

文章编号: 1001-2486 (2002) 02-0106-05

伏拉索夫模式变换器数值计算*

袁成卫, 凌根深

(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 为给伏拉索夫 (Vlasov) 模式变换器的设计提供一种理论计算的方法, 通过建立模型, 利用矢量绕射理论经多步计算获得了 Vlasov 辐射器的辐射场, 并进一步计算了该辐射场经抛物柱面反射后的场分布。数值计算与实验结果吻合良好, 可作为 Vlasov 模式变换器设计和分析的工具。

关键词: Vlasov; 模式变换器; 高功率微波

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A

Numerical Calculation of Vlasov-type Mode Convertor

YUAN Cheng-wei, LING Gen-shen

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to find a calculation method for the design of Vlasov - type mode convertor, the electromagnetic radiation field of Vlasov radiator is calculated with vector diffraction theory by constructing a proper model, and the field scattered by reflector is also calculated. Numerical far - field radiation patterns accord basically with the measured results, which shows that it is useful for the design and analysis of Vlasov - type mode convertor.

Key words: Vlasov; mode convertor; HPM

虚阴极振荡器、相对论返波管、回旋管等许多高功率微波源的输出都是圆波导轴对称模, 这种模式无确定的极化方向, 并且其轴向辐射呈不理想的空心圆锥状。这样的模式若直接激励天线作为输出, 将会有旁瓣电平高、能量分散、增益低等问题。为了获得高方向性的天线发射, 必须通过波导模式变换器将其变换为易于空间发射的 TE_{11} 或 HE_{11} 模, 或通过 Vlasov 模式变换器变为自由空间线极化的准高斯波束^[1]。相对波导模式变换器而言, Vlasov 模式变换器具有结构简单、功率容量高的特点。

为了将圆波导中轴对称的 TM 或 TE 模变为易于空间定向发射的模式, Vlasov 等人提出一种圆波导阶梯形端口辐射器, 利用其非对称结构将圆波导中的轴对称模辐射为有一定方向性的空间辐射场, 再经抛物柱面反射形成线极化的准高斯束, 结构见图 1, 称为 Vlasov 模式变换器^[1]。本文运用矢量绕射理论对 Vlasov 模式变换器的辐射场进行了数值计算。

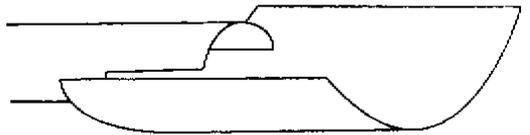


图 1 Vlasov 模式变换器

Fig.1 Vlasov - type mode convertor

1 数值计算方法

1.1 Vlasov 辐射器的数值计算

应用于轴对称模式的 Vlasov 辐射器有如图 2 所示的两种形式: 其中图 2(a) 为阶梯形辐射器, 图 2(b) 为斜切形辐射器。阶梯形辐射器增益可稍高于斜切形辐射器^[2], 但因为有一个突变的切割面, 用于功率较高场合时会由于场的局部集中而造成击穿。

数值求解斜切形辐射器辐射场的基本思路是: 将斜切形辐射器看做是由如图 3 所示的两部分构

* 收稿日期: 2002-09-11
基金项目: 国家 863 项目资助 (863-410-7)
作者简介: 袁成卫 (1974-), 男, 硕士生。

成：开口圆波导 I 和劈形段 II，将 II 看做 I 的辐射场中的散射体。由矢量绕射理论可求得开口圆波导 I 的辐射场和 II 的散射场；则斜劈口径面 III 上的场可由 I 的辐射场和 II 的散射场叠加求出；从而辐射器的辐射场可由斜劈口径面 III 上的场通过 Kirchhoff 积分求出。



图2 Vlasov 辐射器结构图

Fig.2 The configuration of Vlasov - type mode convertor

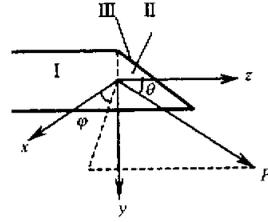


图3 斜切形 Vlasov 辐射器辐射计算示意图

Fig.3 The radiation calculation of level - cut Vlasov radiator

设半径为 a 的开口圆波导内传输 TM_{01} 模，在端口上横向场可由下式表示：

$$\begin{cases} E_r = (1 + \Gamma)E_0 \frac{\beta}{k_c} J_1(k_c \rho) \\ H_\phi = (1 - \Gamma)E_0 \frac{\omega\epsilon}{k} J_1(k_c \rho) \end{cases} \quad (1)$$

$J_1(k_c \rho)$ 为一阶 Bessel 函数， k_c 为截至波数， $\beta = \sqrt{k_0^2 - k_c^2}$ ， $k_0 = 2\pi/\lambda$ ， λ 为自由空间波长， Γ 为波导口的反射系数。忽略波导外壁电流^[3]和反射，应用 Kirchhoff 积分可求得开口圆波导的辐射场：

$$\begin{cases} \mathbf{H}_1 = -\frac{1}{4\pi j\omega\mu} \iint_{s_1} [k_c^2 (\mathbf{n} \times \mathbf{E})\psi + (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) \cdot \nabla \nabla \psi - j\omega\mu (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) \times \nabla \psi] ds \\ \mathbf{E}_1 = -\frac{1}{4\pi j\omega\epsilon} \iint_{s_1} [k_c^2 (\mathbf{n} \times \mathbf{H})\psi + (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) \cdot \nabla \nabla \psi + j\omega\epsilon (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) \times \nabla \psi] ds \end{cases} \quad (2)$$

其中 \mathbf{H} 和 \mathbf{E} 表示开口圆波导口径面上的电磁场， s_1 是波导口径面， \mathbf{n} 是波导口径面的法线方向， $\psi = e^{-jk_0 r}/r$ ， r 是波导口径面上一点到所求空间点 P 的距离。 \mathbf{H}_1 和 \mathbf{E}_1 分别表示由开口圆波导辐射的磁场强度和电场强度。忽略斜劈段外表面面电流^[3]，则由劈形段散射的电磁场可表示为：

$$\begin{cases} \mathbf{H}_2 = \frac{1}{2\pi} \iint_{s_2} [(\mathbf{n} \times \mathbf{H}_1) \times \nabla \psi] ds \\ \mathbf{E}_2 = \frac{1}{2\pi j\omega\epsilon} \iint_{s_2} [k_c^2 (\mathbf{n} \times \mathbf{H}_1)\psi + (\mathbf{n} \times \mathbf{H}_1) \cdot \nabla \nabla \psi] ds \end{cases} \quad (3)$$

其中 s_2 表示对劈形段的内表面积分， \mathbf{n} 是内表面的法向分量。斜切形口径面上的电磁场：

$$\begin{cases} \mathbf{H}_3 = \mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_2 \\ \mathbf{E}_3 = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 \end{cases} \quad (4)$$

由斜劈口径面上的电磁场，与 (2) 式类似通过 Kirchhoff 积分可求得 Vlasov 辐射器空间外任意一点的场 \mathbf{E}_4 和 \mathbf{H}_4 。对于阶梯形 Vlasov 辐射器，考虑到其结构特点，可以直接由开口圆波导的辐射场与切割段的散射场的叠加来求空间辐射场。

1.2 反射面的数值计算

Vlasov 辐射器辐射在空间仍然是发散的。为了使其更利于在空间的远距离传播，通常要把波束经过反射面汇聚，使波束变窄。反射面的散射场仍可由 Kirchhoff 积分求出：

$$\begin{cases} H_5 = \frac{1}{2\pi} \iint_{s_5} [(n \times H_4) \times \nabla \psi] ds \\ E_5 = \frac{1}{2\pi j\omega\epsilon} \iint_{s_5} [k_0^2 (n \times H_4) \psi + (n \times H_4) \cdot \nabla \nabla \psi] ds \end{cases} \quad (5)$$

其中 H_4 是入射到反射面上的磁场, s_5 表示对反射面的积分。事实上单求出 (5) 式中任何一个量即可, 因为在远场区存在如下关系:

$$E = -Z_0 \cdot (r \times H) \quad (6)$$

其中 Z_0 表示自由空间波阻抗, r 表示波传播方向上的单位矢量。

1.3 辐射功率密度和增益

远场空间任一点的辐射功率密度为

$$P = \frac{Z_0}{2} |H_5|^2 \quad (7)$$

辐射场总功率为

$$P_{total} = \iint_s P \cdot ds \quad (8)$$

式中积分是对位于斜劈口径面所在平面上方的一个半径为 R 的球冠积分。绝对增益为

$$G = 101 g \left(\frac{4\pi R^2 P}{P_{total}} \right) \quad (9)$$

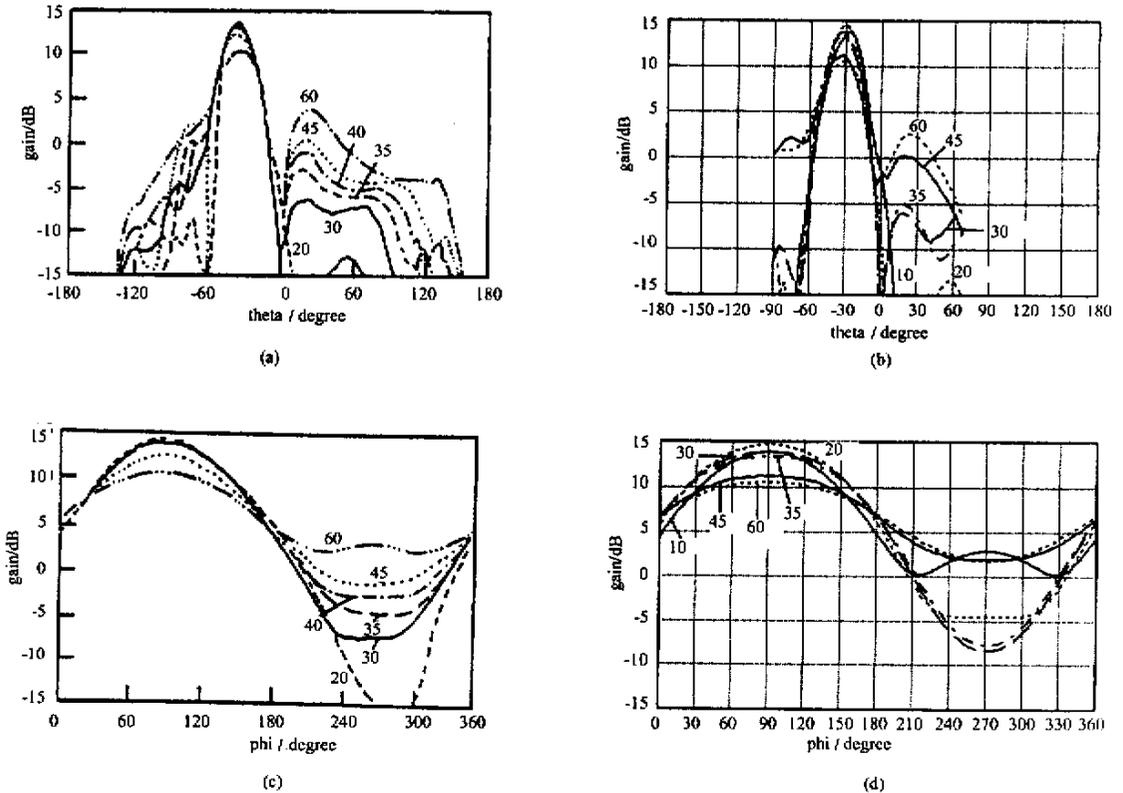


图 4 不同斜切角的辐射器的辐射场的数值计算结果与文献 [4] 中实验结果比较

(a) 在 $\phi = 90^\circ$ 平面上的实测方向图

(b) 在 $\phi = 90^\circ$ 平面上的数值计算方向图

(c) 在最大增益 θ 锥面上的实测方向图

(d) 在最大增益 θ 锥面上的数值计算方向图

Fig.4 The compare of numerical results and experimental results in ref. [4] about bevel-cut radiator radiation

2 数值计算结果

2.1 Vlasov 辐射器的数值计算结果

为了验证上述数值计算的可靠性，通过编程以文献 [4] 给出的参数进行了计算。图 4 (a) (c) 为文献 [4] 给出的实验测试曲线，对应的辐射器半径为 $a = 2.38\text{cm}$ ，频率 $f = 8.6\text{GHz}$ ，模式为 TM_{01} 模。图 4 (b) (d) 是数值计算结果。本文除了对文献 [4] 中的一些情况进行了计算之外，还特意计算了当斜切角为 10° 时的辐射情况。比较可知，数值计算结果在主瓣上与实测数据吻合良好，近旁瓣也基本一致。

2.2 抛物反射面的数值计算结果

图 5 (a) (c) 是文献 [4] 中给出的 30° 斜切角的 Vlasov 辐射器加一抛物柱面之后的实验测试曲线。由于缺乏实验所用抛物柱面的具体参数，本文以焦距 4.76cm 、长 23.7cm 、宽 9.52cm 的抛物柱面进行计算，图 5 (b) (d) 是计算结果。由于所选参数可能与实验不同，数值计算结果与实验测量有一定出入。但可以得到类似的结果，如增益增大到 20dB ，波束变窄等。

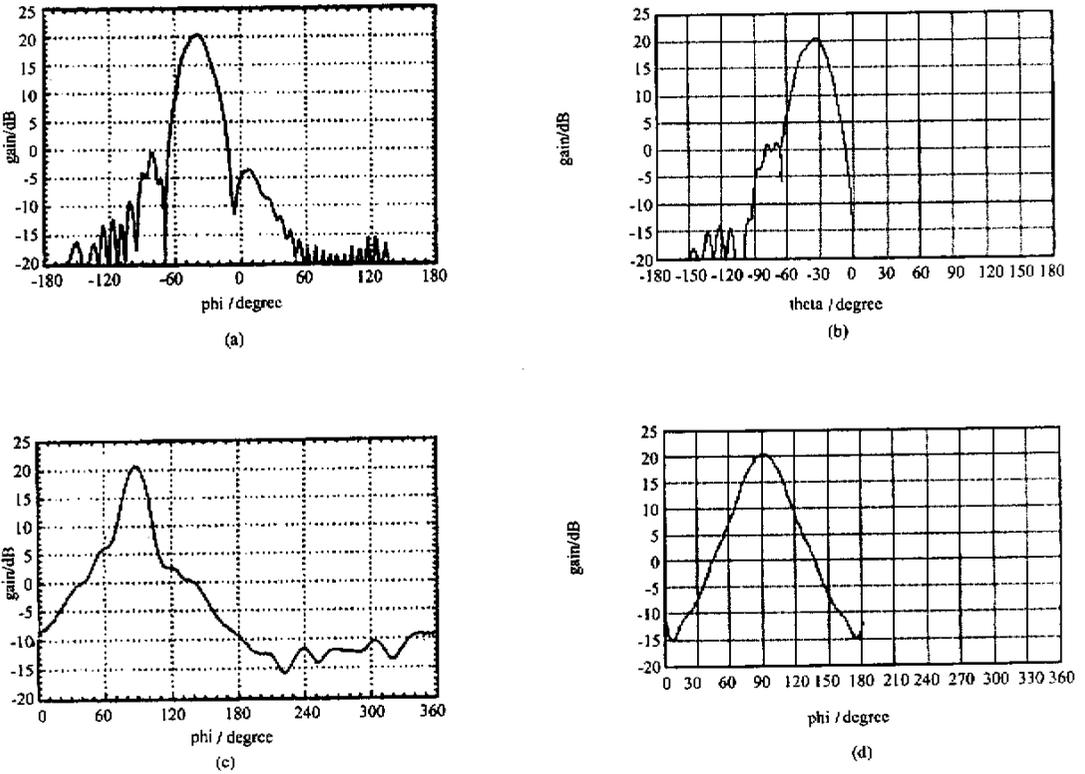


图 5 反射面散射场的数值计算结果与文献 [4] 中实验结果比较

- (a) 在 $\phi = 90^\circ$ 平面上的实测方向图 (b) 在 $\phi = 90^\circ$ 平面上的数值计算方向图
(c) 在 $\theta = 40^\circ$ 锥面上的实测方向图 (d) 在 $\theta = 40^\circ$ 锥面上的数值计算方向图

Fig. 5 The compare of numerical results and experimental results in ref. [4] about reflector radiation

3 结论和分析

(1) 从数值计算和实验结果比较可知，数值计算在主瓣方向上与实测数据吻合良好，辐射器的近旁瓣的大小和方向也与实验结果类似，有一定的参考价值。因此用此算法进行数值计算是可行的。

(2) 在 $20^\circ \sim 60^\circ$ 范围内斜切形 Vlasov 辐射器的斜切角越小，主瓣的增益越大，但小到一定程度之

后增益不会有明显变化,如 35° 、 30° 和 20° 在主瓣方向上增益相差很小。值得注意的是当斜切角降低为 10° 时,增益反而降低,其原因为角度过小时,斜劈拉长,电磁波在较长的区域内才能完全辐射出来,因而增益降低。因此斜切角的选定有一个最佳值,该值会随模式、频率、波长的不同而有所不同。另外,若斜切角太小,斜劈变得尖锐,易引起高功率微波的局部击穿。

(3) 计算结果表明,经抛物柱面反射之后,基本上已经形成线极化的、截面近似呈高斯分布的高增益波束。图6还表明抛物柱面仅能使波束在一个方向上变窄,波束截面呈椭圆形。要获得更高质量的高斯波束,须加二级或更多级的反射面进行校正,也可以用复杂的非二次曲面使波束经一级反射即形成高斯波束^[5]。用本文所述数值方法即可以进行这方面的进一步分析与研究。

参考文献:

- [1] Vlasov S N, Orlova I M. Quasioptical Transformer Which Transforms the Waves in a Waveguide Having a Circular Cross Section into Highly Directional Wave Beam [J]. *Radiofizika*, 1974, 17 (1) 148 - 154.
- [2] Ruth B G, et al. Design and Low - power Testing f a Microwave Vlasov Mode Converter [C]. *IEEE MTT - S Digest*, 1989 : 1277 - 1280.
- [3] Sealy P J, Vernon R J. Equivalence - principle Model for Radiation from TE_{0n} and TM_{0n} Mode Step - cut and Slant - cut Vlasov Feeds [C]. *IEEE AP - S Digest*, 1991 : 1836 - 1839.
- [4] Dahlstrom R K, et al. Reflector Design for an X - band Vlasov Antenna [C]. *IEEE AP - S Digest*, 1990 : 968 - 971.
- [5] 杨仕文. 高功率微波高频系统研究 [D]. 电子科技大学博士学位论文, 1997.

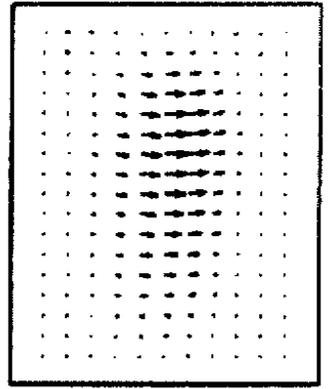


图6 远区辐射电场方向图
Fig.6 The direction of magnetic field in far - field

