

Ka波段准TE₀₁模椭圆型准光模式变换器的理论修正与设计

周康成, 冯进军

(北京真空电子技术研究所 微波电真空器件国家级重点实验室, 北京 100015)

摘要: 基于TE₀₁圆电模研究了椭圆型准光模式变换器, 并提出用于快速设计椭圆结构准光系统的修正公式。利用修正公式设计的准光系统由椭圆型Vlasov辐射器与准抛物面镜组成。计算仿真结果表明, 该椭圆体系所辐射的波束具有辐射方向性更好, 副瓣增益更低的特性, 并且其尺寸相比于传统的圆体系更小。

关键词: 准光系统; 模式变换器; TE₀₁模; Ka波段

中图分类号: TN811 **文献标识码:** A

Theory modification and design of elliptical quasi-optical mode converter for Ka-band quasi-TE₀₁ mode

ZHOU Kang-Cheng, FENG Jin-Jun

(Beijing Vacuum Electronics Research Institute, National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, Beijing 100015, China)

Abstract: Based on TE₀₁ circular electric mode, the elliptical quasi-optical mode converter is studied, and a modified formula for rapidly designing elliptical-structure quasi-optical system is proposed. The quasi-optical system designed by the modified formula is composed of an elliptical Vlasov launcher and a quasi-paraboloidal mirror. The simulation results show that the beam launched by the elliptical system has the characteristics of better launcher directionality and lower side-lobe gain, and its size is smaller than the traditional circular system.

Key words: quasi-optical system, mode converter, TE₀₁ mode, Ka-band

PACS: 41.20.Jb, 84.40.Ba, 42.25.Bs

引言

模式变换对于毫米波的传输和测量至关重要, 随着电真空器件的功率与频率向更高的方向发展, 越来越多的器件采用高阶模式工作。对于回旋管而言, 常用的工作模式有TE_{0m}圆电模、TE_{nm}边廊模与不对称体模^[1]。这些高阶模式的存在引起较大的衍射和极化损耗, 不利于直接传输, 需要将其转化为利于传输的低阶模式或Gauss波束。采用传统的波导模式变换器^[2]传输存在两方面的困难, 一方面是抑制寄生模式将成为波导变换器的设计难点, 结构的复杂导致变换器加工困难; 另一方面是在大功率毫米波器件下, 波导变换器需要采用多次模式转

换导致器件尺寸过长, 不利于回旋管末端波束的输出与利用。采用准光模式变换器是克服这些难题的有效办法^[3]。Vlasov型准光模式变换器由俄罗斯Vlasov提出的准光天线演变而来, 它是基于圆波导加工的一种器件。按照不同需要, Vlasov模式变换器可以分为阶梯切割、螺旋切割与倾斜切割三种开口类型^[4]。这种变换器形式具有结构简单、体积小等优点得到了广泛应用。当这种模式变换器工作在高频率情况下, 对应的波长较短, 所以波束的绕射效应相对较弱, 因此Vlasov模式变换器可以视为一种准光学器件。同时由于它是开放式结构, 因此更容易承受大功率的能量输出。对于工作在轴对

收稿日期: 2020-11-20, 修回日期: 2021-04-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0300203)

Foundation items: Supported by the National Key Research and Development Project (2017YFE0300203)

作者简介(Biography): 周康成(1997-), 男, 河北任丘人, 硕士研究生, 主要研究领域为太赫兹器件。E-mail: 1120431465@qq.com

Received date: 2020-11-20, Revised date: 2021-04-21

称TE₀₁模的准光模式变换器,本文主要研究阶梯型辐射器结构如图1所示。

常用的模式变换器一般采用圆波导进行切割,但这种Vlasov辐射器前端的表面电流相当强,造成很大的边缘衍射损耗^[5]。而利用椭圆波导切割可以有效的克服这类问题,椭圆波导是各类截面波导中功率携带效率因子最高的一个^[6],利用椭圆波导传输能量具有效率更高,损耗更小的优点,并且椭圆波导不存在圆波导中模式极化简并的问题,所以研究椭圆体系准光模式变换器变得十分有意义。本文研究和设计了一个适用于Ka波段工作在准TE₀₁模的椭圆型准光模式变换器,并提出了用于椭圆结构设计的修正公式。仿真结果表明,在相同参数下,椭圆体系具有比圆体系更好的辐射方向性,并且采用椭圆结构大幅度降低了辐射能量的副瓣增益。相关计算表明,利用椭圆结构进行设计可以使准光系统的整体尺寸实现有效缩减,同时发射器的辐射效率也获得大幅提高。此项工作将为利用椭圆结构研制回旋管的准光输出提供理论与设计方面的参考。

1 椭圆开口辐射器的理论修正与设计

类似于Denisov辐射器^[5],椭圆波导Vlasov辐射器也通过选择在电场分布较弱的地方进行切口,这样可以有效降低边缘衍射损耗,提高辐射器的效率。

对于工作在TE₀₁模的准光模式变换器,一般采用阶梯型切口方法。在不含镜面的椭圆型Vlasov辐射器部分,首先需要考虑的是切口切向问题。由于椭圆在角向存在一定程度的非对称性,采用切口沿椭圆长轴方向的切割方法如图2所示。图中展示了椭圆波导在准TE₀₁模下表面电流的分布情况,其中左侧为椭圆波导长轴方向电流分布,右侧为短轴方向电流分布,Z轴为波导轴线方向。如果将整个Vlasov辐射器的切口视为波导壁上连续开缝的等效叠加,那么对于圆波导而言由于其角向均匀性,每个隙缝所截断的壁电流一致从而产生较强的衍射,导致辐射场具有较大的副瓣。而对于切口沿长轴方向的椭圆波导,其准TE₀₁模的壁电流主要集中在辐射的主瓣方向如图2所示,因此在这部分强电流区域开缝会产生强烈的辐射。而波导长轴两端的壁电流分布较弱,在这部分区域开缝则不会产生较强的辐射。因而切割椭圆波导获得的Vlasov辐射器具有更低的能量增益副瓣,以及更好的定向辐射

特性。

对于圆波导型Vlasov开口辐射器,其工作机理可以用几何光学方法描述^[7],这种设计的出发点是通过研究射线波束在圆波导中的传播,来寻找相应参量间的几何关系。本文只给出修正公式相关参数的解释与证明,这两个关键参数分别是:Vlasov型开口辐射器的切口长度 L_{cut} (cut length)与最大增益辐射角 θ (相当于波导轴向的Brillouin角)。圆波导型辐射器的相关公式参考图1所示相对位置关系可以表示如下:

$$\sin\theta = \frac{k_r}{k_0} \quad , \quad (1)$$

$$k_r = \frac{\mu'_{mn}}{a} \quad , \quad (2)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} \quad , \quad (3)$$

$$L_{\text{cut}} \geq 2a \cdot \cot\theta \quad , \quad (4)$$

其中 k_r 表示横向波数,由 m 阶第一类Bessel函数的第 n 个导数根 μ'_{mn} 与圆波导半径 a 定义, k_0 表示自由空间波数,由体系所选用的频率 f 定义。因此,对于确定几何参数与工作频率的TE₀₁模圆波导型Vlasov辐射器,切口长度与最大增益辐射角都可以通过公式计算,本文研究的圆波导辐射器参数为:频率 $f = 35$ GHz,圆波导半径 $a = 16$ mm, $\mu'_{01} = 3.83$ 。可以计算出圆波导辐射器的 $\theta = 19.1^\circ$, $L_{\text{cut}} \geq 93$ mm。根据参数设计仿真了圆波导型辐射器的远场增益如图4中短虚线所示,图中虚线最大增益处对应的仿真结果 $\theta = 19.0^\circ$ 与理论计算值所吻合。本文所有仿真结果均由HFSS软件仿真获得。

但是在设计椭圆波导辐射器的过程中,如果延用圆波导Vlasov模式变换器的设计式(1)-(4)则会遇到困难。主要表现为:辐射器的辐射效果变差,最大增益辐射角 θ 变小,能量辐射方向趋于轴线方向,曲面镜的轴向长度过长,体系的尺寸变大等。为了解决这一系列问题,本文提出用于设计椭圆波导型Vlasov辐射器的修正式表示如下:

$$\sin\theta = \frac{k_r}{k_0} \quad , \quad (5)$$

$$k_r = \frac{\mu'_{mn}}{a'} \quad , \quad (6)$$

$$\alpha' = \frac{a + A \cdot b}{1 + A} \quad , \quad (7)$$

$$L_{\text{cut}} \geq 2\alpha' \cdot \cot\theta \quad , \quad (8)$$

其中 a' 是等效半径,通过引入等效半径可以分别求

出修正切口长度 $L_{\text{cut}}(\alpha')$ 与修正辐射角 $\theta(\alpha')$, a 与 b 分别为椭圆的长半轴长度与短半轴长度, A 为修正因子。通过研究不同修正因子下数值计算的辐射角与仿真结果的相对百分比误差, 选取结果 $A = e$ (e 为自然常数, 取近似值 2.718) 如图 3 所示。横坐标表示比例因子, 定义为 b/a 用于描述椭圆的形状, 当比例因子取 1 时, 椭圆体系退化为圆体系 (为方便起见, 文章中的阶梯型椭圆波导 Vlasov 辐射器简记为椭圆体系)。可以看到修正式在取 $A = e$ 时, 计算结果与仿真结果的相对百分比误差总是小于 1%。

为了进一步验证修正式的合理性, 分别对不同比例因子的椭圆体系进行了仿真如图 4 所示, 选取 $\phi = 0^\circ$ 作为参考方向, 观察不同椭圆的最大增益辐射角 θ 与远场辐射增益的关系 (结合图 1 相对位置关系)。可以看出对于比例因子为 0.8 的椭圆波导辐射器, 仿真结果中最大增益所对应的辐射角出现在 $\theta = 22.4^\circ$ 与修正公式计算值 $\theta = 22.5^\circ$ 吻合良好。在比例因子为 0.9 的体系中, 仿真结果中最大增益对应的辐射角 $\theta = 20.4^\circ$ 与修正公式计算值 $\theta = 20.6^\circ$ 吻合。可以看出, 弱椭圆体系下所引入的修正公式可以用于椭圆型 Vlasov 开口辐射器的快速工程设计。

同样的方法, 对不同切口长度的椭圆体系进行了计算, 选用比例因子为 0.8 的椭圆波导辐射器进行了模拟仿真如图 5 所示 (即 $b/a = 0.8$, 对应离心率为 0.6 的椭圆波导)。图中给出了在最大增益辐射角 θ 为 22.5° 时, 不同切口长度下椭圆波导辐射器的远场增益。当仿真模型的切口长度取 67 mm 略大于通过修正公式计算出的 $L_{\text{cut}} \geq 66$ mm 时, 在 $\phi = 180^\circ$ 方向, 即 X 轴反方向的辐射增益最低, 最小值为 -9.2 dB。而当切口长度小于通过修正公式计算出的设计值时, 如 61 mm、50 mm, 在 $\phi = 180^\circ$ 方向的辐射增益将变大, 尤其是取 50 mm 时, 辐射增益急剧变大到 -0.1 dB。这是容易理解的, 因为当切口长度小于修正公式的计算值时, 本该向 $\phi = 0^\circ$ 方向辐射的能量由于切口长度过短无法在切口上发生反射, 转而在 $\phi = 180^\circ$ 方向辐射, 造成该方向上辐射能量增益变大, 导致能量的损失。并且研究表明在比例因子为 0.8 的椭圆体系下, 当切口长度大于 75 mm 时就会使最大增益所对应的辐射角 θ 急剧变小, 导致能量辐射趋于轴线方向给后续镜面系统的设计带来极大的困难。因此只有当切口长度的设计值与修正公式计算值相吻合时, 椭圆波导辐射器

才会产生优于圆体系的辐射效果。

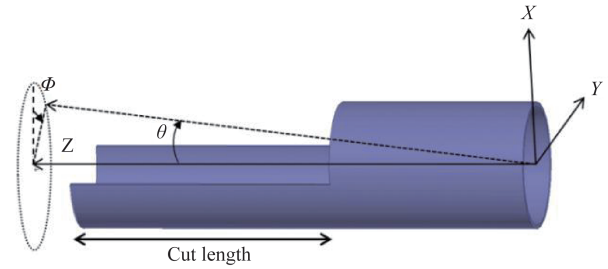


图 1 阶梯型圆波导 Vlasov 辐射器示意图, 包括各几何参数的相对空间位置关系

Fig. 1 Schematic diagram of the stepped circular waveguide Vlasov launcher, including the relative spatial relationship of the geometric parameters

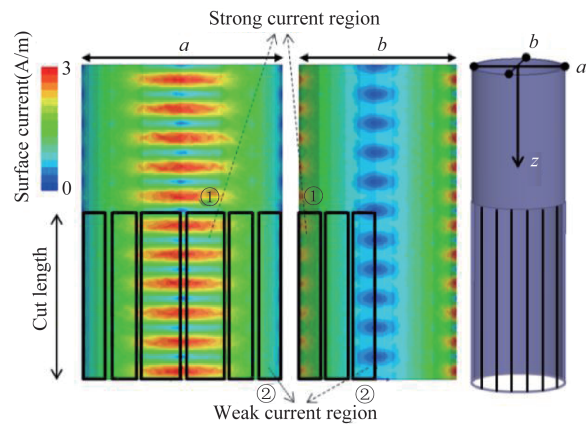


图 2 椭圆波导表面电流分布图, 注: 左侧为长轴方向电流分布, 中间为短轴方向电流分布, 右侧为阶梯型椭圆波导 Vlasov 辐射器示意图, 黑色矩形代表等效隙缝

Fig. 2 Current distribution on the surface of elliptical waveguide, Note: The left side is the current distribution along the long axis, the middle is the current distribution along the short axis, and the right side is the schematic diagram of Vlasov launcher of stepped elliptical waveguide. The black rectangle represents the equivalent slot

2 椭圆型准光模式变换器的模拟仿真

在利用修正公式得到辐射效果良好的椭圆型 Vlasov 辐射器之后, 进一步考虑引入曲面反射镜提高模式转换效率。由于曲面反射镜的第一级反射镜通常采用准椭圆反射镜或准抛物面反射镜^[8], 基于本文研究的 TE_{01} 模, 根据相关理论设计出准抛物面镜。镜面的引入不仅对辐射器辐射出的波束起到了聚焦效果, 而且当第一级准抛物面镜所聚焦的波束效果良好时, 第二级相位修正镜的设计也相对容易。通过对第一级镜面的研究表明, 椭

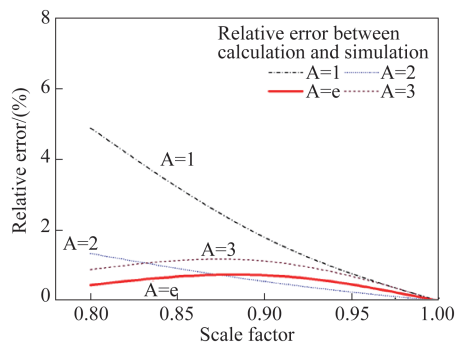


图3 不同修正因子下修正公式计算的辐射角与仿真结果的相对百分比误差

Fig. 3 Relative percentage error between the radiation angle calculated by the correction formula and the simulation results under different correction factors

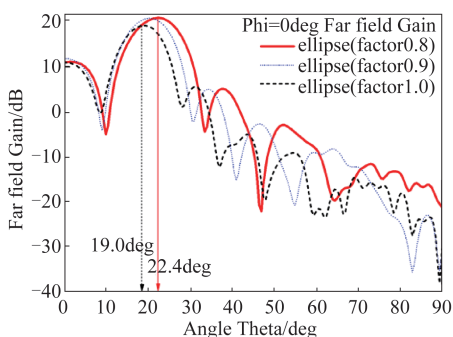


图4 不同比例因子的椭圆体系,主辐射角 θ 与辐射能量增益的关系(图中取 $\phi = 0^\circ$)

Fig. 4 The relationship between the main radiation angle θ and the radiation energy gain of elliptic system with different scale factors ($\phi = 0^\circ$ in the figure)

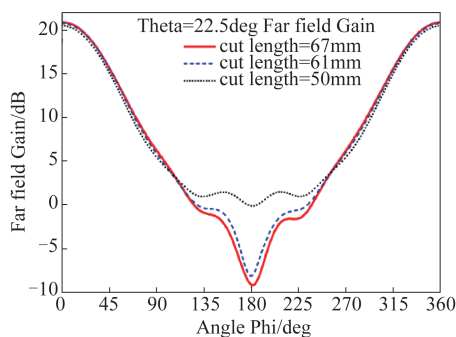


图5 不同切口长度的椭圆体系,角 ϕ 与辐射能量增益的关系(图中取 $\theta = 22.5^\circ$)

Fig. 5 The relationship between the angle ϕ and the radiation energy gain for elliptic systems with different cut lengths ($\theta = 22.5^\circ$ in the figure)

圆型 Vlasov 开口辐射器与准抛物面镜配合良好,辐射方向性较传统的圆波导体系有大幅提高,更有利于后续相位修正镜的设计。

第一级曲面镜的设计有多种方法^[9-11],其主要思路都是将辐射器辐射出的波束通过曲面镜的汇聚作用在焦点处得到相同的相位。为了利用准抛物面镜得到如图6(a)所示的平行光束,设计镜面时参考了如图6(b)给出的开口辐射器与准抛物面镜的几何结构示意图。

将波导的中心设置在坐标轴中心处, R_c 是焦散半径,则焦散面上两条波束的相位差为:

$$\Delta s(\varphi_0, \varphi) = R_c(\varphi - \varphi_0) \quad (9)$$

射线从与焦散圆的切点到准抛物面的汇聚点的传播长度为:

$$L(\varphi) = l(\varphi) + \sqrt{[x(\varphi) + l_2]^2 + y(\varphi)^2} \quad (10)$$

其中:

$$x(\varphi) = R_c \cdot \cos\varphi - l(\varphi) \cdot \sin\varphi \quad (11)$$

$$y(\varphi) = R_c \cdot \sin\varphi - l(\varphi) \cdot \cos\varphi \quad (12)$$

任何被镜面反射的射线都应该在汇聚点有相同的相位:

$$\Delta s(\varphi_0, \varphi) + L(\varphi) - L(\varphi_0) = 0 \quad (13)$$

将式(9)-(12)式代入式(13)可以解出:

$$l(\varphi) = \frac{8R_c l_2 \cos\varphi - 4\varphi^2 R_c^2 - 4\varphi R_c^2 \pi + 8\varphi R_c l_0 - \pi^2 R_c^2 + 4\pi R_c l_0 - 8l_1 l_0 - 8l_1 l_2 + 4R_c^2}{8l_2 \sin\varphi + 8\varphi R_c + 4\pi R_c - 8l_0} \quad (14)$$

其中:

$$l_0 = L\left(-\frac{\pi}{2}\right) \approx 2l_1 + l_2 \quad (15)$$

根据射线波束在圆波导中传播的几何光学可以推导出散焦半径的值^[12],这里直接给出公式:

$$R_c = a \cdot \frac{m}{\mu'_{mn}} \quad (16)$$

其中 a 为圆波导半径,在椭圆体系的设计中这里应该替换为 a' 等效半径,但是由于TE_{0n}模的 $m = 0$,所以最终椭圆体系的镜面形状与圆体系一致,这里 $R_c = 0$,化简上述式子有:

$$l(\varphi) = \frac{-8l_1 l_0 - 8l_1 l_2}{8l_2 \sin\varphi - 8l_0} = \frac{l_1 l_0 + l_1 l_2}{l_0 - l_2 \sin\varphi} \quad (17)$$

将式(15)代入式(17)并对 l_2 取无穷远处的极限有:

$$l(\varphi) = \frac{2l_1}{1 - \sin\varphi} \quad (18)$$

$l(\varphi)$ 的几何意义是从原点到抛物线上的距离,根据圆锥曲线的公式可以求出抛物线方程:

$$y^2 = -4 \cdot l_1 \cdot (x - l_1) \quad (19)$$

$$y^2 = -80x + 1600 \text{ mm} \quad (20)$$

最终得到镜面方程在坐标平面 XY 上的关系为： $y^2 = -4 \cdot l_1 \cdot (x - l_1)$ ，此时镜面出射的波束成平行状态如图6(a)所示，镜面在 Z 轴方向的长度为镜长，镜长与主要辐射角 θ 、波导半径 a 、以及方程中的参量 l_1 有关(l_1 根据实际结构设定，这里取 $l_1 = 20$ mm)，镜面长度计算方程将在下一节阐述。

为了验证椭圆型准光模式变换器的效果，本文对利用相同镜面方程所设计的不同参数的圆型与椭圆型准光模式变换器分别利用HFSS进行了模拟仿真，仿真中两种体系所选用的参数均为相应公式所计算的最优值，选用的圆体系参数为半径 $a = 16$ mm，切口长度 $L_{\text{cut}} = 93$ mm，镜面长度 $L_{\text{mirror}} = 198$ mm。椭圆体系参数为长半轴 $a = 16$ mm，短半轴 $b = 12.8$ mm，切口长度 $L_{\text{cut}} = 67$ mm，镜面长度 $L_{\text{mirror}} = 157$ mm，比例因子 $b/a = 0.8$ 。主辐射角 θ 所对应的远场能量增益曲线如图7(a)所示，其中圆波导型准光模式变换器的最佳增益辐射角为 $\theta = 19.5^\circ$ ，在图中由虚线标出，椭圆型体系的最佳增益辐射角为 $\theta = 22.5^\circ$ ，由实线标出。从图中可以看出，椭圆体系最大副瓣增益不超过2 dB，远低于圆体系最大副瓣增益所对应的10 dB，并且在最大增益 $\phi = 180^\circ$ 方向(与不带镜面单独的Vlasov辐射器不同，最大增益角由于镜面反射从 $\phi = 0^\circ$ 反转至 $\phi = 180^\circ$)椭圆体系的最大增益值为26 dB仅比圆体系小1.1 dB，但是辐射的方向性却有极大的改善，这一点从图7(b)中更容易看出。在极坐标下，图中实线对应的椭圆体系辐射效果更集中，能量散射更少，非主要辐射方向的能量输出几乎不产生增益，这种优良的特性可以减轻后续相位修正镜的设计压力。并且研究表明，在一定程度的弱椭圆范围内，椭圆的比例因子越小(离心率越大)，副瓣能量增益越低，主瓣与副瓣的比值越大，辐射方向性越好，辐射效率越高。

图8给出了带有镜面的辐射器以及输出端口的相对位置关系，对于不同体系输出端口的位置均通过计算设计得到，保证了准光束入射时垂直于输出端口面以及传播的路径长一致，其中输出端口的尺寸均为 60 mm \times 60 mm。图9给出了我们设计的准光模式变换系统在输出端口的电场分布，输出端口的位置参考图8。从图9(a)可以看出，当使用传统的圆波导辐射器配合准抛物面镜进行模式转换输出时，其电场分布情况与Gauss电场分布相差较大，这说明带有准抛物面镜的圆波导Vlasov辐射器对波

束的聚焦作用较差，辐射效率较低。而利用修正公式设计的椭圆波导辐射器在与准抛物面镜配合后输出的电场分布如图8(b)所示，可以看到其电场分布更接近于理想Gauss分布，这表明在相同设计参数要求的情况下，带有准抛物面镜的椭圆体系的模式转换效果优于传统的圆体系。这种优良的辐射特性更有利于后续相位修正镜的设计，这表现在大幅度降低相位修正镜的设计难度以及减少所需相位修正镜的枚数。此外还对输出端口的能量截获效率做了相应计算，计算表明圆体系下输出端口只截获了发射能量的85.21%，而椭圆体系下的能量截获效率达到了96.20%。这种优良的特性得益于椭圆体系较小的能量辐射副瓣增益。

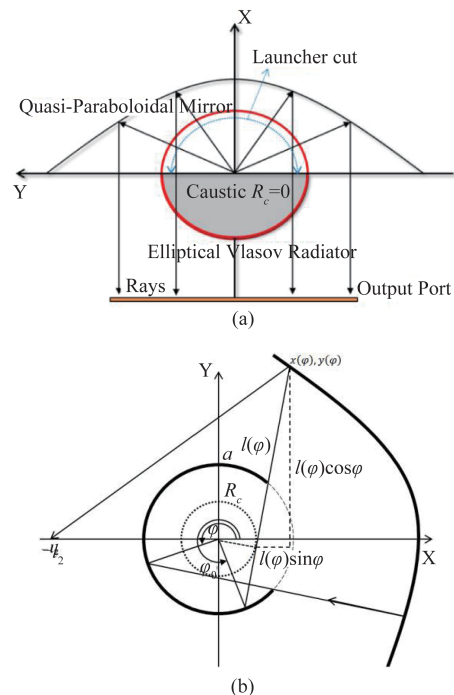


图6 (a) 准抛物面镜汇聚效果示意图, (b) 准抛物面反射镜的几何光学示意图

Fig. 6 (a) Schematic diagram of convergence effect of quasi-paraboloidal mirror, (b) Schematic diagram of geometrical optics of quasi-paraboloidal mirror

3 小型化的实现

计算发现，我们设计的椭圆型准光模式变换器具有比传统圆波导模式转换系统体积更小的优点。由于系统的总长度主要受限于镜面位置与镜面长度，利用修正公式，通过计算可以得到不同结构设计所需的镜面长度，这里略去推导过程直接给出镜面长度公式：

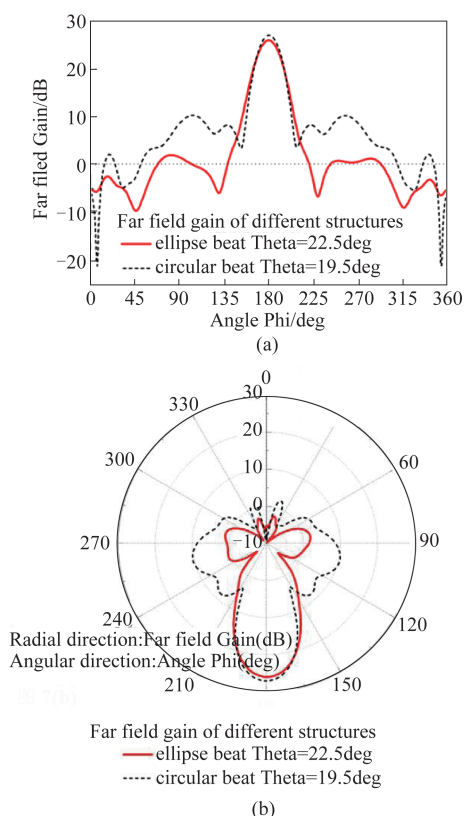


图7 (a) 椭圆体系与圆体系的主辐射角 θ 对应的远场能量增益对比图, (b) 极坐标系下的对比图

Fig. 7 (a) Comparison of far-field energy gain corresponding to principal radiation angle θ of elliptic system and circular system, (b) comparison in polar coordinate system

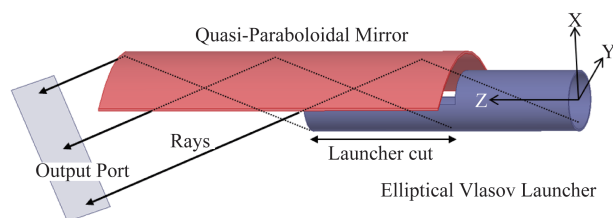


图8 带有准抛物面镜的辐射器与输出端口的相对位置关系示意图

Fig. 8 Schematic diagram of relative position relationship between launcher with quasi parabolic mirror and output port

$$L_{\text{cir-mirror}} \geq (l_1 + 3a) \cdot \cot\theta \quad (21)$$

$$L_{\text{ell-mirror}} \geq (l_1 + 3a') \cdot \cot\theta' \quad (22)$$

$$\frac{L_{\text{ell-mirror}}}{L_{\text{cir-mirror}}} \leq \frac{b}{a} \quad (23)$$

式(21)代表圆体系的镜面长度计算公式, a 取圆波导的半径, θ 根据式(1)–(3)计算得到; 式(22)代表椭圆体系的镜面长度计算公式, a' 取椭圆对应的修正半径, θ' 根据修正公式(5)–(7)计算得到。这里的公式包含了 l_1 参量是因为本文设计结构的镜面

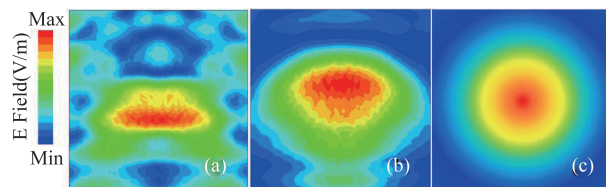


图9 (a) 电场分布对比图, 带有准抛物面镜的圆波导辐射器在输出端口的电场分布, (b) 利用修正公式设计的带有准抛物面镜的椭圆波导辐射器在输出端口的电场分布, (c) 理想 Gauss 电场分布示意图

Fig. 9 (a) Electric field distribution comparison diagram, electric field distribution of circular waveguide radiator with quasi-paraboloidal mirror at output port, (b) Electric field distribution of elliptical waveguide radiator with quasi-paraboloidal mirror designed by modified formula at output port, (c) Ideal Gauss electric field distribution diagram

起始端即切口起始端, 如不包含前段也可以取 $l_1 = 0$ (对辐射效果影响不大)。从式(23)可以看到, 在设计准抛物面镜时, 椭圆体系镜面长度与圆体系之比略小于椭圆的比例因子。换言之, 当设计的椭圆体系比例因子越小时, 体系的尺寸越小。优化结果表明, 对于比例因子为0.8的椭圆结构, 其轴向长度相比于传统圆体系减少了21%, 镜面长度减少28%。

4 结论

准光模式变换器在高功率毫米波回旋管中具有重要作用, 它可以将回旋管末端输出的高阶模式转换为利于传输的线极化低阶波导模式或高斯模式。通过对椭圆型结构 Vlasov 准光模式变换器的研究发现, 带有准抛物面镜的椭圆型 Vlasov 辐射器可以有效提高辐射的定向性与模式的转换效果, 有利于后续对相位修正镜的设计。此外我们还结合等效半径的方法提出了椭圆体系的修正公式, 利用修正公式可以做到对椭圆型辐射器的快速工程设计。通过计算表明, 利用修正公式计算的椭圆系统结构参数与仿真结果吻合良好, 并且相比于传统圆波导设计的准光模式变换器在尺寸上实现了一定程度的缩减。由于本模型未引入相位修正镜进一步提高模式转换效率, 输出的 Gauss 波型尚未达到最佳。但在带宽方面, 由于 Vlasov 辐射器比 Denisov 型辐射器有着更为简单的工作机理, 因而具有先天的带宽优势。并且由于本模型考虑的是弱椭圆波导, 因而在匹配问题上不会产生困难。

References

- [1] Kartikeyan M V, Borie E, Thumm M. *Gyrotrons: High power microwave and millimeter wave technology* [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2003: 1-5.
- [2] NIU Xin-Jian, GU Ling, YU Sheng, *et al.* Corrugated waveguide mode conversion for 94 GHz second-harmonic gyrotron [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (牛新建, 顾玲, 喻胜, 等. 94GHz 二次谐波回旋管波纹波导模式转换. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2): 117-120.
- [3] DAI Da-Fu. The present status and future developments of high power microwave [J]. *Vacuum Electronics*(戴大富. 高功率微波的发展与现状. *真空电子技术*), 2004, **5**: 20-26.
- [4] ZHOU Hai-Jing, DING Wu, LIU Qing-Xiang. Research on vlasov-type antenna [J]. *High Power Laser and Particle Beams*(周海京, 丁武, 刘庆想. VLASOV 天线的研究. *强激光与粒子束*), 2002, **14**(3): 431-433.
- [5] BIAN Hui-Qi, DU Chao-Hai, PAN Shi, *et al.* Design and analysis of a broadband quasi-optical mode converter with a Denisov launcher [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (边慧琦, 杜朝海, 潘石, 等. 太赫兹宽带 Denisov 型准光模式变换器的设计分析. *红外与毫米波学报*), 2020, **39**(5): 567-575.
- [6] WANG Bai-Suo, LI Sen, WANG Yan, *et al.* Eigen modes in elliptic waveguide [J]. *Acta Electronica Sinica*, (王百锁, 李森, 王演, 等. 椭圆波导中的本征模. *电子学报*), 2003, **3**: 353-357.
- [7] Bogdashov A A, Denisov G G. Asymptotic theory of high-efficiency converters of higher-order waveguide modes into eigenwaves of open mirror lines [J]. *Radiophysics and Quantum Electron*, 2004, **47**(4): 283-296.
- [8] Jin J B, Piosczy K B, Thumm M, *et al.* Quasi-optical mode converter/mirror system for a high power coaxial-cavity gyrotron [J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 2006, **34**(4): 1508-1515.
- [9] Lorbeck J A, Vernon R J. Singly curved dual-reflector synthesis technique applied to a quasi-optical antenna for a gyrotron with a whispering-gallery mode output [J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1991, **39**(12): 1733-1741.
- [10] Mobius A W, Casey J A, Kreischer K E, *et al.* An improved design for quasi-optical mode conversion of whispering gallery mode gyrotron radiation [J]. *Int J. Infrared Millim. Waves*, 1992, **13**(8): 1033-1063.
- [11] Blank M. High efficiency quasi-optical mode converters for overmoded gyrotrons [D]. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [12] WANG Bin, DU Chao-Hai, LIU Pu-Kun, *et al.* Study and Design of a quasi-optical mode converter for W-band whispering-gallery mode gyrotron [J]. *Acta Physica Sinica*, (王斌, 杜朝海, 刘濮鲲, 等. W 波段边廊模回旋管准光模式变换器的研究与设计. *物理学报*), 2010, **59**(4): 2512-2518.