

Ka 波段圆极化微带相控阵列天线设计

叶喜红

(天津理工大学中环信息学院电子信息工程系, 天津 300380)

xihongye@yeah.net

摘要 本文利用 Ansys HFSS 软件在 Ka 波段优化设计方形切角圆极化微带天线单元, 仿真结果表明该天线结构具有良好的圆极化工作特性。通过采用正三角形布阵方式, 将 37 个相同尺寸的该天线结构布置成圆形阵列, 并控制各阵元的馈电相位, 使该阵列在空间范围内可进行二维扫描, 且具有较好的圆极化特性。

关键词 微带阵列天线, 相控阵列天线, 圆极化阵列天线

Design of a Ka Band Circularly Polarized Microstrip Phased Array

YE Xihong

(School of Electronics and Information Engineering, Zhonghuan Information College Tianjin University of Technology, Tianjin 300380)

Abstract: In this paper, a corner cutting square patch circularly polarized microstrip antenna is designed in Ka band with the help of Ansys HFSS simulator, and the simulated results show that it has good characteristics. 37 antenna-cases with same size arranged in a circular array by using regular triangle arrangement manner, and the feeding phase of each element is controlled, so that the array with good circular polarization characteristics can be two-dimensional scanning.

Keywords: Microstrip Array; Phased Array; Circularly Polarized Array

1 引言

圆极化天线可以有效减小雨雾等自然气候的影响、抑制多径效应, 能更好地保证无线通信链路的畅通。微带天线具有体积小、重量轻、结构简单、易加工等优点, 但也存在着带宽窄、增益低的缺陷^[1-3]。利用阵列天线结构可以有效地提高增益, 并在一定程度上展宽天线带宽。

通过控制阵列中天线的射单元的馈电相位来控制 and 改变辐射波束的形状和指向, 以达到波束扫描的目的。利用相位控制的方法, 克服了用机械方法旋转天线时惯性大、速度慢的缺点, 相控阵天线的波束扫描速度快、相位变化速度快, 使得天线波束变化快捷, 这是相控阵天线的最大特点。

本文利用 Ansys HFSS 软件, 通过精确建模和仿真优化, 首先在 Ka 波段完成单馈圆极化微带天线单元的设计。而后, 根据应

用需求, 通过合理的排列, 研究设计了包含 37 个天线单元的圆极化微带相控阵列结构。该阵列天线结构在足够宽的频带内具有较大的增益和轴比特性, 以及在较宽的空间范围内具有良好的波束扫描特性。

2 天线单元设计

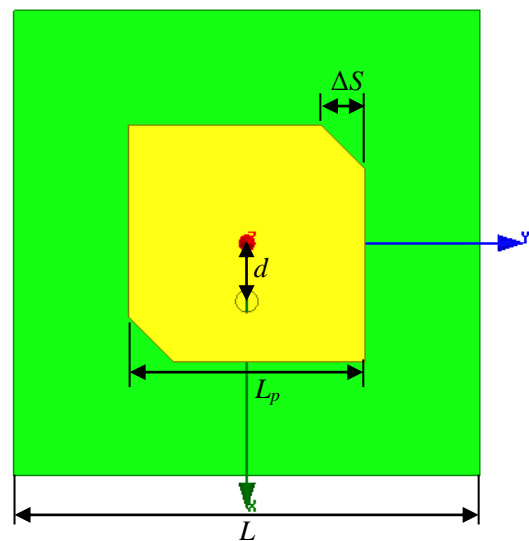


图 1 圆极化微带天线单元结构

如图 1 所示, 为圆极化微带天线单元的结构图, 选用介电常数为 2.2、厚度为 0.508mm 的材料作为天线的介质板, 天线单元横向尺寸 $L=8\text{mm}$ 。方形贴片大小 $L_p=4.06\text{mm}$, 两个切角 $\Delta S=0.75\text{mm}$, 利用同轴探针馈电, 馈电位置沿 x 轴方向距离贴片中心 $d=1\text{mm}$ 。通过 Ansys HFSS 建模仿真, 得到天线主要工作特性如下:

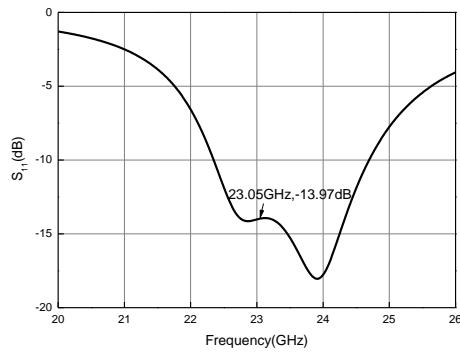


图 2 天线单元反射系数

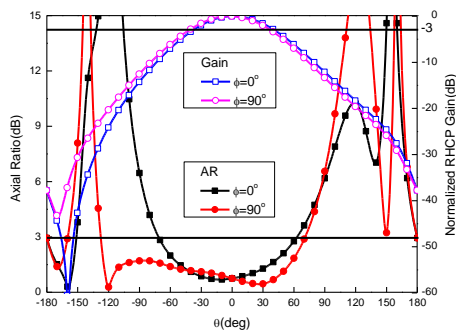
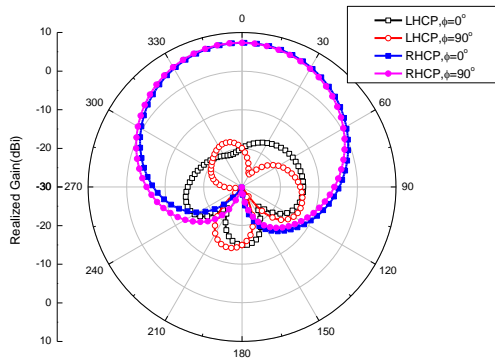


图 3 天线单元中心频率空间辐射

如图 2 和图 3 可以看到, 天线在中心频率附近相当宽的频带内具有很好的阻抗匹配, 而且在空间具有良好的圆极化辐射特性。天线 3dB 增益波束宽度约为 80° 、3dB

轴比波束范围约为 120° 。

根据天线单元的工作特性, 我们期望通过合理的布阵方式, 通过控制各阵元的激励相位, 使天线阵列可以在水平面 $\varphi \in (0^\circ \sim 360^\circ)$ 和俯仰面 $\theta \in (0^\circ \sim 60^\circ)$ 进行二维波束扫描, 并且能在要求的空间范围内均有良好的圆极化辐射。

3 相控阵列设计

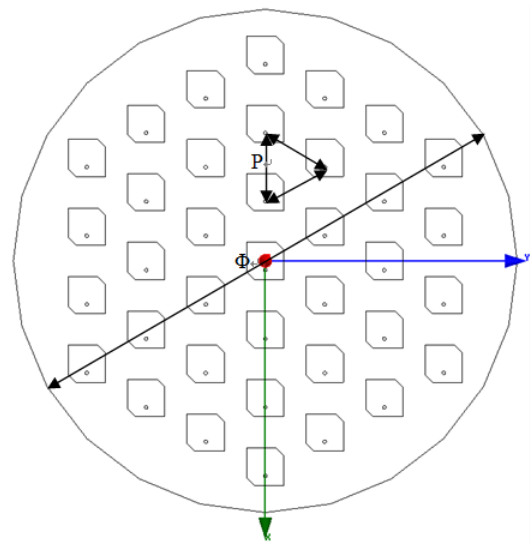


图 4 天线阵列结构

图 4 为 37 个天线单元按三角形方式进行排列的天线阵列结构, 各阵元中心距离为 $P=6.5\text{mm}$, 圆形地板直径 $\Phi=47\text{mm}$ 。因为天线阵元之间互耦的影响, 对天线的尺寸需要进行适当的优化。此时, 具体尺寸的优化值为: 贴片大小 $L_p=4.0\text{mm}$ 、切角 $\Delta S=0.92\text{mm}$, 馈电位置距离贴片中心 $d=1.2\text{mm}$ 。

3.1 阵列未扫描

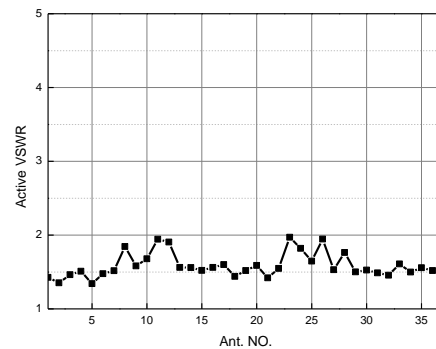


图 5 中心频率各阵元有源驻波比

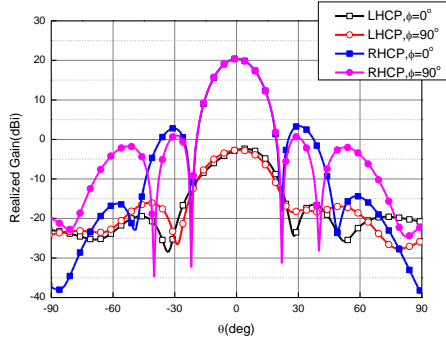


图 6 未扫描时中心频率天线阵列空间辐射

由图 5 和图 6 可见，天线阵列在中心频率具有良好的阻抗匹配和圆极化辐射特性，各阵元的有源驻波比 $VSWR < 2$ 、阵列天顶主极化增益 $G > 20\text{dBi}$ 、轴比 $AR < 3\text{dB}$ 。

3.2 在 $\varphi=90^\circ$ 面内扫描

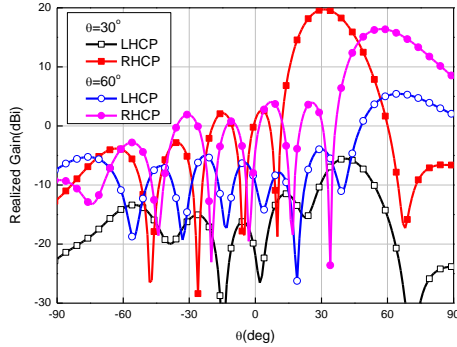


图 7 中心频率阵列在 $\varphi=90^\circ$ 面内扫描特性

通过控制天线阵列各阵元馈电端口的激励相位，使其在 $\varphi=90^\circ$ 面内在 $\theta \in (0^\circ \sim 60^\circ)$ 范围内进行波束扫描。图 7 是阵列预扫描到 $\theta=30^\circ$ 和 $\theta=60^\circ$ 时的空间辐射特性，由图可见，随扫描角度 θ 增大，主波束增益减小、对应的轴比增大，但仍具有较好的圆极化辐射特性。

4 扫描精度分析

4.1 扫描精度理论分析

相控阵列中，若要阵列扫描至角度 (θ, φ) ，那么若设编号为 (i, j) 的天线单元理论上需要的相位为 $\Psi_{ij}(\theta, \varphi)$ ，则

$$\Psi_{ij}(\theta, \varphi) = i\Delta\Psi_x + j\Delta\Psi_y \quad (1)$$

其中，

$$\begin{cases} \Delta\Psi_x = -\frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin\theta \cos\varphi \\ \Delta\Psi_y = -\frac{2\pi}{\lambda} d_y \sin\theta \sin\varphi \end{cases} \quad (2)$$

若设移相器为 K 位，则相位步进 $\Delta\bar{\Psi}$ 为

$$\Delta\bar{\Psi} = \frac{2\pi}{2^K} \quad (3)$$

那么对任意 $\Psi_{ij}(\theta, \varphi)$ 值，必有

$$n\Delta\bar{\Psi} \leq \Psi_{ij}(\theta, \varphi) \leq (n+1)\Delta\bar{\Psi} \quad (4)$$

其中 n 为整数。

而相位经移相器量化后， (i, j) 天线单元的实际相位值应为 $\bar{\Psi}_{ij}(\theta, \varphi)$ ，且必有

$$\bar{\Psi}_{ij}(\theta, \varphi) = m\Delta\bar{\Psi} \quad (5)$$

由(4)式可知，

$$n \leq \frac{\Psi_{ij}(\theta, \varphi)}{\Delta\bar{\Psi}} \leq (n+1) \quad (6)$$

因此，若

$$\text{case1: } 0 \leq \frac{\Psi_{ij}(\theta, \varphi)}{\Delta\bar{\Psi}} - n \leq \frac{1}{2}, \text{ 则有}$$

$$\frac{1}{2} \leq n+1 - \left\lceil \frac{\Psi_{ij}(\theta, \varphi)}{\Delta\bar{\Psi}} \right\rceil = 1 - \left\lceil \frac{\Psi_{ij}(\theta, \varphi)}{\Delta\bar{\Psi}} - n \right\rceil \leq 1$$

那么，此时 m 应取值为 n 才能使得精度最好，即： $m=n$

$$\text{因此， } 0 \leq \Psi_{ij}(\theta, \varphi) - n\Delta\bar{\Psi} \leq \frac{1}{2}\Delta\bar{\Psi}$$

亦即：

$$0 \leq \Psi_{ij}(\theta, \varphi) - m\Delta\bar{\Psi} = \Psi_{ij}(\theta, \varphi) - \bar{\Psi}_{ij}(\theta, \varphi) \leq \frac{1}{2}\Delta\bar{\Psi}$$

$$\text{所以， } |\Psi_{ij}(\theta, \varphi) - \bar{\Psi}_{ij}(\theta, \varphi)| \leq \frac{1}{2}\Delta\bar{\Psi}$$

case2: $\frac{\Psi_{ij}(\theta, \varphi)}{\Delta\bar{\Psi}} - n > \frac{1}{2}$, 则有

$$0 \leq n+1 - \left\lfloor \frac{\Psi_{ij}(\theta, \varphi)}{\Delta\bar{\Psi}} \right\rfloor = 1 - \left[\frac{\Psi_{ij}(\theta, \varphi)}{\Delta\bar{\Psi}} - n \right] < \frac{1}{2}$$

那么, 此时 m 应取值为 $n+1$ 才能使得精度最好, 即: $m=n+1$

因此,

$$0 \leq n+1 - \left\lfloor \frac{\Psi_{ij}(\theta, \varphi)}{\Delta\bar{\Psi}} \right\rfloor = m - \frac{\Psi_{ij}(\theta, \varphi)}{\Delta\bar{\Psi}} < \frac{1}{2}$$

亦即:

$$0 \leq m\Delta\bar{\Psi} - \Psi_{ij}(\theta, \varphi) = \bar{\Psi}_{ij}(\theta, \varphi) - \Psi_{ij}(\theta, \varphi) < \frac{1}{2}\Delta\bar{\Psi}$$

$$\text{所以, } \left| \Psi_{ij}(\theta, \varphi) - \bar{\Psi}_{ij}(\theta, \varphi) \right| < \frac{1}{2}\Delta\bar{\Psi}$$

综上所述, 单元的理想相位与量化相位的误差绝对值总是不超过相位步进的一半。

即:

$$\left| \Psi_{ij}(\theta, \varphi) - \bar{\Psi}_{ij}(\theta, \varphi) \right| \leq \frac{1}{2} \Delta\bar{\Psi} \quad (7)$$

因此, 估计移相器最少位数的步骤如下:

1) 对于固定的期望扫描角度 (θ, φ) , 给出实际计算得到所需的相位值 $\Psi_{ij}(\theta, \varphi)$;

2) 若要求的扫描精度为 Δ , 那么对于位于精度范围内的角度 $(\theta \pm \Delta, \varphi \pm \Delta)$, 再次计算出实际所需的相位值 $\Psi_{ij}^k(\theta, \varphi)$;

$$3) \text{ 计算 } \Delta\Psi_{\max} = \left| \Psi_{ij}(\theta, \varphi) - \Psi_{ij}^k(\theta, \varphi) \right|;$$

$$4) \text{ 取 } \Delta\bar{\Psi} = 2\Delta\Psi_{\max};$$

5) 根据(3)式计算移相器位数

$$K = \log_2 \frac{2\pi}{\Delta\bar{\Psi}}.$$

4.2 相控阵列扫描精度分析

要求: 若本设计所要求的扫描精度不小于阵列波束 3dB 波束宽度 1/8。

仿真:

由 37 个天线单元组阵后阵列不扫描时

的 3dB 波束宽度为 18° , 所以扫描精度为 2.25° 。阵列扫描时相邻单元相位差表达式为

$$\begin{cases} \Delta\Psi_x = -\frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin\Theta \cos\varphi \\ \Delta\Psi_y = -\frac{2\pi}{\lambda} d_y \sin\Theta \sin\varphi \end{cases}$$

$$\Delta\Psi = i\Delta\Psi_x + j\Psi\varphi_y$$

$\varphi=90^\circ$ 平面内对 Θ 赋不同值时阵列在俯仰面内进行扫描, 当波束指向在阵列天顶时所要求的扫描精度最高, 所以当对 Θ 赋值 $\pm 2.25^\circ$ 使波束指向在 $\theta=\pm 2.25^\circ$ 时对应的 $\Delta\Psi=\pm 6.12^\circ$ 。

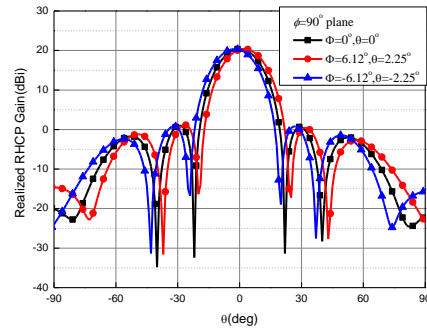
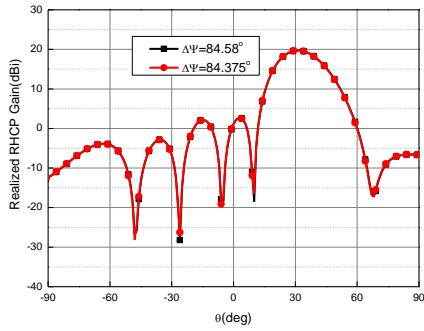


图 8 不同 Θ 赋值时阵列扫描特性

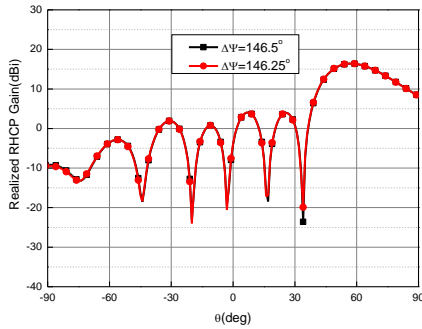
由仿真结果可见, 阵列扫描到天顶附近时在要求扫描精度内波束指向应该在 $\pm 2.25^\circ$ 范围以内, 给馈电网络 $\Delta\Psi$ 赋值步进在 $\varphi=90^\circ$ 平面内 $\leq 6.12^\circ$ 。

假设采用 M 位的移相器控制阵列馈电网络的相位, 则相位改变步进为 $\Delta\Phi=360^\circ/2^M \leq 6.12^\circ$; 所以 $M \geq 5.88$, 即移相器至少需要 6 位。

当采用 6 位移相器时, $\Delta\Phi=5.625^\circ$ 。阵列在 $\varphi=90^\circ$ 平面内扫描时通过 HFSS 仿真优化, 当 $\Theta=70^\circ$, $\Delta\Psi=146.5^\circ$ 时波束指向在 $\theta=60^\circ$ 附近; 当 $\Theta=35^\circ$, $\Delta\Psi=84.58^\circ$ 时波束指向在 $\theta=30^\circ$ 附近。通过 $\Delta\Psi/\Delta\Phi$ 可计算得到阵列扫描波束指向在 30° 和 60° 附近时馈电网络中移相器的加权系数分别为 15.04 和 26.04, 所以阵列实际馈电时的相位分别为 $15 \times \Delta\Phi$ 和 $26 \times \Delta\Phi$, 即 84.375° 和 146.25° 。其仿真结果如下:



(a) 波束指向 30° 附近



(b) 波束指向 60° 附近

图 9 阵列方向图

由图 9 可见， $\Delta\Psi=84.58^\circ$ 时阵列方向图和 $\Delta\Psi=84.375^\circ$ 时方向图（预扫描 30° ）以及 $\Delta\Psi=146.25^\circ$ 时阵列方向图和 $\Delta\Psi=146.5^\circ$ 时方向图（预扫描 60° ）几乎重合，能够保证足够的扫描精度。

当移相器所有相位位置零时，阵列不扫描，如上所述，其辐射方向图半功率波束宽度的 $1/8$ 为 2.25° ，所以为了保证要求的扫描精度则阵列扫描下个角度必须在 $\theta \leq 2.25^\circ$ 范围以内。在 6 位移相器最小相位变化为 5.625° ，我们在 HFSS 中对阵元馈电相位进行设置 $\Delta\Psi=5.625^\circ$ ，得到仿真结果如下：

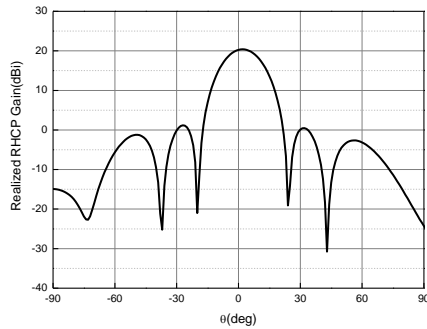


图 10 $\Delta\Psi=5.625^\circ$ 阵列方向图

由图 10 可见，当 $\Delta\Psi=5.625^\circ$ 时，阵列波束指向在 $\theta=2 \approx 2.25^\circ$ 。所以在阵列天顶处附近 6 位移相器也能保证足够扫描精度。

5 结论

本文在 Ka 波段设计了一个常规结构的圆极化微带天线，并利用 37 个具有相同形式和尺寸的天线单元进行合理排列，设计出在水平面和俯仰面可以进行二维扫描的相控阵列天线。通过分析发现，该阵列天线利用 6 位移相器即可满足足够的扫描精度要求。阵列在俯仰面 $\theta \in (0^\circ \sim 60^\circ)$ 内进行相位扫描时，能保证其具有足够大的增益和较好的轴比，呈现出良好的圆极化辐射特性。

参考文献

- 1 H. Legay, L. Shafai. New stacked microstrip antenna with large bandwidth and high gain[J]. IEE Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation, 1994, 141(3):199-204.
- 2 David M. Pozar, Scanning characteristics of infinite arrays of printed antenna subarrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1992, 40(6):666-674.
- 3 宋长宏, 吴群, 张文静, 陆志勇. 一种宽带宽角扫描相控阵天线的设计[J]. 电波科学学报, 2013, 28(6):1127-1132.