

文章编号: 2095-4980(2017)04-0625-05

S 波段宽波束圆极化天线设计

李 荣, 吴景峰, 马志慧, 王志强, 赵 鹏

(中国电子科技集团公司 第 13 研究所, 河北 石家庄 050051)

摘 要: 随着现代无线通信系统的发展, 对天线也提出了一些特定的更高的要求。设计了一种 S 频段宽波束圆极化微带天线, 以满足系统对天线宽波束辐射的要求; 在天线的辐射贴片上附加寄生贴片以展宽天线带宽, 并利用金属化过孔以实现单边短路, 达到天线小型化设计的目的; 利用旋转结构结合多点馈电技术以获得微带天线宽波束圆极化辐射。通过理论分析并利用三维电磁仿真软件 HFSS 对天线进行了仿真设计和实验, 仿真结果与测试结果吻合良好。

关键词: 微带天线; 宽波束; 圆极化; 轴比; 方向图

中图分类号: TN821⁺.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0625

Design of an S-band wide beam circular polarized antenna

LI Rong, WU Jingfeng, MA Zhihui, WANG Zhiqiang, ZHAO Peng

(The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

Abstract: With the development of modern wireless communication system, some specific higher requirements on the antenna are put forward. In order to meet the system requirements for wide beam radiation, an S-band wide beam circular polarized antenna is proposed. Additional parasitic patches are added on the radiation patch antenna in broadening the bandwidth of the antenna. And the metalized via is adopted to achieve unilateral short circuit. The purpose of miniaturization of the antenna design is therefore achieved. The sequential rotation method combined with multi-point feeding technology is utilized to obtain a broad band microstrip antenna wide beam circular polarized radiation. The structure parameters of antenna are designed according to theoretical analysis and High Frequency Structure Simulator(HFSS) software. The simulation results are in good agreement with the test results.

Keywords: microstrip antenna; wide beam; circular polarization; axial ratio; radiation pattern

天线作为通信系统的前端, 在不同应用领域, 对其极化方式、增益和方向图都有着特定的要求。微带天线在工作频带内具有稳定的阻抗特性, 且剖面低, 体积小, 易共形, 尺寸相对其他宽带或口径天线具有显著优势, 所以在对空气动力学特性、机械稳定性、体积和质量等均有严格要求的机载、弹载、星载等无线通信系统中得到了广泛应用^[1-2]。圆极化天线可接收任意极化的电磁波, 且其辐射波也可由任意极化天线收到, 故电子侦察和干扰中普遍采用圆极化天线; 在通信、雷达的极化分集工作和电子对抗等应用中广泛利用圆极化天线的旋向正交性; 圆极化波入射到对称目标(如平面、球面等)时反射波旋向反转^[3], 圆极化天线能够提高通信链路的抗极化失配能力, 而且圆极化天线辐射的电磁波可以抑制雨雾等自然现象引起的去极化效应和多径反射。

本文以保证天线具有优良工作特性为前提, 巧妙地结合常规经典的天线设计方法, 提出了同时具有小型化和宽波束特性的圆极化微带天线结构, 保证天线具有较宽的辐射波束, 且在低仰角时仍具有较大增益和较小的轴比, 保障无线通信链路的畅通。

1 结构与原理

1.1 微带天线辐射机理

采用微带线或者同轴探针贴片进行馈电, 在贴片和接地板之间激励起高频电磁场, 可近似等效为分布在金属贴片与天线底板间缝隙上的磁流, 由此向外辐射能量^[4], 微带天线辐射场示意图如图 1 所示。因此, 其辐

收稿日期: 2016-01-09; 修回日期: 2016-03-02

射性能尤其是低仰角性能受天线罩、安装环境、周围金属载体及其他天线单元的影响很大。

微带天线的近似模型是将天线单元看作一个谐振腔，通过计算表面等效磁流来求出辐射场。但微带天线的高度远小于波长，腔内场型近似为二维分布，属于一维电小天线。1948年，电磁理论专家朱兰成先生就已证明，电小天线辐射效率偏低，频带很窄。

微带天线的介质基板材料及厚度确定后，假设介质的介电常数为 ϵ_r ，厚度为 h ，天线的中心频率为 f_0 ，则微带贴片天线的尺寸可以通过理论分析和经验公式^[5]来初步确定。微带天线矩形贴片宽度可根据腔模理论分析，用公式(1)计算得到：

$$w = \frac{c}{2f_0} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中 c 为光速 ($c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。矩形贴片的宽度影响天线的辐射效率，贴片宽度较小，天线辐射效率降低，贴片宽度较大，天线辐射效率提高，但此时将产生高次模，从而引起天线辐射场的畸变。天线介质基板的等效介电常数可由公式(2)计算得到：

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

考虑天线的边缘效应，假设 ΔL 为边缘效应引起的延伸长度，则：

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_c + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_c - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

最后，根据天线谐振频率、基板介电常数和厚度，可以通过式(4)计算得到微带天线矩形贴片的初始长度。

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_c}} - 2\Delta L \quad (4)$$

微带天线主瓣的半功率波束宽度可近似由公式(5)和公式(6)计算得到：

$$2\theta_{0.5H} = 2 \cos^{-1} \left[\frac{1}{2 \left(1 + \frac{k_0 W}{2} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$2\theta_{0.5E} = 2 \cos^{-1} \left[\frac{7.03}{(3k_0^2 L^2 + k_0^2 h^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

由公式(5)和(6)可得，减小微带天线矩形贴片的长 L 和宽 W ，即选用尺寸较小的辐射单元，可以达到展宽微带天线的主瓣宽度的目的^[6]，如图 2 所示。微带天线谐振时，空腔内的电场呈正弦分布，天线两端磁壁处电场最强为电压波腹点，在 $L/2$ 处为电压波节点，即此处垂直电场为零。在该处与地短路连接，并不影响天线内场分布，同时天线的尺寸可以减小到一半^[7]，得到微带短路贴片天线。

1.2 微带天线阵列

由多个天线辐射单元在平面上以一定的规律或随机方式排列，且通过一定的激励从而获得所需辐射特性的天线阵，通过选择及优化辐射元的数目、间距及分布排列方式、激励幅度及激励相位，使天线的方向性增强，获得更高增益及所需的辐射特性。对于天线阵列来说，利用多个线极化(即多馈点设计)辐射元，将每一馈点都分别对一个线极化辐射元馈电，也可以实现微带天线的圆极化辐射。并且连续采用相位旋转法^[8](sequential rotation method)，通过合理安排每个阵元的激励相位(即合理的布阵)可以有效地抑制交叉辐射，减小各阵元间的互耦效应，能够有效地改善圆极化微带天线阵的轴比。

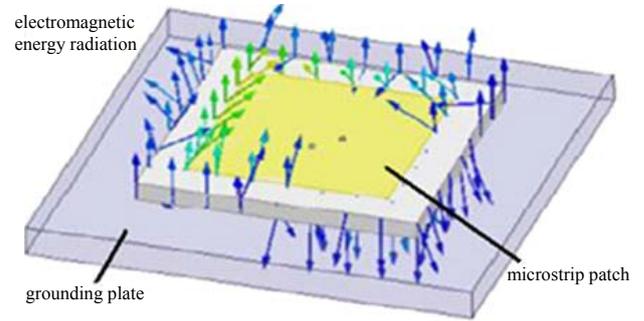


Fig.1 Microstrip antenna and its radiation field sketch
图 1 微带天线及其辐射场示意图

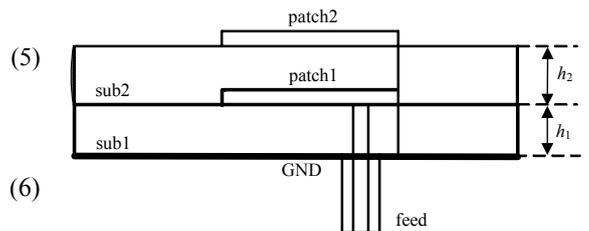


Fig.2 Side view of the double short circuit patch
图 2 双层短路贴片侧视图

2 天线仿真设计

2.1 馈电网络

馈电网络介质基板的相对介电常数为 6.15，厚度为 0.635 mm，为使 4 个馈电点处的馈电相位和幅度在较宽的频带内保持稳定，考虑使用混合电桥以得到 4 个输出端口分别具有 0°,90°,180°,270°相位的等幅激励的馈电网络。馈电网络模型如图 3 所示，利用 Moore 分形曲线^[9-10]，可以得到一次迭代 Sierpinski 小型化 90°混合电桥和二次迭代 Moore 小型化 180°混合电桥的小型化馈电网络，且与常规混合电桥具有基本相同的性能。

2.2 天线结构及仿真结果

天线辐射贴片通过金属化过孔与反射板短路连接，天线的尺寸减小了一半，天线尺寸的减小使得天线组阵设计更容易实现。同时，在单层短路贴片上面增加一层寄生贴片，金属贴片印刷在介质基板上，寄生贴片也通过金属化过孔与反射板短路连接，天线模型如图 4 所示。

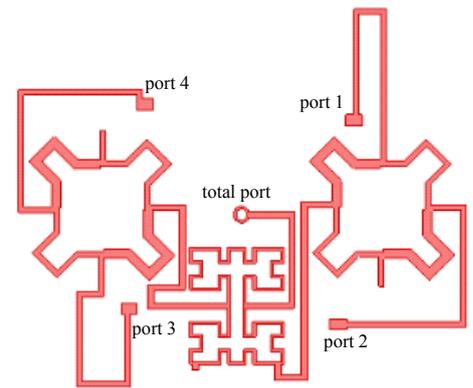


Fig.3 Feed network structure of the antenna
图 3 天线馈电网络结构

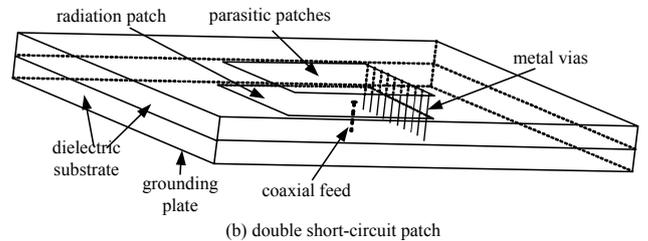
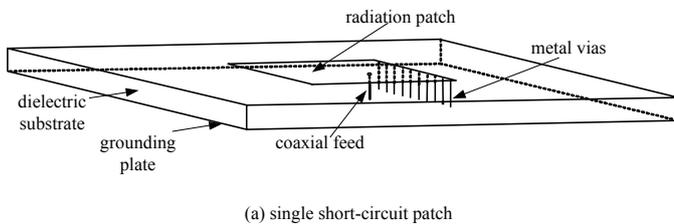


Fig.4 Microstrip patch element model
图 4 微带贴片单元模型

从图 5 中的仿真结果可以看出，在辐射贴片上附加 1 层寄生贴片，能够有效地拓宽天线的带宽，改善微带天线带宽窄的缺点，使天线性能更加优良。宽波束圆极化印刷微带天线阵的结构如图 6 所示，天线子单元为双层短路贴片，该天线由 2 层介质板构成，第 1 层介质板的上表面印刷 4 个矩形寄生贴片，第 2 层介质板上表面印刷 4 个矩形辐射贴片。第 1 层介质基板和第 2 层介质基板的介电常数均为 2.55，其厚度均为 1.6 mm，天线的结构参数值如表 1 所示。

寄生贴片和辐射贴片通过金属通孔直接与地板连接。寄生贴片和辐射贴片均为旋转对称结构，通过小型化馈电网络分别获得 0°,90°,180°,270°馈电相位的等幅激励，实现天线圆极化辐射。由于辐射单元之间交叉极化辐射互相抵消，所以该天线的总体交叉极化比低，极化纯度高，并且方向图比较对称。从图 7 可以看出，天线在 2.18~2.5 GHz 频带范围内，天线的驻波系数均小于 1.6。

表 1 天线结构参数

Table 1 Antenna structure parameters			
W_1/mm	W_2/mm	L/mm	S/mm
19.7	18.4	20.3	3.9

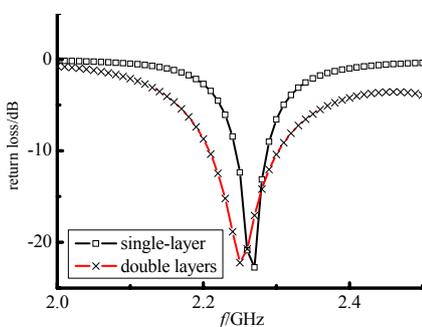


Fig.5 Bandwidth curves of single and double short-circuit patches
图 5 单层和双层短路贴片带宽曲线

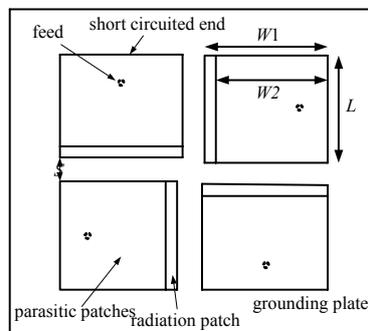


Fig.6 Wide beam circular polarization microstrip antenna
图 6 宽波束圆极化印刷微带天线

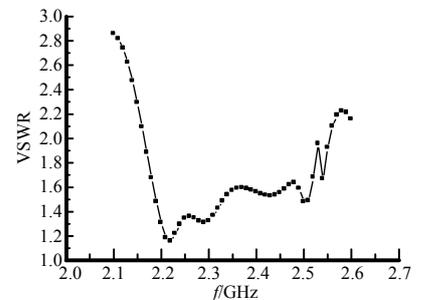


Fig.7 Curve of VSWR change with frequency
图 7 电压驻波比随频率变化曲线

天线中心频率 2.3 GHz 处的方向图仿真结果如图 8 所示，天线增益为 4.6 dBi，天线的 3 dB 波束宽度大于 100°，天线 E 面和 H 面方向图重合较好。

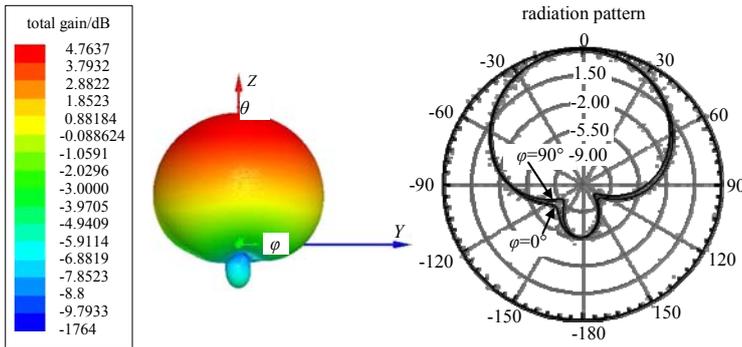


Fig.8 Radiation pattern and gain of antenna
图 8 天线增益及方向图

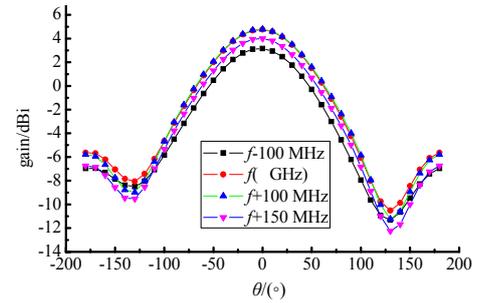


Fig.9 Antenna gain pattern curves of four frequency points
图 9 四个频点处天线增益方向图曲线

从图 9 可以得到，天线在 2.2 GHz 处的增益比中心频率处低，同时天线的半功率波束宽度也有所减小，天线在 2.4 GHz 处增益升高，但是天线在 2.45 GHz 处的增益相对 2.4 GHz 处时有所减小，这是由于馈电网络在此频段处插耗增大造成的。天线在 2.2~2.43 GHz 频段内半功率波束宽度均大于 100°，能够很好地实现天线的宽波束圆极化辐射。

轴比是圆极化天线的一项重要指标。它不仅表示接收圆极化信号时极化损失的程 度，而且低仰角的轴比性能对天线抑制多径干扰或其他干扰有重要意义。从图 10 中天线在各个频点处轴比曲线可以看出，这种结构的 天线轴比特性很好，在 2.2~2.45 GHz 频带范围内，天线 3 dB 轴比宽度均大于 200°，能很好地实现天线的圆极化辐射。

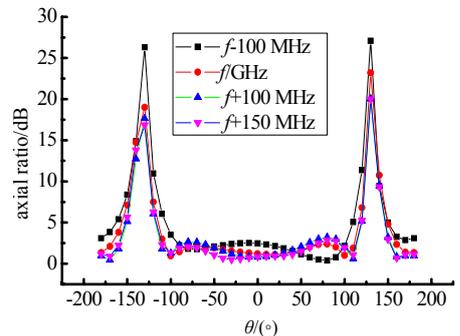


Fig.10 Simulated AR pattern
图 10 天线轴比方向图

3 天线加工制作与测试

经过一系列的分析 和计算，并利用三维电磁仿真软件(HFSS)进行建模并仿真优化，最终确定天线的结构与尺寸，根据仿真结果对天线进行实物加工测试，利用天线测试系统在微波暗室对天线增益及方向图进行测试，采用喇叭天线作为发射天线，本实物天线作为接收天线，得到如图 11 所示的天线方向图仿真与实测结果。

从图 11 中可以看出，天线实际测试增益为 4 dBi，比仿真结果低 0.5 dB 左右，主要是测试时微带天线与喇叭天线的放置高度存在一定差异，没有精确对准。天线实测半功率波束宽度大于 100°，与仿真结果吻合。实测方向图右边比左边高，但整体趋势与仿真结果相吻合，主要是微波暗室没有全封闭，受外部因素干扰所致。天线 4 个端口馈电相位偏差很大，幅度差异较大都会对天线的性能造成很大影响。所有在天线加工及安装过程中，需要保证馈电端口的相位及幅度的精确度。根据天线的仿真结果与实测结果的对比，本文设计的天线能够实现宽波束圆极化辐射，并已应用于如图 12 所示的天线阵列中，以获得更大增益及所需的辐射特性。

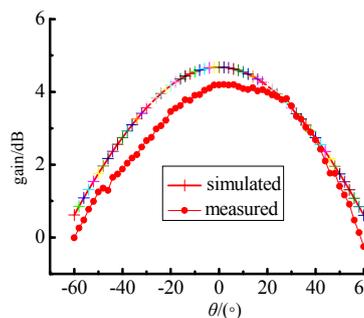


Fig.11 Measured and simulated results
图 11 天线实测与仿真结果对比

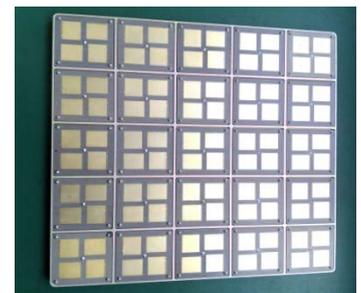


Fig.12 Photograph of antenna array
图 12 天线阵实物

4 结论

随着现代无线通信技术的不断发展，宽频、宽波束通信设备近年来成为研究的热点，天线作为无线通信系统的终端，其性能的好坏决定了整个系统的性能。本文设计了一款 S 波段微带天线，首先给出了天线的具体结构及原理，并对天线性能进行优化仿真，最后将实测与仿真结果进行了比较，结果表明仿真和实测结果基本吻合，制作的天线在其工作频带内驻波比小于 1.6，半功率波束宽度大于 100°。该天线满足无线通信系统中天线的低成本、宽波束和体积小等的要求，并已应用于某实际工程项目中，具有重要的工程应用价值。

参考文献：

- [1] ZHAO Yang,ZHANG Zhijun,FENG Zhenghe. An electrically large circularly polarized metallic cavity antenna with wide beamwidth for satellite applications[C]// 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Shenzhen,China:IEEE, 2012:1-4.
- [2] YE Xihong,HE Mang,ZHOU Pingyuan,et al. A compact single-feed circularly polarized microstrip antenna with symmetric and wide-beamwidth radiation pattern[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013:106516-1-7.
- [3] 仲从民. 毫米波圆极化微带天线[D]. 南京:南京理工大学, 2006. (ZHONG Congmin. Millimeter wave circularly polarized microstrip antenna[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Science and Technology, 2006.)
- [4] PRAKASH Bharti,INDER Bahl. Microstrip Antenna Design Handbook[M]. Artech House Inc, 2001:14-520.
- [5] 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1991. (ZHONG Shunshi. Microstrip Antenna Theory and Application[M]. Xi'an,China:Xi'an Electronic Science & Technology University Press, 1991.)
- [6] 孙莉. 卫星接收机中小型化宽波束微带天线研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2006:9. (SUN Li. The wide beam microstrip antenna research of satellite receiver[D]. Changsha,China:National University of Defense Technology, 2006:9.)
- [7] 陈洪艳. 微带短路贴片天线与倒F天线的设计[D]. 天津:南开大学, 2008. (CHEN Hongyan. The design of short circuit patch microstrip antenna and inverted F antenna[D]. Tianjin,China:Nankai University, 2008.)
- [8] HUANG J. A technique for an array to generate circular polarization with linearly polarized elements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986,34(9):1113-1124.
- [9] GHALI H,MOSELHY T. Design of fractal rat-race coupler[C]// 2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Fort Worth,TX,USA:IEEE, 2004:323-326.
- [10] GHALI H,MOSELHY T A. Miniaturized fractal rat-race, branch-line, and coupled-line hybrids[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004,52(11):2513-2520.

作者简介：



李 荣(1990-), 男, 云南省曲靖市人, 硕士, 主要研究方向为天线与射频电路.email: lruestc@163.com.

吴景峰(1966-), 男, 石家庄市人, 硕士, 研究员, 主要研究领域为微波毫米波电路、电磁场理论、无线通信技术.

马志慧(1987-), 女, 河北省正定市人, 硕士, 工程师, 研究方向为微波电路与天线.

赵 鹏(1979-), 男, 河北省晋州市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微波电路设计.

王志强(1972-), 男, 河北省沧州市人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为微波电路设计.