

文章编号:1000-582X(2008)01-0048-04

## 单点背馈圆极化微带天线的设计与实现

韩庆文, 邓松, 王韬  
(重庆大学通信工程学院, 重庆 400030)

**摘要:**采用有限元法对一个 5.6 GHz 的单点馈电的五边形宽带圆极化微带天线进行理论分析及设计实现,给出了完整的设计过程,找到了一种确定馈电点位置的合理方法。在此基础上,采用 HFSS 三维电磁仿真软件进行优化设计,根据优化结果做出实物并测量参数。测试结果与仿真结果吻合,说明该方法是有可行性的。

**关键词:**微带天线;圆极化;轴比;五边形;方向图;电压驻波比  
**中图分类号:**TN820.11 **文献标志码:**A

### Design and Realization of Single Back-feed Circular Polarization Micro-strip Antenna

HAN Qing-wen, DENG Song, WANG Tao

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** This paper studies the FEM (Finite Element Method) analysis method for a 5.6 GHz pentagonal circular polarization micro-strip antenna in view of the single coaxial feed. Based on the research, a circular polarization micro-strip antenna is realized. To resolve research difficulties for micro-strip antenna design, the feed point selection, locus method and optimization process are used. These should find the proper feed point for the antenna. HFSS software is used to analyze the design. The simulation results are given in this paper. The antenna is realized based on the simulation results and measured by network analysis. The measured results coincide excellently with the analysis results.

**Key words:** micro-strip antenna; circular polarization; axial ratio; pentagon; antenna pattern; VSWR

顺应近代电磁学的发展与无线应用的众多需求,天线技术历经百余年发展仍充满盎然生机。微带天线以其低剖面、可共形、易集成等颇具特色的优点,在天线开发应用中一直是研究的热点之一。而高性能圆极化微带天线在当前的应用愈加广泛。圆极化天线可接收任意极化的来波,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;圆极化天线具有旋向正交性,即圆极化波入射到对称目标(如平面、球面等)时,将发生旋向逆转,因此圆极化天线应用于移动通信、GPS 等

系统时能抑制雨雾干扰和抗多径反射<sup>[1]</sup>。

五边形贴片天线频带相对较宽,圆极化性能好,因此在实际应用中颇受关注,应用范围广泛。但是五边形的贴片难以实现严格的电磁场分析,其设计一般依赖于软件的仿真和实际经验,在具体设计中,五边形微带贴片的馈电点的选择一直是实际设计中的难题,特别是单点背馈式五边形贴片天线的馈电点选择,更是难题中的难题;微带贴片天线的馈电位置的确定往往需要实验调整的方法进行研究。另外由于微带天线的频带窄,设计尺寸的微小误差都会

收稿日期:2007-09-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目“基于认知无线电的多频段宽带无线局域网关键技术研究”(60672097)

作者简介:韩庆文(1969-),女,重庆大学高级工程师,硕士,主要从事微波天线设计研究,(Tel)023-65105925-609,  
(E-mail)hqw@ccee.cqu.edu.cn。

造成天线谐振频率的偏离,极化特性也会变差。在实际工作中由于介质基片的离散性,也影响了谐振频率的准确性。针对上述问题,笔者特别对五边形背馈式圆极化微带天线的设计过程进行深入分析,通过应用 HFSS 高频结构软件仿真,选择合理馈电点,使天线的性能得到了优化<sup>[2-3]</sup>,并制作出天线实物,通过实测结果,验证设计的合理性。

## 1 圆极化微带天线的实现

微带天线要获得圆极化波的关键是激励起 2 个极化方向正交的、幅度相等的、相位相差 90°的线极化波。当前用微带天线实现圆极化辐射主要有以下几种方法。

### 1.1 单馈法

单馈法基于空腔模型理论,利用简并模分离元产生 2 个辐射正交极化的简并模。方案多样,适于各种形状贴片。如矩形、三角形、五边形等。单馈法无需外加相移网络和功率分配器,结构简单,成本低,适合小型化的天线。

### 1.2 多馈法

多馈法采用多个馈点馈电。它由馈电网络保证圆极化工作条件,一般可采用 T 形分支或 3 dB 电桥等馈电网络。这导致馈电网络较复杂,成本较高,尺寸较大。

### 1.3 多元法

使用多个线极化辐射元,原理与多馈点法相似,只是将每一馈点分别对一个线极化辐射元馈电。可以是并馈或串馈方式的多元组合,这样馈电网络较为简化,具备多馈法的优点,主要缺点是结构复杂,成本较高,尺寸大<sup>[1]</sup>。

单点馈电圆极化微带天线无需功分器、移相器等正交馈电网络,用作相控阵天线单元时,其复杂的馈电网络可以得到有效简化,故各种形式的单点馈电圆极化微带天线得到了深入研究和广泛应用。尤其采用同轴线馈电,可以在贴片的任何位置进行馈电,便于阻抗匹配;其次,馈电网络通过一个接地面与辐射部分分离,不仅减少了寄生馈电辐射,同时可以对每一层分别优化。在所有的激励方式中,同轴馈电与贴片直接接触,馈电网络与贴片大部分隔离,从而使虚假辐射最小,是最有效的馈电方式之一。

## 2 五边形微带天线的分析方法(有限元法)

有限元法作为一种数值解法,在微带天线的求解中得到广泛应用。五边形微带状天线是一种形状不规则的微带片状圆极化天线,不能采用以前的方法来分析。研究这种天线时,馈电点及各边尺寸都

是由经验确定,至今没有严格的理论分析方法。而有限元法最主要的优点是不受讨论物理模型形状的限制,能很好地分析五边形天线。在此主要介绍用有限元法来分析五边形的过程<sup>[4]</sup>。

有限元法是把整个求解区域划分为若干个单元,在每个单元内规定一个基函数,在其它区域此函数为零,这些基函数在各自的单元内是解析的,这就是用分片解析函数代替全域解析函数。对于二维问题,单元可以取作三角形、矩形等,而以三角形适应最广。

有限元法是从经典的里兹变分法发展而来。可以证明,有下列微分方程

$$Lf = g, \quad (1)$$

式中: $L$ 为线性算子; $g$ 表示激励; $f$ 表示源的响应。如果对于定义域内任何非零函数 $f$ ,恒有内积小于 $Lf, f > 0$ ,则式(1)与下列泛函数变分等价

$$J(f) = \langle Lf, f \rangle - 2 \langle g, f \rangle. \quad (2)$$

里兹变分法是将 $f$ 分解为在域内解析的线性无关的基函数系列

$$f = \sum a_n f_n. \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3)中,则泛函 $J(f)$ 的变分就化作下列极值问题:

$$\frac{\partial J(f)}{\partial a_i} = 0, i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

对于二次微分方程的泛函数,就化作 $n$ 个线性代数方程的方程组,利用矩阵求逆,就可得到系数矩阵 $a$ 从而得出 $f$ 的近似解,这个解是稳定的。

基函数最简单的是选择一次多项式

$$f_i(x, y) = a_i + b_i x + c_i y, \quad (5)$$

式中 $a_i, b_i, c_i$ 为对应于第 $i$ 个单元的系数; $x, y$ 为该单元内的坐标。三角形的3个顶点称为结点,式(5)中未知系数正好可用3个结点处的函数值 $p_{i1}(x_1, y_1), p_{i2}(x_2, y_2), p_{i3}(x_3, y_3)$ 来表示,即

$$f_i(x, y) = N_{i1}(x, y)p_{i1} + N_{i2}(x, y)p_{i2} + N_{i3}(x, y)p_{i3}, \quad (6)$$

式中 $N_{i1}(x, y), N_{i2}(x, y), N_{i3}(x, y)$ 均为 $x, y$ 的一次多项式,且仅适于单元内部,在单元外为零,当 $x = x_1, y = y_1$ ,即第一个结点位置,有 $N_{i1}(x, y) = 1, N_{i2} = N_{i3} = 0$ 。其余类推,函数 $N_i$ 称为对应结点的基体。于是从全域来看,每个结点正好对应一个基函数,而写成全域形式为

$$f = \sum_n^M p_n N_n, \quad (7)$$

式中 $M$ 为结点数。用式(5)代入式(7)中,就可化为代数方程求解,最终求出其谐振频率 $f$ 。图1为用有限元求解五边形微带天线的单元划分。

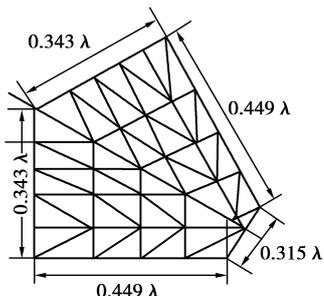


图 1 五边形单元划分

边界导纳规定  $Y = H_t/E_t$ ,  $H_t$  为边界上切向磁场。在微带腔的电磁场中,最方便的是求解电场,当基片很薄时,  $E \approx zE_z$ 。因此,电场可视为标量函数,求解较为方便。腔中电场满足微分方程:

$$\nabla \times \nabla \times E - kE = -j\omega\mu J, \quad (8)$$

$$\nabla \times \nabla^2 E_z + kE_z = j\omega\mu J_z, \quad (9)$$

式中  $k = \omega \sqrt{\mu\varepsilon}$ ;  $J_z$  为激励电流密度。

边界  $H_t = \frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial E_n}{\partial n}$ ,  $n$  为外法向单位矢量。

故边界条件为

$$\frac{\partial E_n}{\partial n} = j\omega\mu Y E_z. \quad (10)$$

式(8)、(9) 对应的泛函数为

$$J(E_z) = \int_S [|\nabla_t E_z|^2 - k_2^2 |E_z|^2] ds + \int_L j\omega\mu J_z E_z dl - \frac{j\omega\mu Y}{2} \int_C |E_z|^2 dl, \quad (11)$$

式中  $\nabla_t E_z = \mathbf{x} \frac{\partial E_z}{\partial x} + \mathbf{y} \frac{\partial E_z}{\partial y}$ ;  $S$  为微带片面积;  $C$  为其周界;  $L$  为激励源  $J_z$  的周界。应用有限元法,将五边形微带片区域分成三角形单元,如图 2 所示。利用前述方法,对泛函数变分可化为如下代数方程:

$$\mathbf{k}p - \mathbf{k}_2 \mathbf{H}p = \mathbf{T}, \quad (12)$$

式中  $p$  为列矩阵,表示各结点  $E_z$  的值,  $\mathbf{k}, \mathbf{H}$  均为系数矩阵,  $\mathbf{T}$  为与源积分项有关的常数矩阵,通过此式的解可求出天线的输入阻抗。若所讨论的是无源问题,即  $J_z = 0$ , 则  $\mathbf{T} = 0$ , 式(12)化作特征方程,可求出谐振频率和共振模。

### 3 尺寸设计及馈电点的选择

以一个 5.6 GHz 的圆极化微带天线为设计目标,要求天线辐射尽量接近纯圆极化,即有较低的圆极化轴比,具有好的带宽特性,有较高的增益。微带贴片天线是高  $Q$  值谐振天线,在保证一定带宽实现阻抗匹配是一个难点,也就是阻抗为 50  $\Omega$  的馈电点,如何同时在圆极化和宽带之间找到平衡。如图 1,它各边的尺寸关系是采用有限元法分析,由经验所得一组近似值,在实际的设计中只能作为一个参

考,还要进行适当的修改。

根据式(12)、(13)求得的介质波长

$$\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon_e}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_e = \frac{1 + \varepsilon_r}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + \frac{10h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

根据这个介质波长,得到各边的长度。通过调整参数改变馈电点的位置并适当改变五边形的结构,最终得到具有比较理想的圆极化方向图的五边形天线。

馈电位置的选择在微带天线的设计中是一个关键点。馈电的位置不但决定天线的激励模式,还影响天线的辐射特性,调试时既要考虑辐射场的幅度,又要考虑其相位和谐振频率,故此选择起来比较困难。通过在实际中的不断摸索,笔者找到了一个比较实用的调试方法:首先根据计算,可以得出圆极化馈电点的轨迹<sup>[5]</sup>,如图 2 所示,在图 2 中,2 条实线为左旋圆极化轨迹,虚线为右旋圆极化轨迹;然后以此曲线为基础,在五边形上找到阻抗为 50  $\Omega$  的圆极化馈电点。

在实际设计中,可根据图 2 中给出的馈电点变化轨迹进行优化,首先根据图 2 选择一个初始点,通过改变坐标变量的取值范围,实现大范围的扫描,通过扫描找到一些阻抗值接近匹配值的点,然后取某个结果较好的点,在小范围内优化,从而找到较好的匹配点。但这些匹配点不一定能实现圆极化,此时可根据经验多试几次,同时细微地调节五边形的形状,找到可以实现圆极化的匹配点,将其作为馈电点;然后再在该点进行优化,从而得到带宽比较宽,同时又能实现匹配的馈电点。经过实验得到的天线如图 3 所示。馈电点的坐标设为原点(0,0),五边形的各顶点坐标如下(单位, mm):  $A(-11.66, -7.04)$ ,  $B(1.01, -7.04)$ ,  $C(7.75, 2.96)$ ,  $D(-7.04, 12.62)$ ,  $E(-11.67, 9.77)$ 。

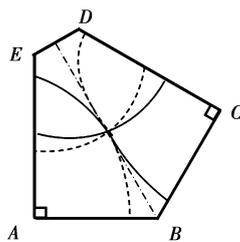


图 2 馈电点轨迹

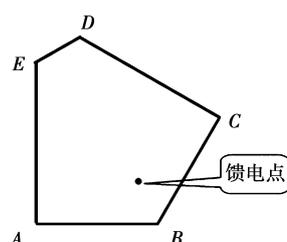


图 3 馈电点位置

用 HFSS 优化后得到如图 4 所示的仿真结果。

由图 4 可以看出天线达到如下指标:

- 1) 反射系数 -15 dB 时的带宽为 5.91%; 反射系数 -20 dB 时的带宽为 4.2%。
- 2) 轴比低于 3 dB 的角度范围为  $-70^\circ \sim 90^\circ$ 。

3) 增益,在中心频率为 5.6 GHz 时达 8.0 dB。

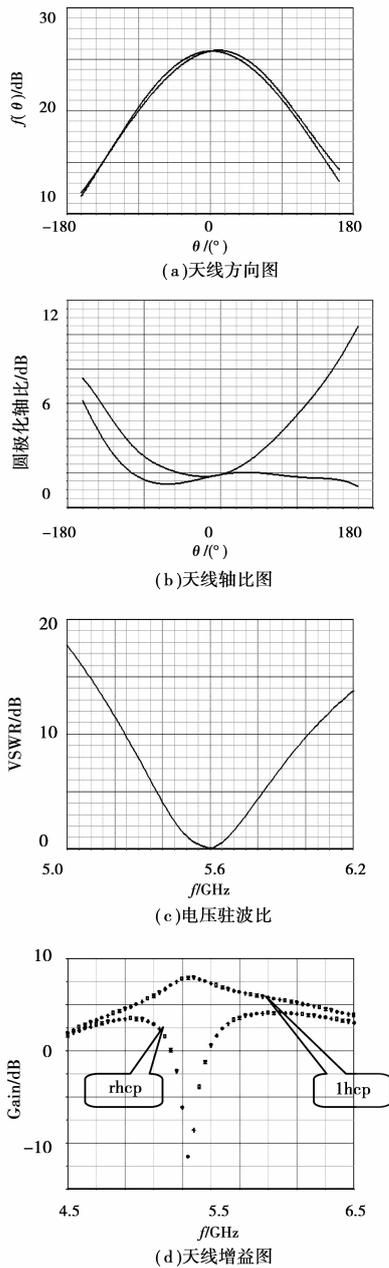


图 4 仿真结果

### 4 实际测量

根据最后优化仿真的具体参数,采用基板厚度为 2 mm、介电常数为 2.08 的特氟隆材料加工天线。用安利 MS4624D 矢量网络分析仪对天线测量,实测环境如图 5 所示。

测量结果见图 6。

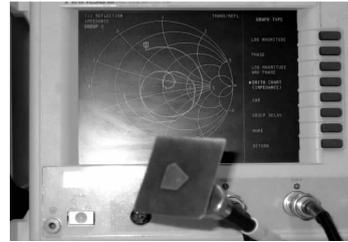
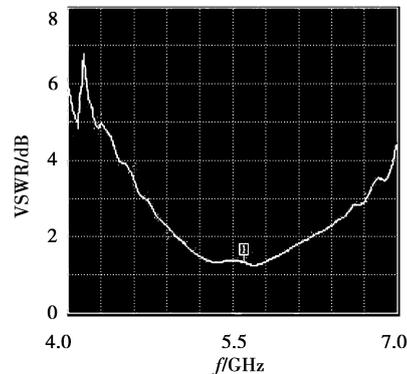
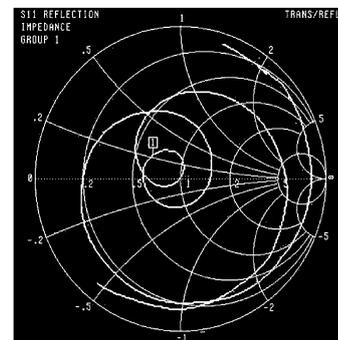


图 5 实测环境



(a) 实测电压驻波比



(b) 实测阻抗匹配图

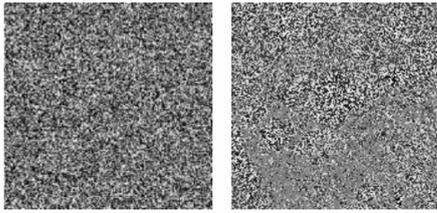
图 6 实测结果

如图 6 所示,天线在中心频点 5.6 GHz 实现很好的匹配,同时从驻波比曲线图可以看出, VSWR < 3 dB 的带宽为 6.1%, 实测结果和仿真结果吻合良好。这也说明了设计的正确性,验证了其良好的可实现性。

### 5 结论

笔者研究了一种中心频率为 5.6 GHz 的单点馈电五边形贴片圆极化微带天线,采用轨迹法解决了馈电点选择的难题,通过仿真和实做,验证了设计的正确性。该天线圆极化特性及匹配特性良好,带宽较宽,增益达 8 dB,可直接用于工程实践并可以推广到天线阵中。

(下转第 56 页)



(a)用 $\mu$ ,  $x_0$ 和 $K'$ 解密图象 (b)用 $\mu$ ,  $x'_0$ 和 $K'$ 解密图象

图 4 密钥敏感性测试

持了密钥敏感性。同时,我们在实验中也发现,两个只有 $2^{-15}$ 微小差异的初值 $x_0$ 和 $x'_0$ ,按照构造的双射映射也几乎完全不同。

## 4 结 论

文中提出了一种新的基于混沌映射和代数群上运算的密码系统。在这个新的密码系统中,每个 128 比特的明文块产生一个同样长度的密文块,同时密文也依赖于明文、密钥、混沌映射和群上的运算。该算法弥补了纯混沌密码系统的一些缺陷。另外,大的密钥空间、比特位的替换与移位和基于密钥的子块排列变换都大大增强了算法的各种抗攻击能力。当然,该算法在某些性能方面还不能和 AES 相比,但它提供了一种结合混沌映射和代数群运算来构造密码系统的新思路。对于该算法,我们接下来的工作将是进一步对它进行各种密码分析找出其可能存在的某些缺陷,同时进一步改善其加/解密速度。

### 参考文献:

- [1] WHEELER D D. Problems with chaotic cryptosystems [J]. Cryptologia 1989, 8(3): 243-250.
- [2] WHEELER D D, MATHEWS R A J. Supercomputer investigations of a chaotic encryption algorithm [J]. Cryptologia 1991, 15(2): 140-152.
- [3] WEI J, LIAO X F, WONG K W, et al. A new chaotic

- cryptosystem [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2006, 30: 1143-1152.
- [4] XUN Y, CHIK H T, and CHEE K S. A new block cipher based on chaotic tent maps [J]. IEEE Trans. Circuits and Systems, 2002; 49(12): 1826-1829.
- [5] KOHDA T, TSUNEDA A. Statistics of chaotic binary sequences [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1997, 43: 104.
- [6] GOLDBERG D, PRIEST D. What every computer scientist should know about floating-point arithmetic [J]. ACM Comp. Surv, 1991, 23(1): 5-48.
- [7] YANG H. A new block cipher based on chaotic map and group theory [J]. Chaos, Solitons & Fractals 2007, (10):1016.
- [8] TANG G, LIAO X F. A method for designing dynamical S-boxes based on discretized chaotic map [J]. Chaos, Solitons & Fractals 2005,23, 1901-1909.
- [9] JAKIMOSKI G, KOCAREV L. Chaos and cryptography: block encryption ciphers based on chaotic maps [J]. IEEE Trans. Circuits Syst I 2001, 48(2): 163-169.
- [10] STOJANOVSKI T, KOCAREV L. Chaos-based random number generators—part I: analysis [J]. IEEE Trans. Circuits Syst I 2001, 48(3): 281-288.
- [11] STOJANOVSKI T, KOCAREV L. Chaos-based random number generators—part II: practical realization [J]. IEEE Trans. Circuits Syst I 2001, 48(3): 382-385.
- [12] LI S J, LI Q, LI W, et al. Statistical properties of digital piecewise linear chaotic maps and their roles in cryptography and pseudo-random coding [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2001.
- [13] LI S, MOU X Q and CAI Y L. Pseudo-random bit generator based on couple chaotic systems and its applications in stream-cipher cryptography [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2001, 2247: 316-329.
- [14] FRIDRICH J, Symmetric ciphers based on two-dimensional chaotic maps [J]. Int. J. Bifurcat Chaos 1998, 8(6):1259-84.
- [15] KNUTH D E. The Art of Computer Programming [M]. 3<sup>rd</sup>. MA: Addison Wesley, 1998.

(编辑 吕建斌)

(上接第 51 页)

### 参考文献:

- [1] 薛睿峰,钟顺时. 微带天线圆极化技术概述与进展[J]. 电波科学学报,2002,17(4):331-336.  
XUE RUI-FENG,ZHONG SHUN-SHI. Survey and progress in circular polarization technology of microstri Pantennas [J]. Chinese Journal of Radio Science,2002, 17(4):331-336.
- [2] 韩庆文,易念学,李忠诚,等. 圆极化微带天线的设计与实现[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2004;27(4):57-60.  
HAN QING-WEN, YI NIAN-XUE, LI ZHONG-CHENG, et al. Design and realization of circular polarization microstrip antenna [J]. Journal of Chongqing University;
- Natural Science Edition,2004,27(4):57-60.
- [3] 鲍尔 I J,布哈蒂亚 P. 微带天线[M]. 梁联倬,寇廷耀,译. 北京:电子工业出版社,1984.
- [4] 张 钧,刘克诚. 微带天线理论与工程[M]. 北京:国防工业出版社,1988.
- [5] 林昌禄,聂在平. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [6] DAVID M POZAR. Microwave engineering [M]. 3rd ed. Beijing:Electronic Industry Press,2005.

(编辑 张 苹)