

基于微波表面等离激元的 360° 电扫描多波束天线

韩亚娟 张介秋 李勇峰 王甲富 屈绍波 张安学

360° scanning multi-beam antenna based on spoof surface plasmon polaritons

Han Ya-Juan Zhang Jie-Qiu Li Yong-Feng Wang Jia-Fu Qu Shao-Bo Zhang An-Xue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 147301 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.147301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.147301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一维金属光栅嵌入磁性介质纳米结构下的横向磁光克尔效应的增强

Great enhancement of transversal magneto-optical Kerr effect for magnetic dielectric film embedded by one-dimensional metallic grating

物理学报.2016, 65(14): 147302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.147302>

基于金属-电介质-金属波导结构的等离子体滤波器的数值研究

Numerical study of plasmonic filter based on metal-insulator-metal waveguide

物理学报.2016, 65(5): 057301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.057301>

基于纳米天线的多通道高强度定向表面等离子体波激发

High-intensity directional surface plasmonic excitation based on the multi metallic slits with nano-antenna

物理学报.2015, 64(24): 247301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.247301>

梳状波导结构中石墨烯表面等离子体的传播性质

Propagation properties of the graphene surface plasmon in comb-like waveguide

物理学报.2015, 64(23): 237301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.237301>

环形狭缝腔阵列光学特性的研究

Finite difference time domain simulation of optical properties of annular cavity arrays

物理学报.2015, 64(22): 227301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.227301>

基于微波表面等离子激元的360°电扫描多波束天线*

韩亚娟¹⁾ 张介秋^{1)†} 李勇峰¹⁾ 王甲富¹⁾ 屈绍波¹⁾ 张安学²⁾

1)(空军工程大学理学院, 西安 710051)

2)(西安交通大学电子信息工程学院, 西安 710049)

(2016年3月9日收到; 2016年5月5日收到修改稿)

基于微波表面等离子激元提出了一种电扫描多波束天线. 该多波束天线由24条相同的端射天线绕同一圆心旋转而成, 相邻端射天线之间的夹角为15°. 单条端射天线的设计基于微波表面等离子激元的耦合, 将馈电单极子辐射的全向场调制为端射的定向场. 仿真结果表明, 提出的基于微波表面等离子激元的多波束天线, 在9.5—10.25 GHz频段内可实现面内360°波束扫描, 且平均增益约为11.8 dBi, 半功率波束宽度约为15°.

关键词: 微波表面等离子激元, 多波束天线, 端射天线

PACS: 73.20.Mf, 84.40.Ba

DOI: 10.7498/aps.65.147301

1 引言

由于多波束天线可以使波束空间隔离和极化隔离, 达到多重频率复用, 节省通信资源, 增大通信容量, 从而获得广泛的应用. 传统多波束天线具有透镜式、反射面式以及相控阵式三种基本实现形式. 透镜式或反射面式多波束天线在焦点附近放置多个馈源, 相应形成指向不同的多个波束; 而相控阵式多波束天线则是由诸多辐射单元阵列组成, 用波束形成网络向辐射单元激励所需的幅度和相位, 以形成不同形状、不同指向的波束. 所以传统多波束天线结构复杂、体积庞大、加工精度要求高、造价昂贵.

近年来, 国内外学者提出了一系列结构新颖、性能优越的多波束天线, 如文献[1]利用几何光学原理, 采用各向同性的椭球棱镜以及平面环形缝隙天线阵列构成的多波束天线实现了360°的波束扫描; 文献[2]提出了一种新颖的抛物柱面漏波多波束天线, 在24 GHz附近, 实现±30°范围内的波束扫描; 文献[3]则是基于超材料设计了一种宽带、多波束天线, 在8—10 GHz频段内, 实现了±45°范围

内的波束扫描; 另外, 基于等离子体独特的物理性能[4], 等离子体天线[5]得到了广泛的关注, 文献[6]设计了一个16元等离子体无源振子的圆形天线阵, 实现了天线电磁波单波束和多波束的定向辐射.

表面等离子激元是由存在于光频段金属-介质界面上自由电子群的振荡所引起的电磁现象, 其沿着界面传播, 在垂直于界面的方向上指数衰减. 由于表面等离子激元的深亚波长特性、局域场增强效应以及非线性色散特性, 对器件的小型化设计大有裨益. 2004年, Pendry等[7]理论演绎了具有缺陷结构的金属表面(如槽、孔等)将支持微波及太赫兹频段的表面等离子激元, 称为微波表面等离子激元(spoof surface plasmon polaritons, SSPP). 此后, 研究者们相继提出了一系列基于SSPP的导波结构[8-11], 主要应用于微波器件及集成电路的设计中. Li等[12]采用渐变的锯齿结构(以使锯齿结构上的传播常数呈线性分布)阵列实现了对波束的有效调控.

本文提出了基于SSPP耦合的高性能端射天线, 通过将24条相同的端射天线绕同一圆心旋转排布(相邻端射天线之间的夹角为15°)实现

* 国家自然科学基金(批准号: 61331005, 61501503, 11274389, 61471388)和陕西省创新团队(批准号: 2014KCT-05)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangjq0@163.com

了基于SSPP的多波束天线. 仿真与实验结果表明, 本文提出的基于SSPP的多波束天线, 在9.5—10.25 GHz频段内可实现面内360°波束扫描, 且平均增益约为11.8 dBi, 半功率波束宽度约为15°.

2 基于SSPP的多波束天线设计

2.1 基于SSPP的多波束天线设计原理

如图1所示, 提出的基于SSPP的多波束天线由24条相同的端射天线组成, 24条端射天线绕同一圆心旋转排列, 单条端射天线距圆心的距离为 r , 相邻端射天线之间的夹角均为15°, 单条端射天线在旋转面内的半功率角宽度约等于15°, 因此, 24条端射天线均匀排布即可实现 xoy 平面内360°扫描. 天线工作时, 24条端射天线独立馈电实现电扫描.

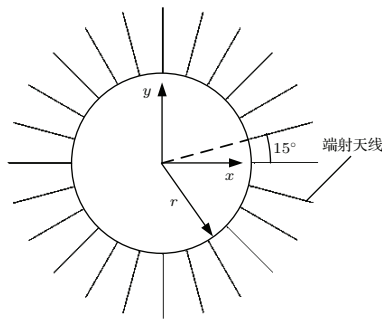


图1 基于SSPP的多波束天线原理示意图

Fig. 1. Principle diagram of multi-beam antenna based on SSPP.

2.2 基于SSPP耦合的端射天线设计

设计的单条端射天线结构如图2(a)所示, 由单极子馈电结构和金属锯齿结构组成, 其中金属锯齿结构夹在两层介电系数 $\epsilon_r = 2.65$ 、损耗角正切 $\tan(\delta) = 0.001$ 的F4B介质基板中间, 以增大SSPP的传播常数. 图2(b)所示为周期金属锯齿结构细节图. 单条端射天线经优化后的结构几何参数分别为: 金属锯齿周期 $p = 0.4$ mm, 锯齿宽度 $a = 0.2$ mm, 锯齿高度 $h = 2.5$ mm, 沿 x 方向金属连接线宽度 $w = 0.2$ mm, 两层F4B介质基板厚度均为 $d = 0.5$ mm. 利用电磁计算软件CST Microwave Studio仿真计算具有上下介质基板的金属锯齿结构的色散关系, 得到的色散曲线仿真结果如

图2(c)所示, 图中的红色虚线为真空中电磁波的色散关系, 插图所示为锯齿结构的色散仿真模型. 由图2(c)可以看出, 电磁波在锯齿结构上的色散曲线偏离电磁波在真空中的色散曲线, 且同一频率下的传播常数远大于真空中电磁波的传播常数. 因此, 该结构能够很好地将电磁波局域在锯齿结构上.

为了能够高效地将单极子的辐射场耦合为锯齿结构上的SSPP, 同时将锯齿结构上传播的SSPP辐射出去, 金属锯齿结构的传播常数必须无限接近于空间波的传播常数. 因此, 端射天线中的金属锯齿结构首尾两端(本文中定义为区域I)为电磁波与SSPP的耦合段, 锯齿高度 h 利用横向距离 x 的抛物线函数进行调制, 使得耦合段的SSPP传播常数随 x 近似呈线性变化; 区域II(锯齿高度 h 为常数, 即 $h = 2.5$ mm)为SSPP的传输段.

利用电磁仿真软件CST Microwave Studio仿真计算单条端射天线的辐射特性, x, y, z 方向边界条件均设为open add space, 采用X波段单极子馈电. 经过优化后的天线结构几何参数为: 馈电单极子与锯齿结构间距 $g = 3$ mm, 区域I长度 $l_1 = 7$ mm, 区域II长度 $l_2 = 90$ mm, 天线宽度 $w_1 = 15.2$ mm. 单条端射天线在 $f = 10$ GHz处电场分布以及 $f = 10$ GHz处三维辐射场图仿真结果在图3中给出. 由图3(a)可以看出, 上面所设计的金属锯齿结构能够高效地将单极子天线的辐射场耦合为SSPP, 并在金属锯齿结构上进行传导, 最终在结构终端辐射出去. 由图3(b)可以看出, 单条端射天线中金属锯齿结构将单极子天线的全向方向图调制为端射的单向方向图, 在 $f = 10$ GHz处, 天线增益为9.7 dBi, E 面、 H 面半功率波束宽度分别为34°, 36.2°.

根据上面的设计, 利用印刷电路板技术加工制作了尺寸为111 mm × 15.2 mm × 1 mm的测试样品, 如图4(a)所示, 分别测试其回波损耗 S_{11} 与辐射性能, 仿真与实验结果在图4(b), 图4(c)和图4(d)中给出. 由图4(b)可以看出, 单条端射天线在9.0—10.5 GHz频段内, S_{11} 均小于-10 dB, 仿真计算与实验结果基本一致; 由图4(c)和图4(d)可以看出, 在 $f = 10$ GHz处, E 面、 H 面归一化方向图仿真计算与实验结果基本一致, 且 H 面实验结果优于仿真结果, 可能是由于加工与测试时不确定因素引起的.

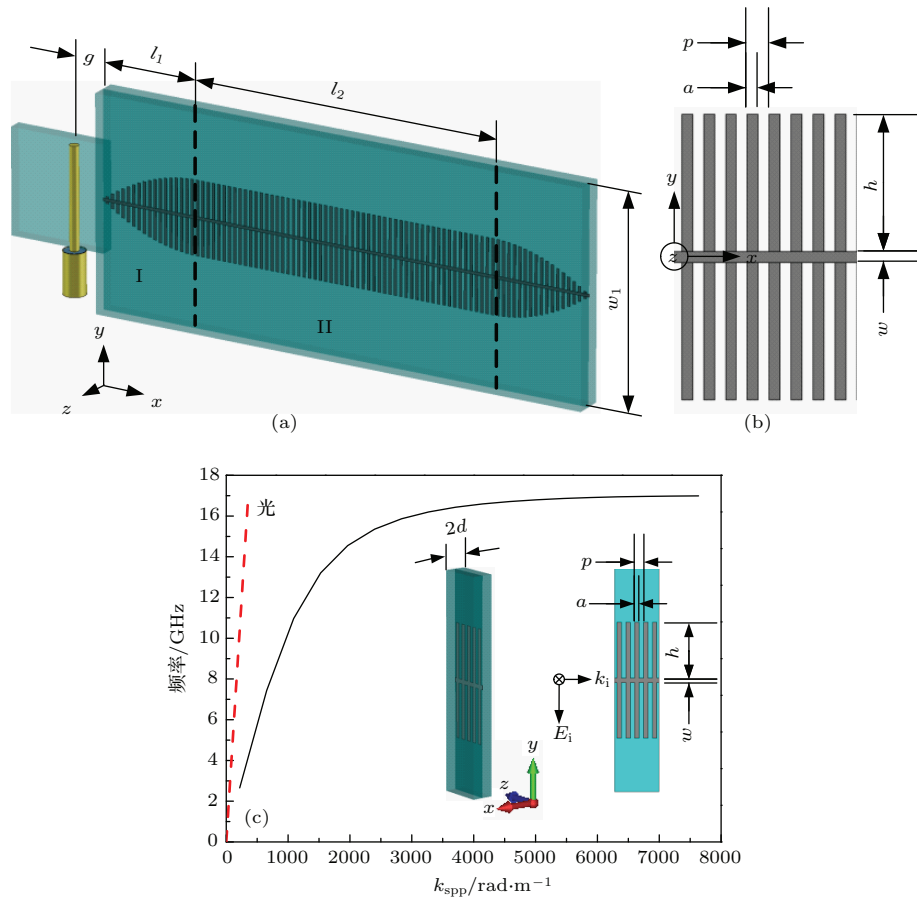


图2 (网刊彩色) 单条端射天线结构 (a) 三维透视图; (b) 周期金属锯齿结构正视图; (c) 具有上下介质基板的周期金属锯齿结构色散曲线以及真空中电磁波的色散曲线

Fig. 2. (color online) Geometric model of single end-fire antenna: (a) Perspective view; (b) front view of metallic blade structure in detail; (c) dispersion curves for light and the metallic blade structure sandwiched between two F4B substrates.

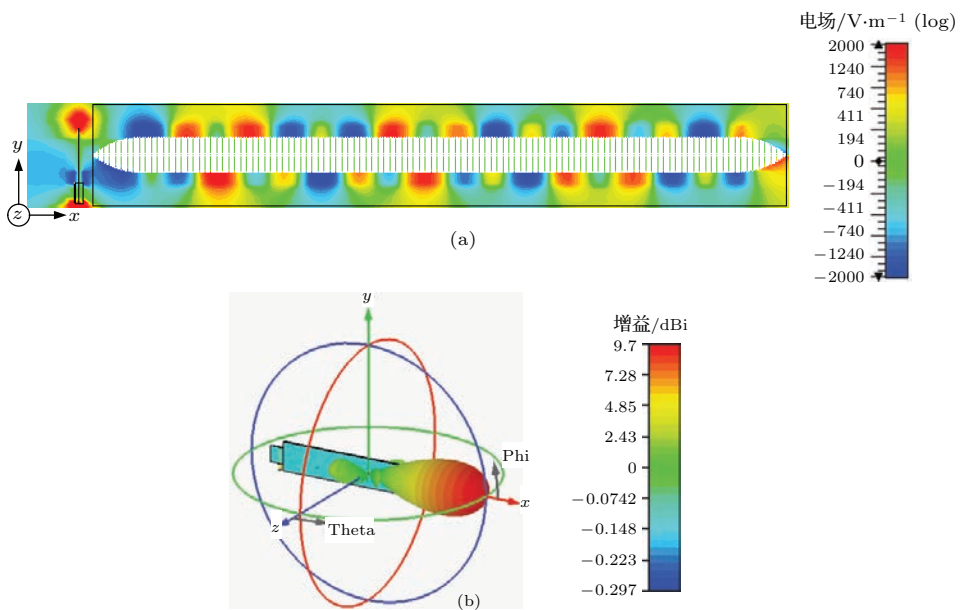


图3 (网刊彩色) 单条端射天线仿真计算结果 (a) $f = 10$ GHz 时, 电场分布图; (b) $f = 10$ GHz 时, 端射天线远场增益

Fig. 3. (color online) Simulated results of single end-fire antenna: (a) Electric distribution at 10 GHz; (b) far-field directivity at 10 GHz.

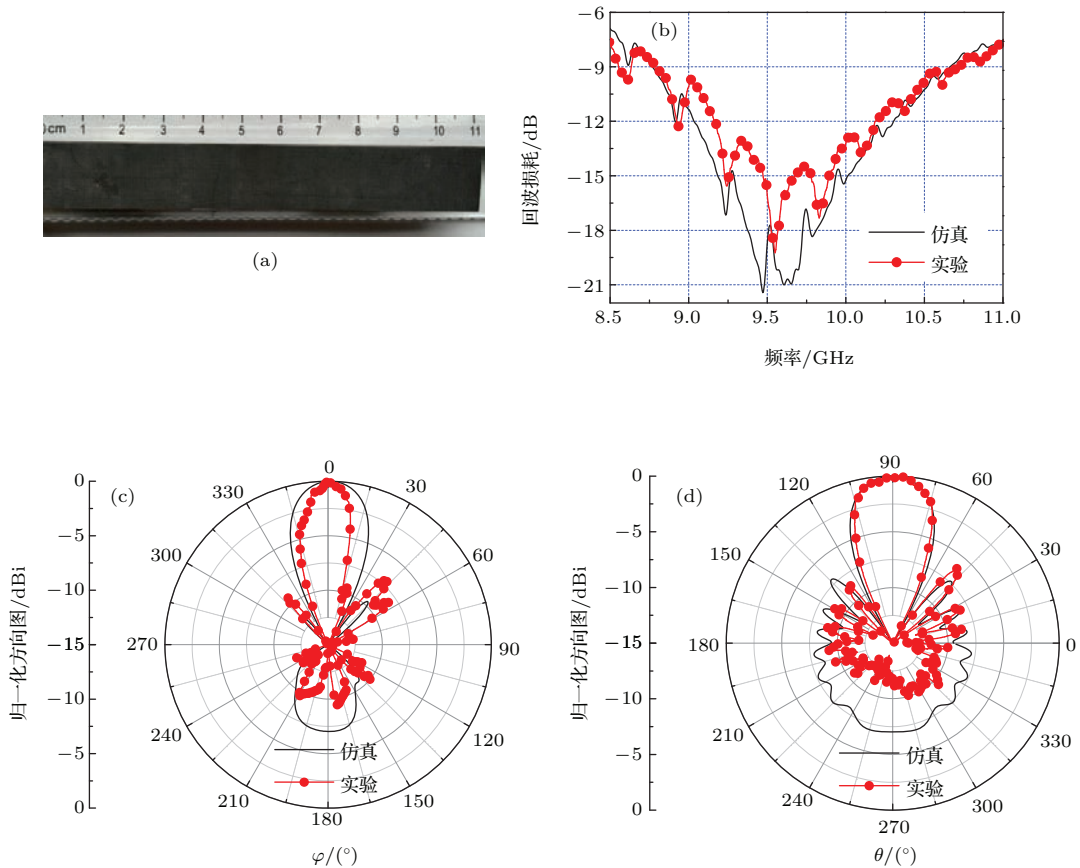


图4 (网刊彩色) 单条端射天线仿真与实验 (a) 测试样品照片; (b) 回波损耗 S_{11} ; (c) $f = 10$ GHz 时, E 面仿真与测试归一化方向图; (d) $f = 10$ GHz 时, H 面仿真与测试归一化方向图
 Fig. 4. (color online) Simulated and measured results of single end-fire antenna: (a) Sample photograph; (b) S_{11} ; (c) normalized far-field directivity for E -plane at 10 GHz; (d) normalized far-field directivity for H -plane at 10 GHz.

3 多波束天线的仿真验证与性能分析

根据图1所示的原理示意图, 将优化后的24条相同端射天线绕同一圆心旋转排列, 得到基于SSPP的多波束天线. 利用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 对单条端射天线与圆心的距离 r 进行扫参, 确定最优值, x, y, z 方向边界条件均设为 open add space. 优化 r 时, 有两个基本原则: 1) 确保组阵以后的多波束电扫描天线其回波损耗与单条端射天线基本一致; 2) 组阵以后的天线, 其辐射性能对 r 比较敏感. 根据原则1) 确定的 r 值并不能保证良好的辐射性能, 故需对 r 进行微调, 以保证单条端射天线之间的互耦可以增大增益但又不至于引起栅瓣, 此时, 主要以天线的增益以及半功率波束宽度等特性最终确定 r . 优化后得到 $r = 128$ mm, 其结构如图5所示.

对多波束天线中一条端射天线独立馈电, 仿真

计算其辐射性能, x, y, z 方向边界条件均设为 open add space. 回波损耗 S_{11} 以及辐射场图仿真结果如图6所示. 从图6(a)可以看出, 多波束天线在 9.0—10.5 GHz 频段内, S_{11} 均小于 -10 dB. 图6(b)所示为 $f = 10.0$ GHz 处天线的三维场图, 可以看出

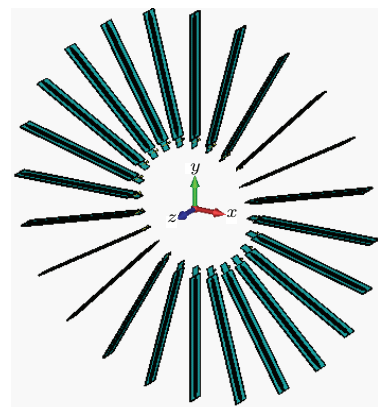


图5 (网刊彩色) 基于 SSPP 的多波束天线结构图
 Fig. 5. (color online) Structure of multi-beam antenna based on SSPP.

单条端射天线中金属锯齿将单极子馈源的全向场成功地调制为单向辐射场, 通过对24条端射天线分别独立馈电, 可以完成 xoy 平面内 360° 波束扫描. 图6(c)和图6(d)所示分别为 $f = 9.5$ GHz和 $f = 10.25$ GHz时, 多波束天线远场增益仿真计算结果, 是由单条端射天线的远场增益极坐标图旋转

而成. 此外, 在9.0—10.5 GHz频段内的增益曲线以及 E 面、 H 面半功率波束宽度曲线如图7(a)和图7(b)所示. 由图7可以看出, 在9.5—10.25 GHz频段内, 提出的多波束天线平均增益为11.8 dBi, H 面半功率波束宽度平均为 15° , E 面半功率波束宽度平均为 42° .

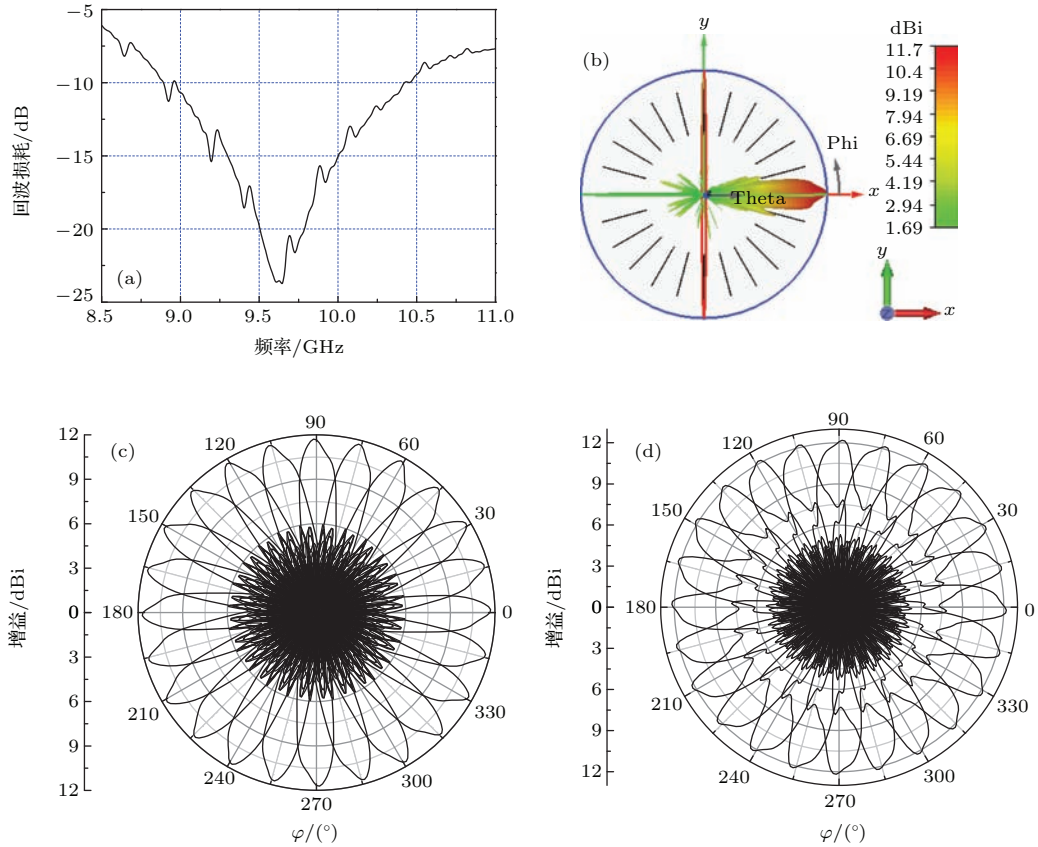


图6 (网刊彩色) 基于微波等离子激元的多波束天线仿真计算结果 (a) 回波损耗; (b) $f = 10$ GHz时, 远场增益三维视图; (c) $f = 9.5$ GHz时, 远场增益极坐标视图; (d) $f = 10.25$ GHz时, 远场增益极坐标视图
 Fig. 6. (color online) Simulated results of the proposed multi-beam antenna: (a) S_{11} ; (b) 3D view for far-field directivity when $f = 10.0$ GHz; (c) polar view for far-field directivity when $f = 9.5$ GHz; (d) polar view for far-field directivity when $f = 10.25$ GHz.

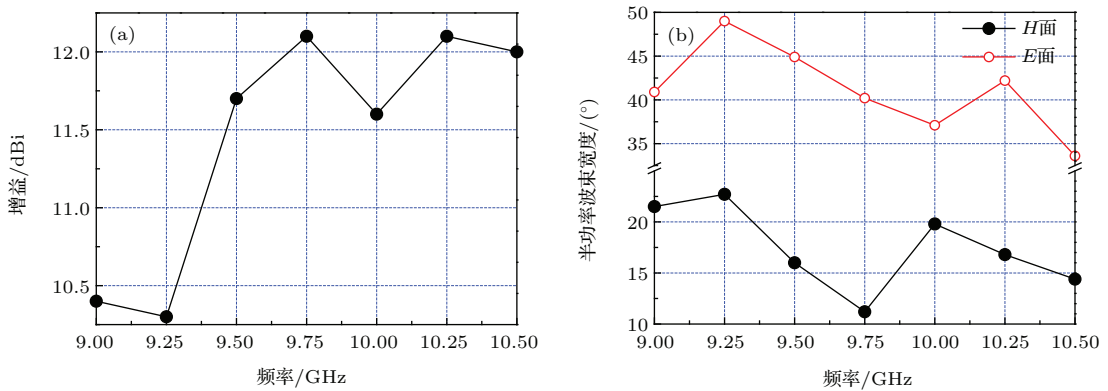


图7 (网刊彩色) 基于SSPP的多波束天线仿真计算结果 (a) 增益曲线; (b) E 面和 H 面半功率波束宽度曲线
 Fig. 7. (color online) Simulated results of the proposed multi-beam antenna: (a) Curve of far-field directivity; (b) curves of 3 dB angular width for E - and H -plane.

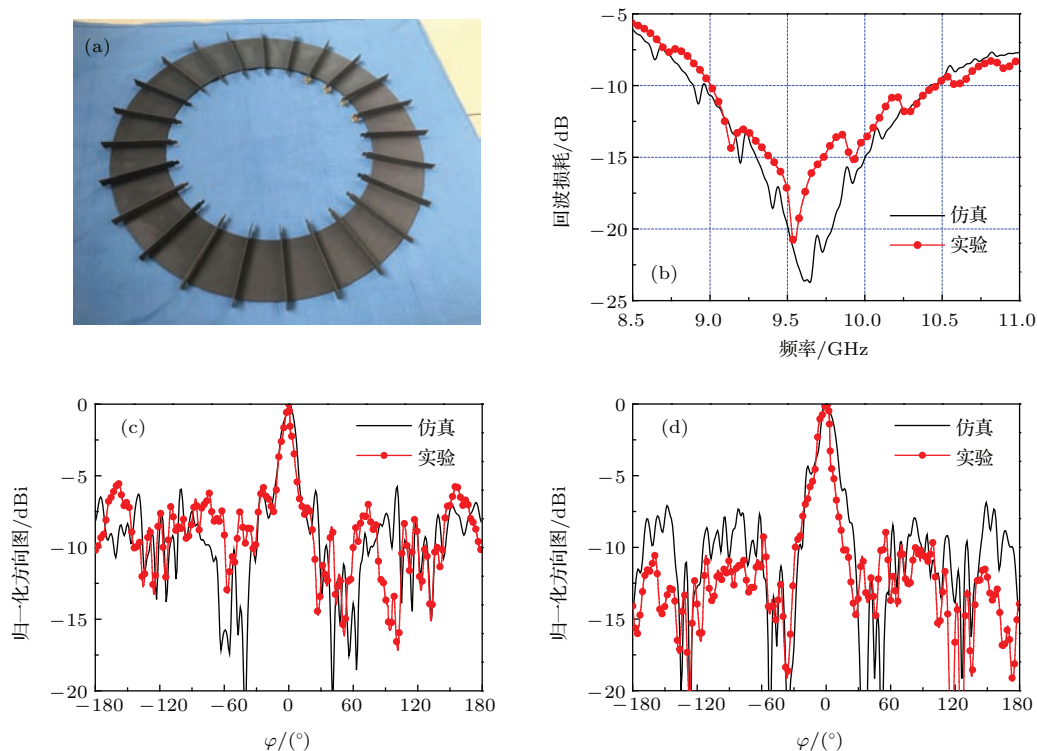


图8 (网刊彩色) 基于微波等离子激元的多波束天线样品照片以及仿真与测试结果 (a) 样品照片; (b) 回波损耗; (c) $f = 9.5$ GHz 时, 归一化方向图; (d) $f = 10.25$ GHz 时, 归一化方向图
 Fig. 8. (color online) Photograph and simulated and measured results of the proposed multi-beam antenna: (a) Photograph; (b) S_{11} ; (c) normalized far-field directivity when $f = 9.5$ GHz; (d) normalized far-field directivity when $f = 10.25$ GHz.

为进一步验证所设计的基于SSPP模式耦合的360°电扫描多波束天线的性能, 利用印刷电路板技术加工制作了实验样品, 样品照片如图8(a)所示, 其中环状盘用于固定24条端射天线, 仿真发现, 其对天线性能并无影响. 同时, 对图8(a)所示的样品中任一条端射天线馈电, 分别测试其回波损耗 S_{11} 与辐射性能, 测试结果如图8(b), 图8(c)和图8(d)所示, 为便于比较, 图8中也给出了样品的仿真计算结果. 由图8(b)可以看出, 在9.0—10.5 GHz频段内, S_{11} 均小于-10 dB, 测试结果与仿真结果基本一致. 由图8(c)和图8(d)可以看出, 在 $f = 9.5$ GHz和 $f = 10.25$ GHz时, 测试与仿真的归一化方向图基本一致, 且测试结果稍优于仿真结果, 可能由加工与测试时的不确定因素所引起.

不同于传统的多波束天线, 本文设计实现的多波束天线由 N 条端射天线构成, 单条端射天线的设计基于SSPP的模式耦合, 在单极子天线的近场区将电磁波耦合为SSPP并局域在金属锯齿结构上, 通过齿与齿之间的耦合在结构上进行传导, 调节单

极子天线与金属锯齿结构的距离, 使两者间的距离引起的相位差刚好能够抵消在端射方向上单极子天线与金属锯齿结构在远场的辐射场之间的相位差, 最终达到端射的目的. 仿真结果表明, 调节周期金属锯齿结构传输段的长度 l_2 , 可以改变单条端射天线的增益, 多波束天线的增益也随之改变. 类似于行波天线, 增益与锯齿的数量成正比, 沿着表面的相对相速 v_z/c (其中 v_z 为表面相速, c 为光速)与传输段长度 l_2 成正比, l_2 增加时, 增益会提高. 因此, 通过巧妙地设计单条端射天线, 可以调节多波束天线的工作频段、增益、半功率波束宽度等特性.

4 结 论

本文提出了一种基于SSPP的360°电扫描多波束天线, 该多波束天线是由24条相同的端射天线绕同一圆心旋转而成, 相邻端射天线之间的夹角为15°. 单条端射天线的设计基于SSPP的耦合, 利用周期金属锯齿结构将单极子天线产生的辐射场耦合为SSPP, 并在锯齿结构上引导传播, 最终

在终端辐射出去. 仿真结果表明, 本文提出的基于 SSPP 的多波束天线在 9.5—10.25 GHz 频段内, 平均增益约为 11.8 dBi, 半功率波束宽度约为 15° , 可完成 360° 的波束扫描. 并且, 通过调节单条端射天线中周期金属单元结构的尺寸参数, 可以改变多波束天线的带宽、增益、半功率波束宽度等特性. 与传统的多波束天线相比, 本文中提出的多波束天线关键点在于单条端射天线的设计, 不拘泥于几何光学原理, 加工精度要求低, 采用印刷电路板技术制成, 造价低. 另外, 由于 SSPP 的深亚波长特性以及局域场增强效应, 提出的多波束天线体积小, 结构紧凑, 具有一定的工程应用价值.

参考文献

- [1] Zhang J, Wu W, Fang D G 2011 *IEEE Electron. Lett.* **47** 298
- [2] Mauro E, Ronan S, Laurent L C 2011 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **59** 1093
- [3] Mohamad S, Momeni A, Abadi H, Behdad N 2014 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* Memphis, Tennessee, USA, July 6–11, 2014 p926
- [4] Zhen L, Zhao Q, Luo X G, Ma P, Liu S Z, Huang C, Xing X J, Zhang C Y, Chen X L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 155203 (in Chinese) [郑灵, 赵青, 罗先刚, 马平, 刘述章, 黄成, 邢晓俊, 张春艳, 陈旭霖 2012 物理学报 **61** 155203]
- [5] Zhao G W, Xu Y M, Chen C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5298 (in Chinese) [赵国伟, 徐跃民, 陈诚 2007 物理学报 **56** 5298]
- [6] Huang F Y, Shi J M, Yuan Z C, Wang J C, Xu B, Chen Z S, Wang C 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 155201 (in Chinese) [黄方意, 时家明, 袁忠才, 汪家春, 许波, 陈宗胜, 王超] 2013 物理学报 **62** 155201]
- [7] Pendry J B, Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F J 2014 *Science* **305** 847
- [8] Shen X P, Cui T J, Martin-Cano, Garcia-Vidal F J 2013 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **110** 40
- [9] Liu L L, Li Z, Xu B Z, Ning P P, Chen C, Xu J, Chen X L, Gu C Q 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 201602
- [10] Xiang H, Meng Y, Zhang Q, Qin F F, Xiao J J, Han D Z, Wen W J 2015 *Opt. Commun.* **356** 59
- [11] Wan X, Yin J Y, Zhang H C, Cui T J 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 083502
- [12] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Feng M D, Wang J, Xu Z 2016 *Opt. Express* **24** 842

360° scanning multi-beam antenna based on spoof surface plasmon polaritons*

Han Ya-Juan¹⁾ Zhang Jie-Qiu^{1)†} Li Yong-Feng¹⁾ Wang Jia-Fu¹⁾
 Qu Shao-Bo¹⁾ Zhang An-Xue²⁾

1) (College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

2) (School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 9 March 2016; revised manuscript received 5 May 2016)

Abstract

A multi-beam antenna based on spoof surface plasmon polariton (SSPP) is proposed, which is composed of 24 identical end-fire antennas rotating around the center of the circle. Thus the angle between any two end-fire antennas is 15°. Every single end-fire antenna consists of feeding monopole and periodic metallic blade structure sandwiched between two identical 0.5 mm-thick F4B substrates ($\epsilon_r = 2.65$, $\tan(\delta) = 0.001$). And the periodic metallic blade structure can be regarded as two regions. The first region (Region I) is a double-side corrugated metallic strips with continuous gradient height, so that the SSPP has a linear propagation constant distribution on the strips. Good matching of both impedance and wave vectors between spatial wave and SSPP waveguide ensures the conversion of high-efficiency from spatial modes into SSPP modes and that of high-efficiency radiation from SSPP modes into spatial modes. The second region (Region II) is the transition part of the SSPP wave with constant blade height. Geometric parameters are optimized by using CST Microwave Studio and the dimension of the single end-fire antenna is 111 mm \times 15.2 mm \times 1 mm. A prototype is fabricated and tested, showing good agreement between numerical simulation and experimental results, which proves that the electromagnetic wave of the monopole is successfully coupled and nearly completely confined on the metallic blade structure, and radiated at the end of the blade, resulting in omnidirectional radiation pattern of the monopole being mediated to directive beam steering at end fire. Rotate the 24 identical antennas around the center of the circle with respect to a cylinder, namely the proposed 360° scanning multi-beam antenna in this paper. The optimized radius of the proposed antenna cylinder is set to be 128 mm. The simulated and measured results are consistent with each other and clearly indicate that the proposed multi-beam antenna shows a scanning capability over 360° in the xoy plane with an average directivity of approximately 11.8 dBi and 3 dB angular width of 15° in operation bandwidth 9.5–10.25 GHz. Changing the geometric parameters of the blade structure, the characteristics of the gain, bandwidth, and 3 dB angular width for multi-beam antenna will be also changed. Unlike traditional multi-beam antennas, the proposed antenna based on SSPP mode coupling is no longer limited to the principle of geometrical optics, but mediates the omnidirectional radiation pattern of the monopole to directive beam by utilizing great confinement property of SSPP, which gives high degree of freedom for designing the multi-beam antennas. Besides, derived from the characteristics of deep-subwavelength and localized field enhancement for SSPPs, the proposed multi-beam antenna obtains many advantages, such as low profile, simple structure, high realizability, and important application values.

Keywords: spoof surface plasmon polaritons, multi-beam antenna, end-fire antenna

PACS: 73.20.Mf, 84.40.Ba

DOI: 10.7498/aps.65.147301

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61331005, 61501503, 11274389, 61471388) and the Science and Technology Innovation Team of Shaanxi Province, China (Grant No. 2014KCT-05).

† Corresponding author. E-mail: zhangjiq0@163.com