

太赫兹频段Vlasov天线设计

张 海, 李晓颖, 谢姣姣, 汤 炜

华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门

收稿日期: 2024年3月19日; 录用日期: 2024年4月19日; 发布日期: 2024年4月30日

摘 要

针对传统Vlasov天线, 增益较低、副瓣电平较高, 方向图不够理想等问题, 本文设计一款工作于太赫兹频段的Vlasov天线。利用三维电磁仿真软件对其进行模拟仿真, 通过优化设计使天线的各项性能指标达到最佳。该天线是由圆波导演变而来, 相比于圆波导, 该天线的方向图特性和最大增益都有所改善。为了进一步提高天线性能, 就必须对其进行改进, 从而大大提高其方向图特性和最大增益。仿真结果表明, 其最大增益可以达到15.7 dB, 回波损耗S11在280 GHz到320 GHz频率范围内均小于-10 dB, 辐射模式为单向波束和线极化辐射特性, 从而解决了高功率微波器件中远场方向图轴向为零的问题。

关键词

Vlasov天线, 方向图, 高增益, 低副瓣

Design of Vlasov Antenna in Terahertz Range

Hai Zhang, Xiaoying Li, Jiaojiao Xie, Wei Tang

College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen Fujian

Received: Mar. 19th, 2024; accepted: Apr. 19th, 2024; published: Apr. 30th, 2024

Abstract

Regarding the problems such as lower gain, higher sidelobe levels, and less than ideal directional patterns with traditional Vlasov antennas, this article presents the design of a Vlasov antenna operating in the terahertz frequency band. The antenna is simulated using three-dimensional electromagnetic simulation software to optimize its performance metrics. Derived from a circular waveguide, the antenna exhibits improved directional characteristics and maximum gain compared to the original waveguide, though further enhancements are necessary to meet ideal standards. To further improve the antenna's performance, modifications are made to significantly en-

hance its directional characteristics and maximum gain. Through simulation, the maximum gain can reach 15.7 dB, and the return loss S11 is lower than -10 dB in the frequency range of 280 GHz to 320 GHz. The radiation patterns are unidirectional beam and linear polarization, effectively addressing the issue of axial nulls in the far-field pattern common in high-power microwave devices.

Keywords

Vlasov Antenna, Directional Pattern, High Gain, Low Sidelobe

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高功率微波源(HPM)一般指峰值功率在 100 MW 以上, 工作频率在 300 MHz~300 GHz 内的电磁波。HPM 的崛起是由近代微波理论和技术的迅速发展而推动起来的。它极大地促进了高功率雷达、超级干扰机、等离子物理和 HPM 武器等的发展[1]。然而, 许多高功率微波器件都有着旋转轴对称模式, 例如虚阴极振荡器、相对论返波管、多波契论克夫发生器等, 由于旋转轴对称几何结构, 它们的输出模式也都是圆波导轴对称模, 即 TM_{01} 模、 TE_{0n} 模[2]。这种输出模式的缺点之一就是其远场方向图在轴向上为零, 这对天线的辐射非常不利。为了改善这一缺点, 就必须重新设计整个辐射系统, 从而获得单向波束以及线极化的辐射特性[3] [4]。其中一种解决方案为 Vlasov 天线, 即本文所要研究的对象, 它是圆波导的一种演变, 它是将圆波导的末端以某种形状切割形成非对称结构, 按切口形状的不同可以分为阶梯型和斜切型 Vlasov 天线[5] [6]。然而, 目前 Vlasov 天线的设计还存在以下几方面问题: 首先, 传统 Vlasov 天线, 虽然结构较为简单, 但是它的方向图特性可能不够理想, 导致增益不高。其次, 由于切口设计不合理, 可能仍旧存在波束宽度和副瓣电平未达到预期指标的问题。再次, 为了改善性能, 可能会引入二级反射面, 但这会导致天线体积增大, 结构不够紧凑[7] [8]。另外, COBRA 天线分析表明, 改变口径场的轴对称性会影响频带宽度, 这也是 Vlasov 天线需要考虑的问题之一[9]。最后, 由于高功率微波应用对天线的稳定性要求很高, 因此需要确保 Vlasov 天线在长时间高功率运行条件下能够保持稳定的性能[10]。

本文的研究目标是太赫兹频段的高增益 Vlasov 天线, 目的是设计出一款各项性能指标最佳的天线模型, 需要考虑的主要技术指标包括: 回波损耗 S11、电压驻波比 VSWR、最大增益、主瓣宽度、主瓣方向、副瓣电平和方向图特性等。通过优化设计, 使其天线结构紧凑、增益提高、方向图良好、波速宽度较宽、副瓣电平较低, 其中回波损耗 S11 在 280 GHz 到 320 GHz 频率范围内均小于 -10 dB, 可认为匹配良好。

2. 天线结构与模拟仿真

Vlasov 天线的引入能够很好地解决高功率微波器件远场方向图轴向为零的问题, 且具有结构紧凑简单的优点。在本节中要设计一个各项性能指标都最佳的天线, 其中主要参考的性能指标包括回波损耗 S11、电压驻波比 VSWR、最大增益、主瓣宽度、副瓣电平、主瓣方向和方向图特性。设计流程为: 首先将天线的大体框架搭建出来, 一开始对各个结构参数并不做要求, 只是根据相关文献将参数确定在一个比较

小的范围内，之后利用控制变量法，逐个优化结构参数，最后综合考虑各项性能指标，设计出一个符合要求的 Vlasov 天线。本次仿真中采用的是斜切型 Vlasov 天线，天线的仿真模型如图 1 所示。该模型的主要优点是：虽然只是圆波导的简单改进，但是其性能却比圆波导要好许多。相比于圆波导，该天线的方向图特性和最大增益均有所提高，且整个天线的结构简单、紧凑，并不需要模式转换器，又或者说它本身就是一种模式转换器加天线的组合。

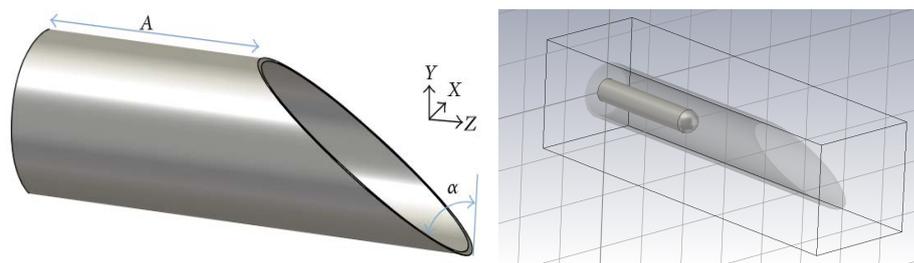


Figure 1. Model of Vlasov antenna
图 1. Vlasov 天线示意图

2.1. 天线斜切角的优化

Vlasov 天线的特点之一就是其非对称的末端结构，而在设计斜切型天线的过程中，末端的斜切角是我们首先要考虑的重要参数。为了设计的方便，本次将对 15°至 45°之间共 7 个不同的斜切角进行仿真。仿真结果如图 2 和图 3 所示。

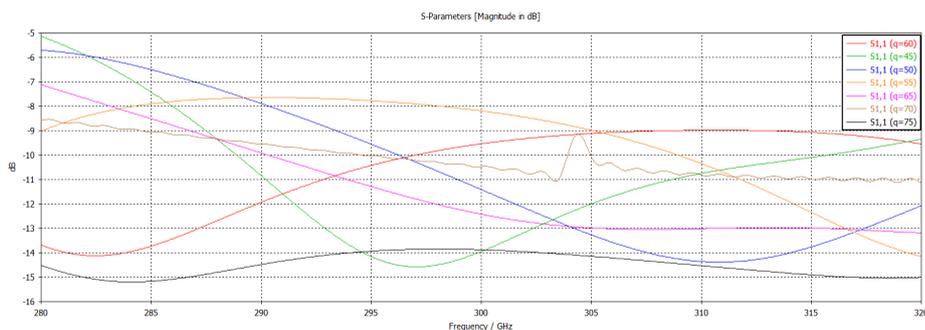


Figure 2. Return loss at different bevel angles
图 2. 不同斜切角情况下的回波损耗对比

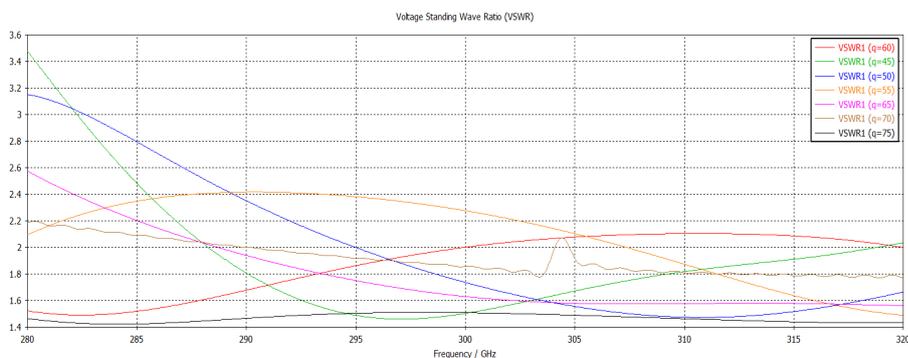


Figure 3. VSWR at different oblique angles
图 3. 不同斜切角情况下的电压驻波比对比

从表 1 可知, 随着斜切角的增大, 最大增益在不断下降, 主瓣方向的变化并不明显, 而主瓣宽度在不断增大, 副瓣电平不断减小。如果只考虑最大增益的话, 那么选择 15° 的斜切角可以使整个系统增益最大, 但是当斜切角为 15° 时, 它的回波损耗和电压驻波比并不理想, 20° 的斜切角情况也和 15° 相同。而当斜切角为 25° 时, 回波损耗在大部分的频率范围内小于 -10 dB, 可以认为匹配良好, 并且有着较大的增益。所以综合考虑各项性能指标后, 最终确定斜切角为 25°。

Table 1. Various performance index at different bevel angles

表 1. 不同斜切角情况下的各项性能指标对比

斜切角(°)	最大增益(dB)	主瓣方向(°)	主瓣宽度(°)	副瓣电平(dB)
15	11.5	43	36.1	-15.7
20	10.8	50	37.9	-16.4
25	10.1	51	42.5	-16.9
30	10	49	43.3	-19.6
35	9.35	53	45.6	-21.2
40	8.85	48	47.7	-23.4
45	8.55	49	50	-25.7

2.2. 天线内导体长度的优化

Vlasov 天线内导体是由一个圆柱以及一个半圆组合而成, 而内导体长度也是其一项重要的结构参数。首先将扫描范围确定在 1.5 mm 至 2.5 mm 之间, 间隔 0.1 mm, 总共 11 个参数, 得到的仿真结果如图 4 和图 5 所示。

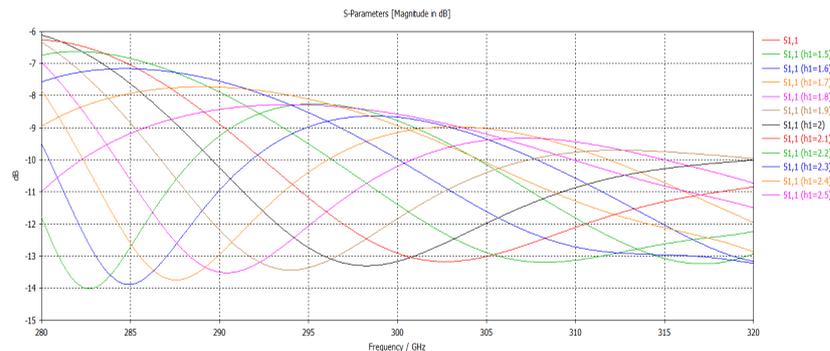


Figure 4. Return loss of different inner conductor lengths

图 4. 不同内导体长度的回波损耗对比

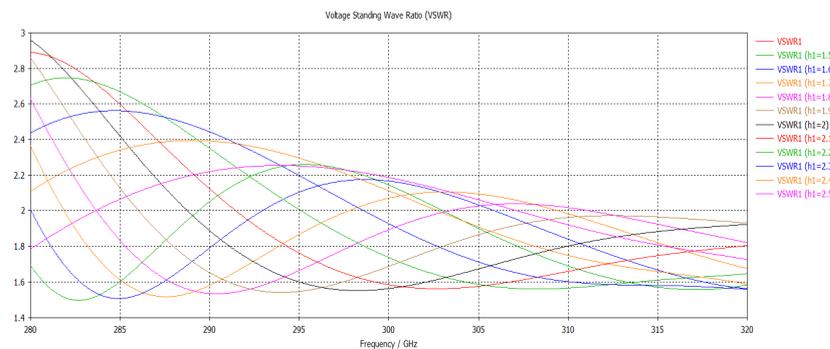


Figure 5. VSWR of different inner conductor lengths

图 5. 不同内导体长度电压驻波比比较

Table 2. Various performance index with different inner conductor lengths
表 2. 不同内导体长度各项性能指标对比

内导体长度	最大增益(dB)	主瓣方向(°)	主瓣宽度(°)	副瓣电平(dB)
1.5	10.4	49	40.9	-22.4
1.6	10.4	49	41.3	-22.5
1.7	10.3	49	42.1	-20.6
1.8	10.3	49	42.4	-22.5
1.9	10.3	49	42.3	-22.1
2.0	10.4	49	41.8	-20.9
2.1	10.4	49	41.9	-22.6
2.2	10.3	50	41.9	-20.4
2.3	10.1	50	41.9	-21.8
2.4	10.1	50	42.2	-21.8
2.5	10.2	49	42.4	-20.4

由表 2 结果可以看出，内导体长度对天线的的影响与外导体长度一样，主要集中在回波损耗和电压驻波比，而最大增益、主瓣方向、主瓣电平和副瓣电平的变化较小。从回波损耗的对比图可以看出，随着内导体长度的增加，曲线逐渐向右移动，即最小值对应频率不断增加，但最小值在不断提高，但仍然可以在一个比较大的区域内满足小于-10 dB 的要求。综合各项性能指标，最后确定内导体长度为 2.1 mm。

2.3. 天线外导体半径的优化

本文中外导体的半径因为可以在一个较大范围内取值，所以像优化外导体长度一样，首先在一个较大范围内仿真，对比仿真结果后将范围缩小，再确定具体的值。本次优化首先将外导体半径从 0.35 mm 至 0.55 mm 内进行仿真，间隔为 0.05 mm，总共 5 个参数，仿真结果如图 6 所示。可见，在 280 GHz 到 320 GHz 这个频率范围内，回波损耗都小于-10 dB，可以认为整个辐射系统匹配良好，同时电压驻波比都保持在一个较小的范围内。

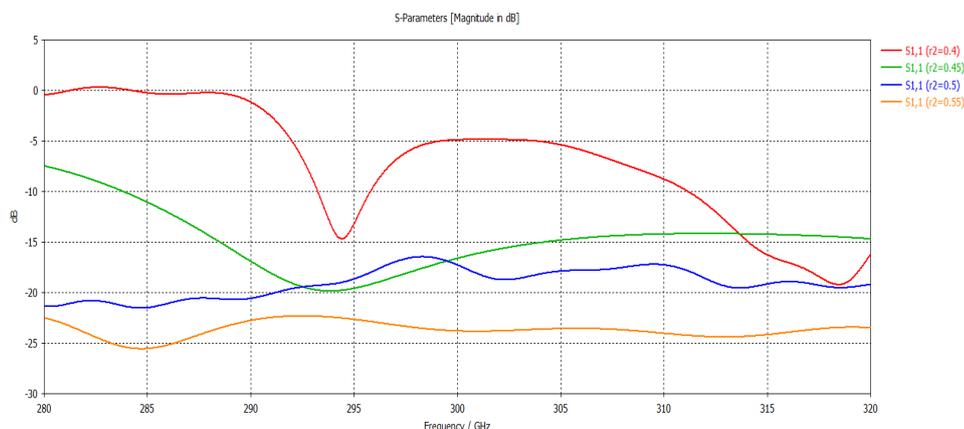


Figure 6. Return loss of different outer conductor radius
图 6. 不同外导体半径的回波损耗比较

由表 3 的结果可以看出，不同的外导体长度各项性能指标差别较大，当外导体长度为 0.4 mm 时，回

波损耗和电压驻波比都较大，且增益也较小，所以不采用。虽然当外导体半径为 0.55 时，最大增益比较大，但是电压驻波比的曲线并不是很好，所以最终确定外导体半径在 0.45 mm 至 0.5 mm 中取值。

Table 3. Various performance index with different outer conductor radius
表 3. 不同外导体半径各项性能指标比较

外导体半径(mm)	最大增益(dB)	主瓣方向(°)	主瓣宽度(°)	副瓣电平(dB)
0.35	5.44	57	63.7	-9.7
0.4	8.75	54	49.1	-16.7
0.45	10.4	49	41.4	-22.3
0.5	11.4	46	36.9	-25.7
0.55	12.3	41	31.4	-24.9

2.4. Vlasov 天线结果分析

通过以上的仿真分析，完成了对 Vlasov 天线结构参数的优化，具体参数见表 4，得到的仿真结果如图 7 和图 8 所示。

Table 4. Vlasov antenna parameters
表 4. Vlasov 天线各项参数

外导体长度(mm)	6.1
内导体长度(mm)	2.1
内导体半径(mm)	0.22
外导体半径(mm)	0.47
外导体厚度(mm)	0.06
斜切角(°)	25

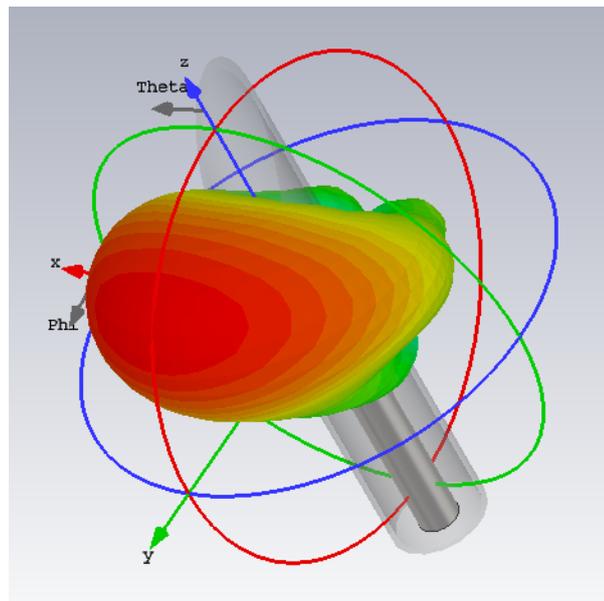


Figure 7. Directional pattern
图 7. 方向图

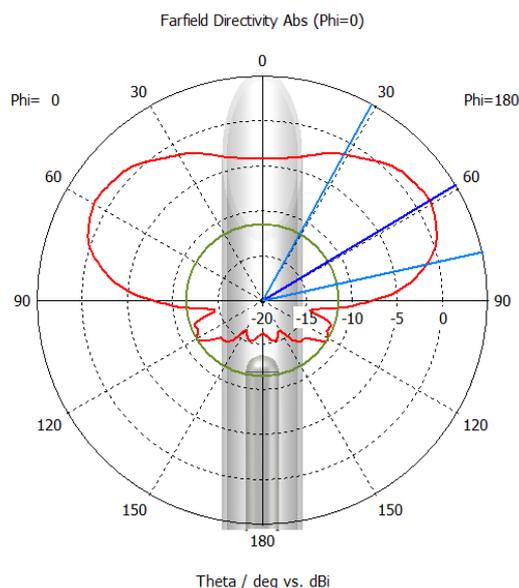


Figure 8. Directional pattern with 0 phi angle
图 8. Phi = 0 时的方向图

图 8 是天线的方向图，从图中可以看到和预期结果相同，该天线的方向图并不是圆对称的，由于天线末端的非对称结构，其方向图并没有沿着天线轴向分布，而是偏移了一定角度，形成了一定的方向性。这种特性在如机载雷达、导弹导引头等下视角工作或隐身天线中将有比较重要的应用。

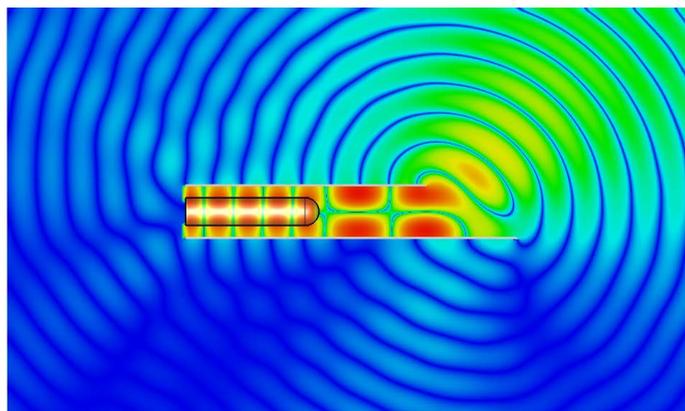


Figure 9. H field distribution
图 9. 辐射磁场分布

图 9 为 Vlasov 天线从侧面看过去的电场和磁场辐射示意图，从图中可以清晰的看到该天线的工作方式，该天线在后面同轴波导段的传输模式为 TEM 模，而到了圆波导段，就转换成了 TM_{01} 模，完成了一个模式转换，最后再从斜切端口出辐射出去。该模式很好地解决了天线方向图特性不理想、增益不高、主波瓣对称性差、旁瓣和后瓣电平较高等问题。

3. 结论

本文设计了一款 Vlasov 天线，它具有增益高、方向性好、结构简单等优点，同时能够解决许多高功

率微波源远场方向图轴向为零的缺点。所设计天线在 280 GHz 到 320 GHz 频率范围内,回波损耗均小于 -10 dB,满足设计要求。本文的主要创新工作在于:(1)通过对 Vlasov 天线的工作模式进行参数化模拟仿真,对其模式转换及辐射特性有了清晰的物理描述。仿真结果为后续相关实验研究提供了相对准确的加工原型,使实测结果与模拟预测吻合良好。(2)该天线设计改善了辐射波束的圆对称性,这对于实现均匀覆盖的通信或雷达系统尤为重要。通过优化,天线的最大增益达到 10 dB,同时副瓣电平降低到 -20 dB,这表明天线的方向性得到了显著改善。(3)该 Vlasov 天线工作于太赫兹频段,尺寸小巧紧凑,功率容量较高,特别适用于输出模式为 TEM 或 TM₀₁ 的太赫兹源。

基金项目

福建省自然科学基金项目(项目编号:2021J01288);2023 华侨大学实验教学与管理改革项目(项目编号:SY2023J21)。

参考文献

- [1] 邵浩. 高功率微波是什么[M]. 北京:国防工业出版社,2023:1-6.
- [2] 方进勇. 简明高功率微波技术[M]. 北京:化学工业出版社,2023:59-67.
- [3] 陈昌华,刘国志. 相对论返波管导论[M]. 北京:科学出版社,2021:105-111.
- [4] 江伟华,张驰. 高功率微波[M]. 第2版. 北京:国防工业出版社,2009:158-166.
- [5] 罗康,孟进,朱丹妮,等. 高功率容量 Vlasov 天线设计[J]. 舰船电子工程,2021,41(12):205-208.
- [6] 韩梦. 毫米波太赫兹准光模式变换器研究[D]:[博士学位论文]. 成都:电子科技大学,2023.
- [7] 张信歌. 紧凑共轴圆波导模式转换器研究[D]:[硕士学位论文]. 绵阳:西南科技大学,2017.
- [8] 黄赛赛,何小祥,杨阳. 超宽带高功率 Vlasov 天线设计[J]. 微波学报,2012,28(S3):106-108.
- [9] 徐福锴,周海京,丁武. 改进型 COBRA 透镜天线的设计[J]. 强激光与粒子束,2005(8):1256-1258.
- [10] 周海京,丁武,刘庆想. VLASOV 天线的研究[J]. 强激光与粒子束,2002(3):431-433.