长宽,所以横向尺寸与单个偶极子置于地板上的横向尺寸相同,仅纵向增加至 0.5λ 左右,相应尺寸为 $1.2\lambda \times 1.2\lambda \times 0.5\lambda$.考虑到上述天线最终将与天线罩集成,而天线罩通常设置在辐射体上表面 $3 \sim 7\text{ cm}$ 左右,因此纵向尺寸的增加对天线整机高度的影响将被弱化.综上所述,利用上述加载了超表面的偶极子作为单元进行组阵,可使阵列横向尺寸减小,这在大规模MIMO系统中十分有用.

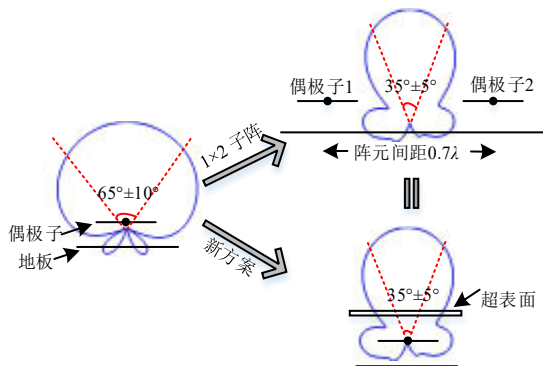


图1 普通 1×2 子阵与加载超表面的偶极子

2 天线结构的设计与分析

如图2所示,该天线包括一个传统偶极子和两层超表面结构.传统偶极子由主辐射体、两个馈电结构和一个地板构成.主辐射体及其馈电巴伦结构如图3(a)和(b)所示.主辐射体由两个印制在厚度为 0.8 mm ,介电常数为 4.4 ,损耗角正切为 0.02 介质板上的交叉偶极子组成.每一个偶极子有两个臂,臂的形状为中部有扇形槽的方形贴片.在主辐射体下方有两个馈电结构,分别记做馈电结构I和馈电结构II.馈电结构I和II正面为不平衡到平衡转换巴伦,背面为金属,金属上方伸出的矩形引脚与主辐射体电连接,背面金属下方伸出的矩形引脚则与地板电连接.当信号从端口1和2馈入时,电磁波通过馈电结构传输到交叉偶极子上,形成 $\pm 45^\circ$ 的双线极化.

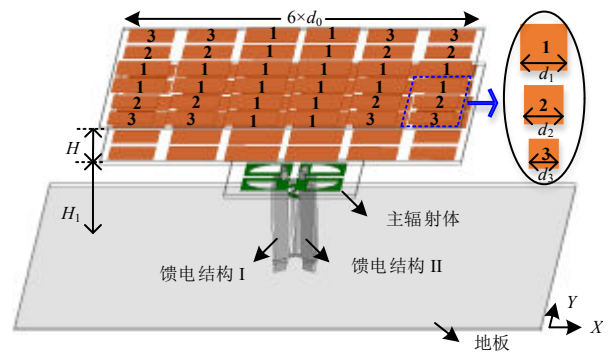
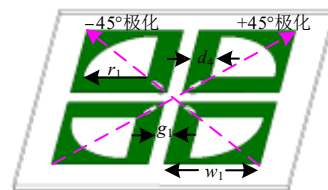
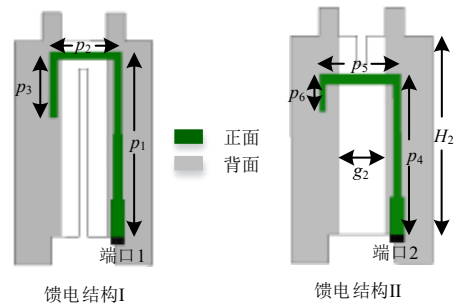


图2 天线结构图(单位:mm, $H_1 = 39$, $H_2 = 9$, $d_0 = 14.9$, $d_1 = 14$, $d_2 = 13$, $d_3 = 12$)



(a) 偶极子主辐射体结构图



(b) 偶极子馈电巴伦结构图

图3 偶极子结构图(单位:mm, $g_1 = 2$, $g_2 = 5$, $w_1 = 12.3$, $r_1 = 8.1$, $d_4 = 3$, $p_1 = 19.8$, $p_2 = 7.8$, $p_3 = 7$, $p_4 = 17$, $p_5 = 8.6$, $p_6 = 4$, $H_2 = 21$)

另一方面,在主辐射体上方 H_1 处,有 6×6 个单元组成的超表面,每个单元包含相距 H 的两层结构,如图4所示.每层包含一个印制在介电常数 2.2 ,损耗角正切 0.002 介质上的方形贴片.通过给这些方形贴片设计不同的边长,可以实现收缩偶极子波宽的目的.为了便于描述,对方形贴片进行了编号,编号为1的贴片边长为 d_1 ,编号为2的贴片边长为 d_2 ,编号为3的贴片边长为 d_3 .从图2可以看出,这些方形贴片,根据中心点为原点的坐标系可分为4个区域,每一区域相对于中心点对称;每一区域有 3×3 个单元,这 3×3 个单元的第一列、第二列、第三列的排布服从 $1-1-1$ 、 $1-2-3$ 、 $1-2-3$ 的规律.

图5给出了当方形贴片边长为 d_1 、 d_2 、 d_3 时,超表面单元的传输系数曲线.从图5中可以看出,在 $3.3 \sim$

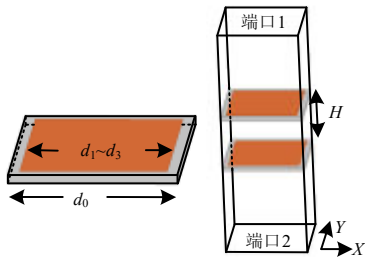


图4 超表面单元结构图

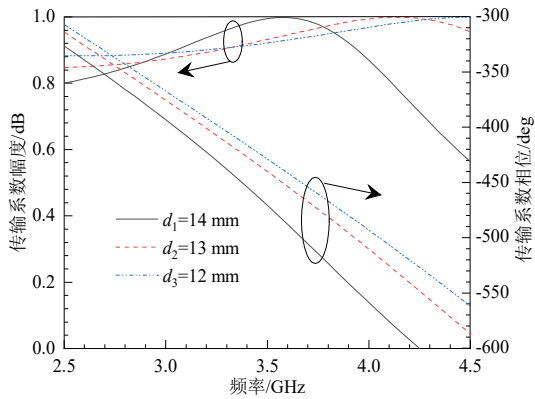
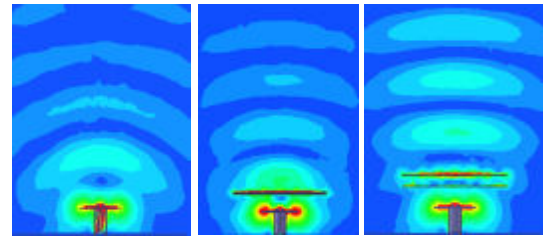


图5 不同方形贴片边长对应的超表面单元传输系数幅度和相位

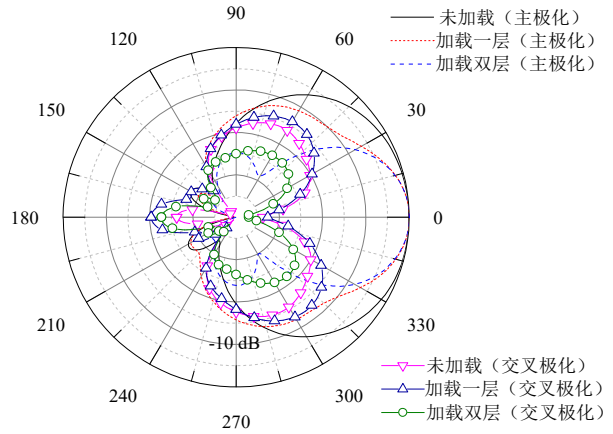
3.8 GHz内,传输系数的幅度均大于0.9,说明电磁波可以在该频带内穿透超表面结构;传输系数的相位在频带内基本保持 45° 的递变,形成了线性相位梯度.将图5所示的超表面单元排列成图1所示的结构,不同超表面单元形成的相位差会形成类似平面透镜的作用,使得偶极子辐射的球面波转化成具有高定向性的平面波,产生聚焦效应.

图6(a)~(c)分别给出了不添加、只添加一层、添加双层超表面时天线电场分布、辐射方向图和增益.从图中可以看出,不添加超表面时,偶极子辐射球面波、波束宽度较宽、增益较低;添加一层超表面后,偶极子辐射的球面波有转化成平面波的趋势,天线主瓣宽度有一定程度的收窄,但天线旁瓣非常大、交叉极化鉴别度较低、增益仅有2 dBi左右的提升,天线整体效果较差;添加双层超表面后,偶极子辐射的球面波转化成平面波,半功率波瓣宽度收缩到 37° 且旁瓣较小,增益提升至14.1 dBi,这两个指标等同于一个 1×2 子阵的指标,另外主瓣内的平均交叉极化鉴别度提高了6~10 dB,这种现象得益于超表面的对称结构,使得偶极子主辐射体上的电流更加均匀.

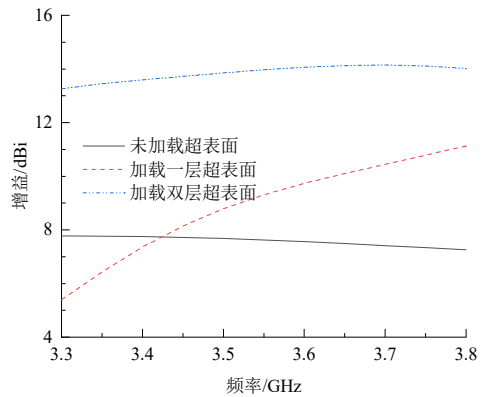
下面,我们讨论对天线性能影响较大的两个参数.第一个参数是两层超表面之间的距离 H ,该参数决定了超表面的通带和相位,对整个天线的阻抗匹配和半功率波瓣宽度有显著影响.图7(a)和(b)分别给出了不同



(a) XOZ面电场分布图



(b) 3.55 GHz方向图曲线

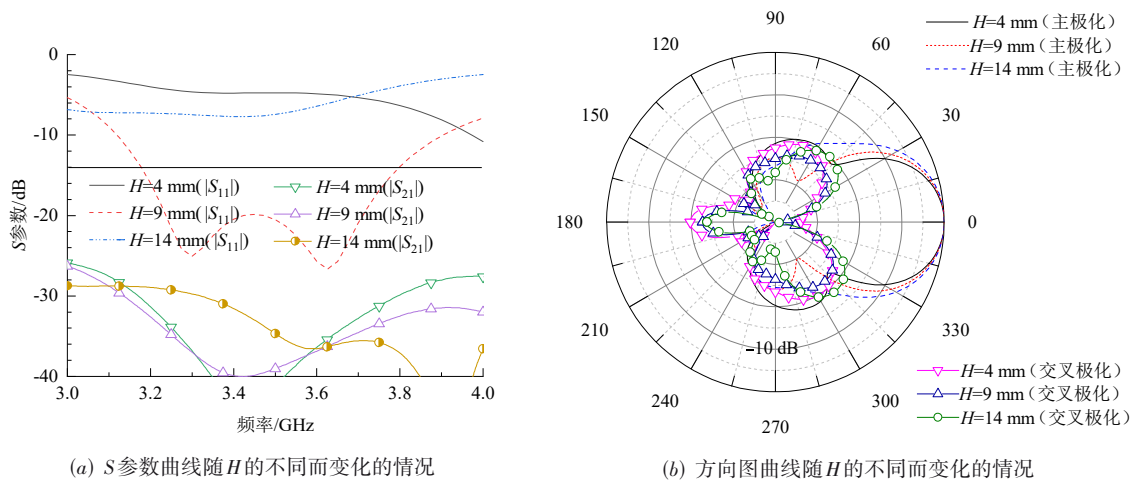
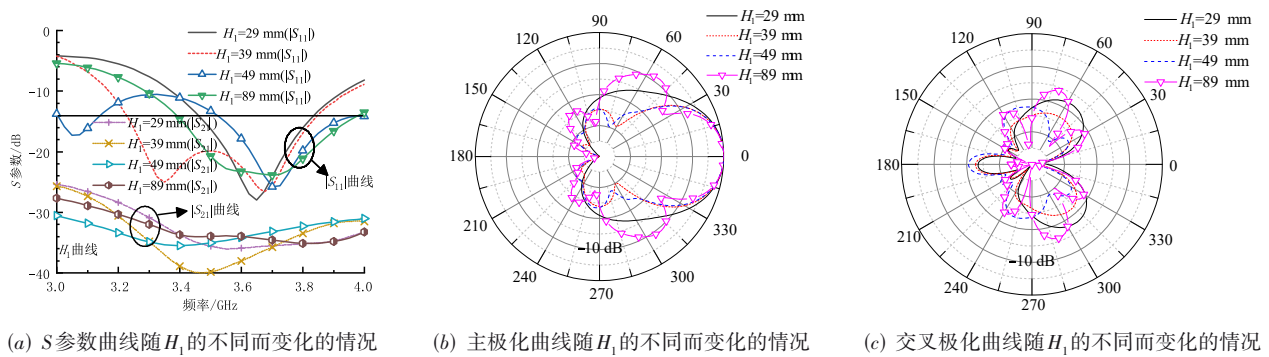


(c) 增益曲线

图6 未加载、仅加载一层、加载双层超表面时天线特性

H 对应的天线 S 参数曲线和方向图曲线,经过优化,参数 H 选择为9 mm,可实现3.3~3.6 GHz的覆盖,获得合适的波束宽度.第二个参数是地板和超表面之间的距离 H_1 ,该参数决定了天线能量分布情况.

图8(a)~(c)进行了参数分析,结果表明,当 H_1 小于39 mm时,天线波宽较宽,聚焦能力一般,当 H_1 增加至39 mm时,聚焦能力良好,此时,波宽在期望的 $35^\circ \pm 5^\circ$ 的范围内,当 H_1 增加至49 mm,波宽基本不变,而当 H_1 继续增大后,超表面对电磁波的控制能力减弱,大量能量

图7 不同 H 值对应的参数变化情况图8 不同 H_1 值对应的参数变化情况

从侧面泄露,导致副瓣电平增大.同样的目标波宽下,作者选取了较小的 H_1 值(39 mm,约为 0.5λ),兼顾了天线高度、主瓣宽度和副瓣电平.综上,参数 H_1 主要决定了天线能量分布情况,在设计过程中,可以先调节 H_1 ,使波宽压缩至目标值范围内,再调节馈电巴伦直至阻抗匹配.

3 仿真与测试结果对比及分析

图9展示的是天线的实物图.该天线在微波暗室中进行了测量.图10(a)~(e)给出了该天线的仿真和实测S参数曲线、方向图曲线、增益和半功率波瓣宽度曲线,从结果可以看出,该天线可覆盖3.3~3.8 GHz,带内仿真和测试隔离度分别达33.5 dB和29 dB以上,仿真和测试的半功率波瓣宽度分别为 $37^\circ \pm 1.2^\circ$ 和 $36.7^\circ \pm 1.8^\circ$,仿真和测试的峰值增益分别为14 dBi和13.6 dBi.

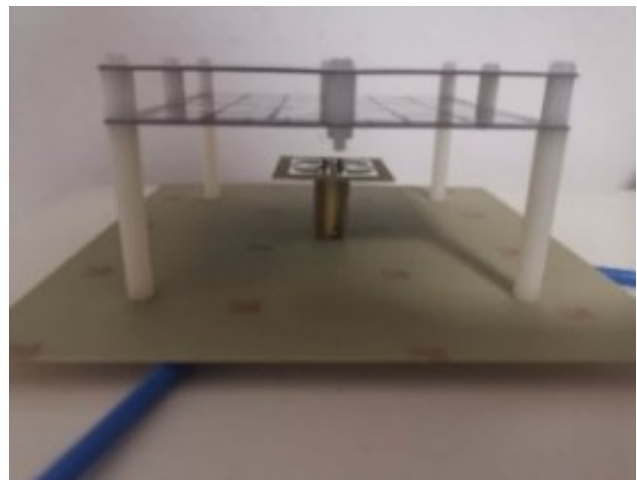


图9 天线的实物图

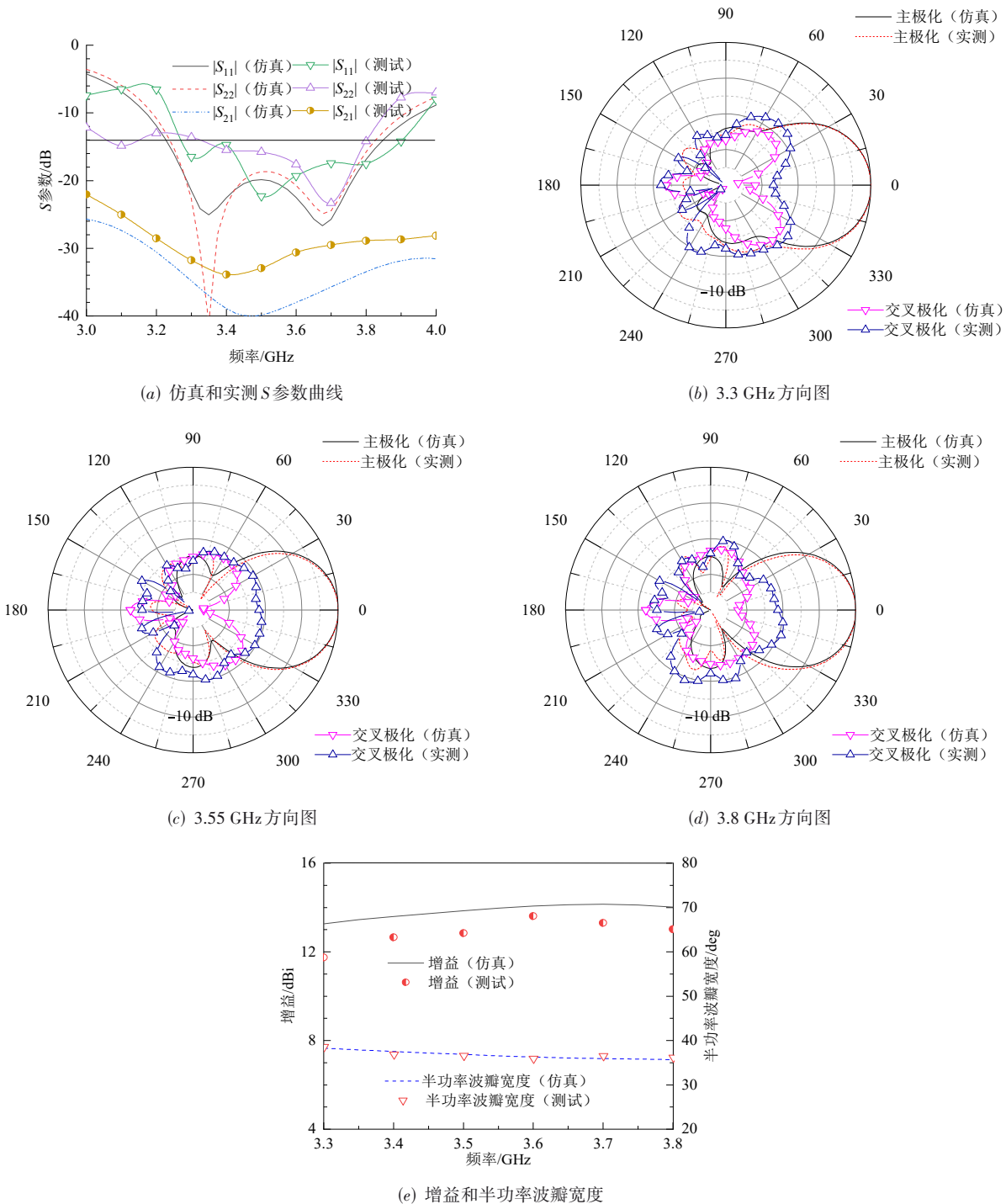


图 10 天线仿真和测试曲线

4 结论

本文采用偶极子上方放置超表面结构的方法收缩普通偶极子的波束宽度,使单个的偶极子的性能等效于一个1×2的子阵,达到减小阵列横向尺寸的目的.所采用的超表面结构有6×6个单元,每一个单元由相距9 mm的两层介质板组成,介质板上均印制有不同边

长的方形贴片,通过调整方形贴片的边长、合理排布不同贴片的位置、保证超表面和天线距离合适,使得偶极子波宽收缩一半,即波宽减小到37°左右;偶极子天线的两个端口仿真和测试隔离度能保持在33.5 dB和29 dB以上;仿真和测试的峰值增益可达到14 dBi和13.6 dBi.综上所述,加载了超表面的偶极子可以替代

1×2的子阵,这在大规模多输入多输出系统中具有较高应用价值.

参考文献

- [1] VANNITHAMBY R, TALWAR S. Towards 5G: Applications, Requirements and Candidate Technologies[M]. Chichester: John Wiley & Sons Inc, 2017:9-22.
- [2] 张健丰, 李平辉, 朱彤. 高隔离度宽带双极化微带天线设计[J]. 电子学报, 2016, 44(4): 775-779.
ZHANG J F, LI P H, ZHU T. Design of wideband dual-polarized microstrip antenna with high isolation[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(4): 775-779. (in Chinese)
- [3] HUANG H, LIU Y, GONG S X. A broadband dual-polarized base station antenna with sturdy construction[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 665-668.
- [4] ZHAI H Q, ZHANG K D, YANG S, et al. A low-profile dual-band dual-polarized antenna with an AMC surface for WLAN applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2692-2695.
- [5] LIU Y, WANG J, GONG S X. Low-profile dual-polarized planar antenna with compact structure for base stations[J]. Chinese Journal of Electronics, 2017, 26(5): 1092-1095.
- [6] HAO Z, PENG H L, JIN W Q, et al. A new low-profile and closely spaced dual-polarized antenna for massive-MIMO applications[C]//2016 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Piscataway: IEEE, 2016: 659-661.
- [7] YU N F, GENEVET P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [8] LI X, XIAO S Y, CAI B G, et al. Flat metasurfaces to focus electromagnetic waves in reflection geometry[J]. Optics Letters, 2012, 37(23): 4940-4942.
- [9] WAN X, JIANG W X, MA H F, et al. A broadband transformation-optics metasurface lens[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(15): 151601.
- [10] LI H P, WANG G M, LIANG J G, et al. Single-layer focusing gradient metasurface for ultrathin planar lens antenna application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(3): 1452-1457.

作者简介



黄 河 女,1990年出生于西安市. 现为西安电子科技大学空间科学与技术学院副教授、硕士生导师. 主要研究方向为天线理论与设计.

E-mail: huanghe@xidian.edu.cn