

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.11.016

# 一种电磁耦合馈电双极化毫米波微带天线设计

宋立众<sup>1,2</sup>, 聂玉明<sup>3</sup>, 段舒雅<sup>2</sup>

(1. 毫米波国家重点实验室(东南大学), 210096 南京; 2. 哈尔滨工业大学(威海)信息与电气工程学院, 264209 山东 威海;  
3. 哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 150001 哈尔滨)

**摘要:** 为拓展双极化毫米波天线的带宽, 提出一种基于电磁耦合馈电的微带贴片实现方案. 采用共面寄生贴片和空间平行寄生贴片将天线单元的阻抗带宽展宽, 采用成对反相馈电技术设计  $2 \times 2$  的子阵天线, 在中心频点 37.5 GHz, 驻波  $< 2$  的标准下, 天线阵列的相对带宽为 6.13%, 隔离度  $> 30$  dB, 交叉极化达到  $-23.6$  dB, 增益为 11.5 dBi. 提出的双极化微带天线, 具有频带宽、端口隔离度大、交叉极化低、增益高的特点, 天线性能符合毫米波双极化天线的一般工程要求.

**关键词:** 毫米波; 双极化; 微带天线; 电磁耦合

中图分类号: TN821

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)11-0093-05

## Design of a dual polarized millimeter wave microstrip antenna fed by electromagnetic coupling

SONG Lizhong<sup>1,2</sup>, NIE Yuming<sup>3</sup>, DUAN Shuya<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Millimeter Waves (Southeast University), 210096 Nanjing, China; 2. School of Information and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, Shandong, China; 3. Dept. of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

**Abstract:** An implementation scheme of dual polarized millimeter wave microstrip patch antenna with broad bandwidth is proposed. The impedance bandwidth is broadened by employing coplanar parasitic patches and spatial parallel parasitic patches. The pair-wise anti-phase technology is used to design the  $2 \times 2$  array antenna. The impedance bandwidth of the proposed antenna is 6.13% at the center frequency of 37.5 GHz with the isolation larger than 30 dB. The cross-polarization is  $-23.6$  dB and the gain of the antenna is 11.5 dBi under the criterion of VSWR less than 2. The proposed dual polarized microstrip antenna has promising features in terms of broad impedance bandwidth, high isolation between the input ports, reduced cross-polarization and high gains. The performances can meet the general requirements of the engineering dual polarized millimeter wave antenna.

**Keywords:** millimeter wave; dual polarization; microstrip antenna; electromagnetic coupling

毫米波的波长短, 毫米波雷达的波束宽度较窄, 因而具有更高的角分辨力和低仰角跟踪能力. 毫米波较宽的可用频带能够提高雷达系统的距离分辨力, 距离分辨力提高的同时能够提高毫米波雷达的抗干扰能力. 毫米波频带为各种无线应用提供了很多机会, 例如 35 GHz 的被动成像雷达<sup>[1]</sup>、60 GHz 以上的频带可以用在高数据率无线电路连接和传感应用<sup>[2]</sup>、77 GHz 的汽车雷达<sup>[3]</sup>、94 GHz 的成像器和辐射器<sup>[4-5]</sup>等. 天线成为毫米波发展的关键部件, 毫米波天线也已经有各种各样的应用, 例如, 宽带高

速无线通信系统<sup>[6]</sup>和自动雷达系统<sup>[7]</sup>等. 毫米波雷达系统要求低剖面、高增益及低成本天线. 微带天线具有剖面薄、体积小、重量轻、易共形、能与有源器件和电路进行集成设计、容易实现双频和双极化等性能. 基于此, 本文研究采用微带天线技术的双极化毫米波天线方案.

如何提高双极化天线的端口隔离度以及交叉极化性能是双极化天线领域中重要的研究内容. 双极化的平面馈电方式分两种: 一种是共面微带馈电, 另一种是缝隙耦合馈电. 其中采用缝隙耦合馈电的优点是阻抗带宽比较宽和易于实现双极化辐射特性. Alexandre Perron 等设计的天线是将矩形缝隙以“L”型放置, 天线端口隔离度为  $-19$  dB, 交叉极化为  $-18$  dB<sup>[8]</sup>. 文献<sup>[9]</sup>设计的矩形缝隙是按“十”字型设置, 这种馈电结构由于两个端口的馈线不在同一层介

收稿日期: 2014-08-03.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61171181); 毫米波国家重点实验室开放课题(K201328); 中国博士后科学基金(2014M561554).

作者简介: 宋立众(1975—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 宋立众, songlizhong@hitwh.edu.cn.

质上,有效的提高隔离度性能,在工作带宽内隔离度改善到 22 dB,交叉极化可达到-25 dB 以下<sup>[9]</sup>.

本文研究了电磁耦合馈电的双极化毫米波微带贴片天线,分别采用共面的寄生贴片和空间平行的寄生贴片结构,以达到增加天线的阻抗带宽的目的;利用设计的单元形式组成  $2 \times 2$  阵列天线,仿真实现了一个毫米波双极化微带结构的子阵天线.

## 1 缝隙耦合微带天线的频带展宽

常用展开微带天线带宽的方法有增加基片厚度、降低基板介电常数、加载寄生贴片、开槽和采用阻抗匹配等. 本文采用加载寄生贴片的方式进行频带扩展;为更好地实现阻抗匹配,在馈线处加入了一个梯形的结构. 寄生贴片可激发与主辐射贴片的谐振频率相邻的频点,结果就是使得天线的有效阻抗带宽得到展宽,这种现象也称为双共振技术. 本文在主辐射贴片的两个辐射边缘分别放置寄生贴片,天线上面又加了一层空气层和介质板层,垂直方向所加寄生贴片为正方形. 该天线的结构模型见图 1.

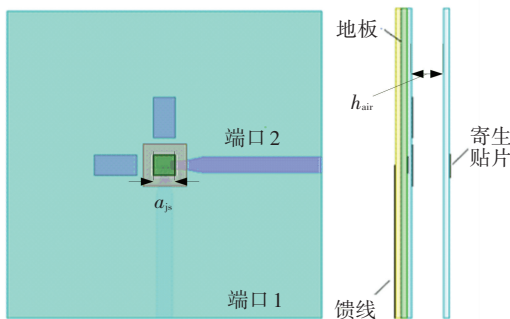
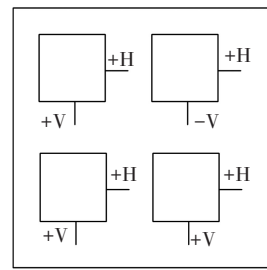


图 1 加载寄生贴片的微带天线结构

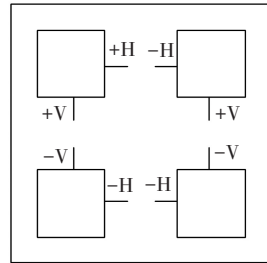
最终该天线的尺寸确定为垂直方向寄生贴片的边长为 1 mm,共面寄生贴片的长度为 2 mm,宽度为 1.7 mm. 经过仿真优化,该天线的电压驻波比  $\leq 2$  的频率范围约为 36.15 ~ 43.85 GHz,相对带宽约 20.53%. 在工作带宽内, $S_{21} < -20$  dB,具有很好的隔离度特性.

## 2 子阵单元设计与仿真

基于上面的设计结论,本文在此部分研究一个四单元子阵的设计与仿真问题. 图 2 为两种  $2 \times 2$  阵列天线的不同组阵方式. 图 2(a) 为成对同相馈电方式,即阵列中相邻单元结构是相同并且都是等幅同相馈电;图 2(b) 为成对反相馈电方式. 成对反相馈电技术可以减小天线的交叉极化<sup>[10]</sup>. 相邻单元之间是镜像结构,并且垂直端口或者水平端口之间的馈电是反相的,可使得介质板上的所有单元都受到相同的激励.



(a) 成对同相馈电



(b) 成对反相馈电

图 2 阵列天线的不同组阵方式

文献[11]对这两种结构的阵列分别做仿真实验,并对结果进行分析比较. 通过比较二者的方向图仿真结果发现:等幅同相馈电阵列的交叉极化电平主要取决于单元的交叉极化性能;而反相馈电阵列的交叉极化性能有了很大的改善. 在文献[12]中对利用成对反相馈电的  $4 \times 4$  阵列进行详细的数学理论分析,给出天线阵列的辐射方向图方程. 在设计中,除天线的交叉极化性能之外还要考虑寄生贴片的位置与单元之间的距离,所以采用成对反相馈电技术.

### 2.1 馈电网络设计

图 3 为本文设计的缝隙耦合馈电子阵天线的馈电网络的结构图,采用的正是成对反相馈电. 由于相邻的同种极化端口是反相的,所以在馈电网络中需要加入反相器,就是图 3 中圆圈圈起来的部分,反相器的馈线总和理论上应为  $\lambda_e/2$ ,因为波走过半个波长,相位刚好反相. 所以将  $\lambda_e/2 = 2.865$  mm 设为反相器的初始值. 在 HFSS 中可以单独对馈电网络进行优化仿真,直到相邻的同种极化的端口之间的相位相差  $180^\circ$ ,最后优化的得到的结果是反相器的馈线总和为 2.2 mm.

馈电网络的设计利用了简单的微带三端口功率分配器. 因为两个端口的情况是一样的,以端口 1 为例进行分析说明. 端口 1 的阻抗为  $Z_0$ ,一分为二后  $Z_1 = Z_0\sqrt{2}$ ,继续一分为二后  $Z_2 = Z_1\sqrt{2}$ . 子阵天线的端口要求是  $50 \Omega$  的微带线,代入计算可得  $Z_1 = 70.7 \Omega$ , $Z_2 = 90.9 \Omega$ . 根据微带线的阻抗以及介质板的已知条件: $h = 0.254$  mm 和  $\epsilon_r = 2.2$ ,可计算出: $w_0 = 0.80$  mm、 $w_1 = 0.45$  mm、 $w_2 = 0.27$  mm. 将理论

值设为初始值, 然后在 HFSS 中进行仿真优化. 最后优化得到的值为:  $w_0 = 0.80 \text{ mm}$ 、 $w_1 = 0.40 \text{ mm}$ 、 $w_2 = 0.20 \text{ mm}$ .

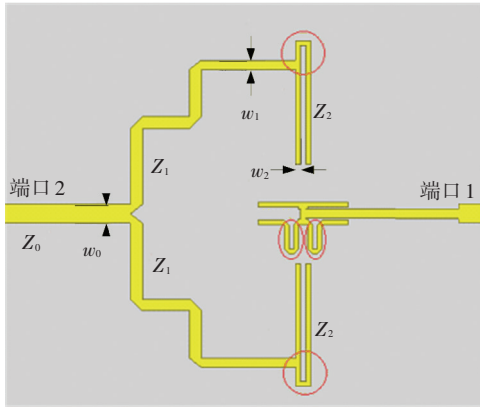


图 3 馈电网络示意

## 2.2 2×2 子阵天线的仿真

### 2.2.1 天线结构

设计的缝隙耦合馈电的 2×2 子阵天线, 结构见图 4. 为使得天线的各个指标都符合要求, 对天线的单元进行调整, 包括寄生贴片的大小、辐射贴片的大小以及缝隙的形状等. 首先在天线的后方增加了一块反射板, 目的是减小天线的后向辐射, 使天线单向辐射, 并且提高增益. 增加放射板后天线, 天线主要向介质板上方辐射. 2×2 子阵天线单元之间的距离取值为  $\lambda/2$ . 2×2 子阵天线单元之间的各参数取值见表 1.

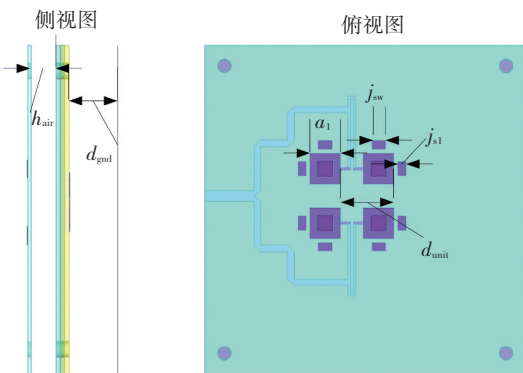


图 4 子阵天线结构

表 1 子阵天线结构参数取值表 mm

$a_1$	$j_{sl}$	$j_{sw}$	$d_{unit}$	$h_{air}$	$d_{gnd}$
2.2	0.6	1.0	4.0	1.5	2.9

本文采用电磁仿真软件 CST 和 HFSS 同时进行仿真, 以验证设计的正确性. 通过多次扫描优化得到的天线两个端口回波损耗见图 5. 可知: 虽然端口 2 的回波损耗已经优化到 37.5 GHz 附近有  $S_{22} < -10 \text{ dB}$ , 但端口 1 的回波损耗仍无法达到 37.5 GHz 附近  $S_{11} < -10 \text{ dB}$ . 由于微带馈线本身存在

损耗, 馈电网络的损耗要比单条微带线的损耗更多, 从而导致通过缝隙耦合到贴片上的能量也减少, 使得天线无法形成有效的谐振.

因此在优化过程中, 为使缝隙耦合馈电端口能够耦合更多的能量到辐射贴片上, 将最初的矩形缝隙变为 T 型缝隙, 见图 6. 缝隙结构的参数取值见表 2. 通过仿真结果也能证明在本文的阵列天线中, T 型缝隙能够得到更好的阻抗匹配.

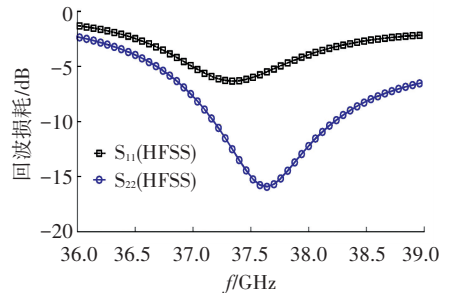


图 5 矩形缝隙阵列的端口回波损耗仿真结果

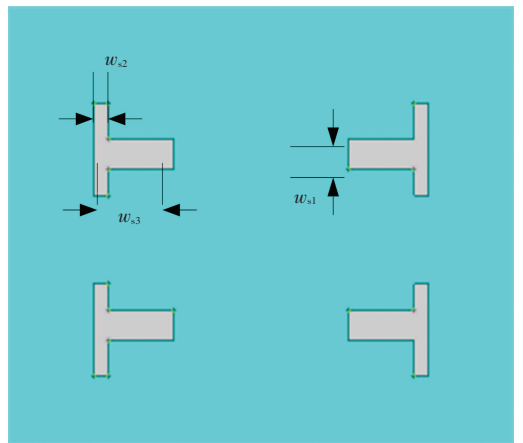


图 6 T 型缝隙示意

表 2 缝隙结构参数取值表 mm

$w_{s1}$	$w_{s2}$	$w_{s3}$
0.5	0.3	1.1

### 2.2.2 性能分析

图 7 为 T 型缝隙阵列天线的 S 参数仿真结果, 可得出天线的工作频率为 36.6~38.9 GHz, 相对带宽为 6.13%. 子阵天线的带宽比天线的带宽要窄, 这是因为馈电网络本身是窄带的, 导致天线的带宽变窄. 组阵后天线的隔离度在整个频带内都  $< -30 \text{ dB}$ , 因两个端口的馈电网络本身不在同一层, 而且组阵后两个极化的馈电网络之间的距离变大, 相互之间的耦合减小.

子阵天线在 E 面和 H 面的交叉极化特性分别见图 8、9. 天线在 37.5 GHz 处的最大增益为 11.5 dBi, 比单个单元的增益增加了约 6.6 dBi, 天线的交叉极化绝对值可达到 23 dB, 并且天线的 3 dB 波束带宽约为  $54^\circ$ .

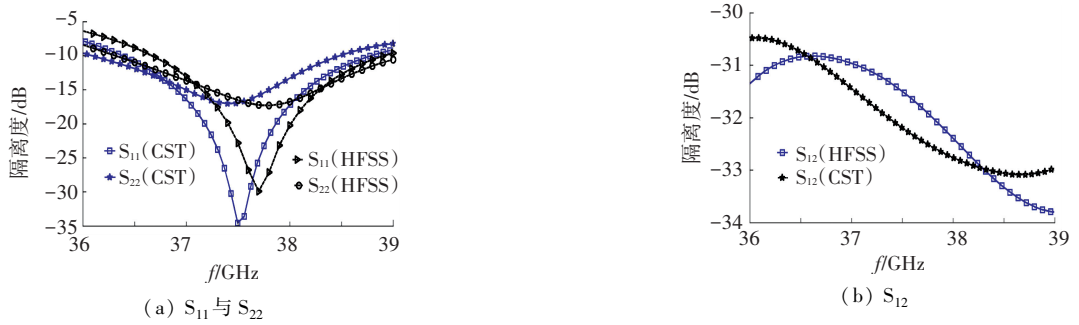


图 7 T 型缝隙阵列的 S 参数仿真结果

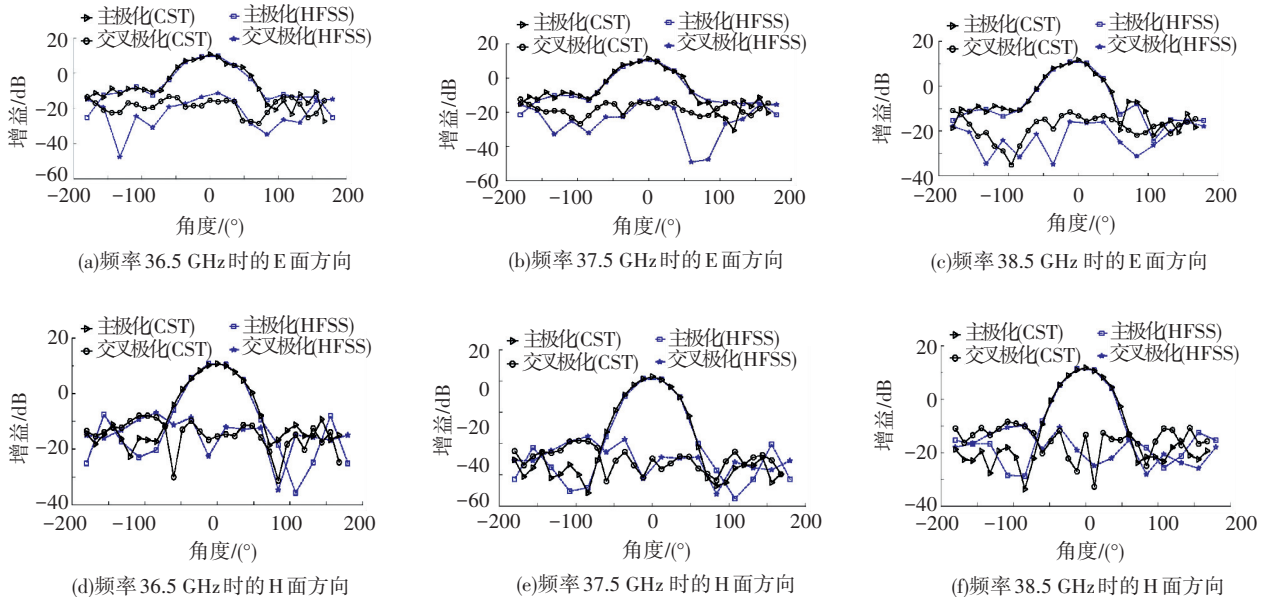


图 8 子阵天线端口 1 在不同频点处的方向

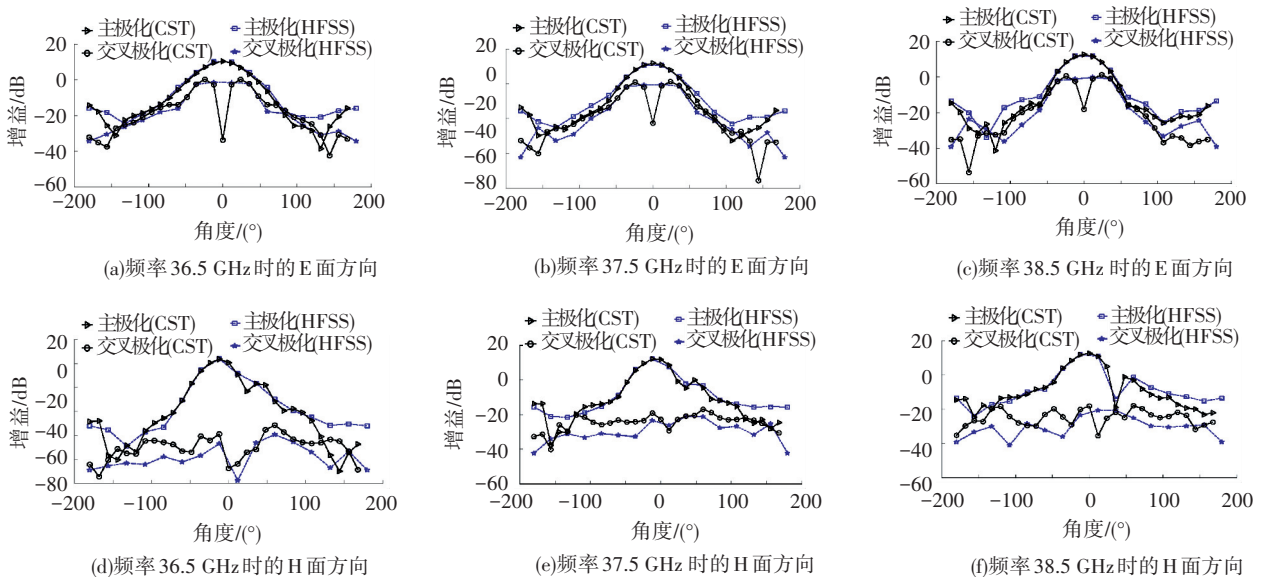


图 9 子阵天线端口 2 在不同频点处的方向

从频率分别为 36.5、37.5、38.5 GHz 时的天线辐射方向图可以看出,本文设计的天线具有单向辐射

特性,并且 E 面与 H 面的辐射方向图均表现为光滑的特性,大多数能量也都集中到天线的 3 dB 带宽内.

### 3 结 语

本文研究了基于电磁耦合馈电技术的双极化毫米波微带天线设计方案,从驻波比带宽、端口隔离度和交叉极化电平等技术指标出发,讨论具体的设计思路和仿真优化工作.在采用寄生贴片技术实现带宽展宽的基础上,设计与仿真一个四单元子阵,着重关注了其馈电网络的设计,给出了子阵天线的仿真优化结果.在中心频点 37.5 GHz,天线阵列的相对带宽为 6.13%,端口隔离度 > 30 dB,交叉极化达到 -23.6 dB,增益为 11.5 dBi,其技术指标满足一般工程设计要求.本文研究作为双极化毫米波天线的设计方案和工程实现提供一条有效的技术途径.

### 参考文献

- [1] DOGHRI A, GHIOTTO A, DJERAFI T, et al. Early demonstration of a passive millimeter-wave imaging system using substrate integrated waveguide technology [C]//Mediterranean Microwave Symposium (MMS). Hammamet; IEEE, 2011: 215-218.
- [2] PEPE D, ZITO D. 60-GHz transceivers for wireless HD uncompressed video communication in nano-era CMOS technology [C]//MELECON15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Valletta; IEEE, 2010: 1237-1240.
- [3] WAGNER C, STELZER A, JAGER H. A phased-array radar transmitter based on 77-GHz cascaded transceivers [C]//Microwave Symposium Digest, 2009. MTT'09. IEEE MTT-S International. Boston; IEEE, 2009: 73-76.
- [4] GOSHI D S, LIU Y, MAI K, et al. Recent advances in 94 GHz FMCW imaging radar development [C]//Microwave Symposium Digest, 2009. MTT '09. IEEE MTT - S International. Boston; IEEE, 2009: 77-80.
- [5] MIGLIACCIO C, DAUVIGNAC J Y, BROCHIER L, et al. W-band high gain lens antenna for metrology and radar applications [J]. Electronics Letters, 2004, 40 (22): 1394-1396.
- [6] TOKORO S. Automotive application systems of a millimeter-wave radar [C]//Intelligent Vehicles Symposium, 1996., Proceedings of the 1996 IEEE. Tokyo; IEEE, 1996: 260-265.
- [7] FUJIMURA K. Current status and trend of millimeter-wave automotive radar [C]//Microwave Workshops and Exhibition Digest. [S.l.]:MWE. 1995, 95: 225-230.
- [8] Perron A, Denidni T A, Sebak A R. A low-cost and high-gain dual-polarized wideband millimeter-wave antenna [C]//European Conference on Antennas and Propagation, 2009. EuCAP'09, Berlin, Germany; 2009: 3558-3561.
- [9] TSAO C H, HWANG Y M, KILBURG F, et al. Aperture-coupled patch antennas with wide-bandwidth and dual-polarization capabilities [C]//Antennas and Propagation Society International Symposium, 1988. Syracuse; AP-S. Digest. Syracuse; IEEE, 1988: 936-939.
- [10] 徐得名,钟顺时,陈惠民,等. 上海大学微波与无线通信领域的科学研究[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2011, 17(4): 337-352.
- [11] 孔令兵. 双波段双极化天线单元与阵列[D]. 上海:上海大学, 2012.
- [12] Woelder K, Granholm J. Cross-polarization and sidelobe suppression in dual linear polarization antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(12): 1727-1740.

(编辑 苗秀芝)