

L 波段磁绝缘线振荡器一体化辐射天线

陈代兵^{1,3}, 范植开¹, 周海京², 王 冬¹

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088; 3. 中国工程物理研究院 研究生部, 北京 100088)

摘 要: 根据小型化的要求, 提出了可以用于小型化 L 波段磁绝缘线振荡器的一体化辐射天线的模型, 即介质+插板移相型模式变换器, 该模型可以有效缩短模式变换器的物理长度, 并基于该模型研究了一体化辐射天线的方向图、增益、物理长度等特性, 初步优化设计了一体化辐射天线, 为结构紧凑的小型化磁绝缘线振荡器的研究提供了方便。

关键词: 磁绝缘线振荡器; 天线; 高功率微波; L 波段

中图分类号: TN99

文献标识码: A

磁绝缘线振荡器(MILO)具有较多的优点, 在实用化方面具有较广阔的前景^[1-4]。但是, 目前该器件输出的微波模式是对称模, 不利于定向辐射, 为此通常需要通过模式转换器将对称模(如 TEM 模)转换成非对称模(如 TE_{11} 模)来进行定向辐射。文献[1-4]中的方法可以实现对称模式的定向辐射, 但是辐射方向与器件不同轴; 文献[5-6]中辐射天线部分采用介质移相块的方法, 该方法已经得到了成功的运用, 但是为了便于调试、减小反射, 通常采用相对介电常数不太高的介质材料, 所以模式变换的长度较长; 同时文献[7-8]中的插板移相的方法也是一种较好的方法, 但是, 对应于某些频率范围, 或者对应某些输出阻抗的同轴结构, 模式变换器的长度仍然需要很长, 不能达到小型化的要求。因此, 本文结合介质移相和插板移相的优点, 提出了介质+插板移相型模式变换器, 并进一步增大了插板模型的分区数目, 缩短了模式变换器的长度, 提出了可以用于小型化 L 波段 MILO 的一体化辐射天线的模型。

1 基本原理

集模式变换器于一体的小型化 L 波段 MILO 的一体化辐射天线的核心是 TEM- TE_{11} 的模式变换器。针对传输 TEM 模式的同轴输出结构进行的 TEM- TE_{11} 模式变换, 其基本原理是: 根据同轴线中 TEM 模式的特点, 通过插板将同轴线一分为二(如图 1 所示), 利用两部分中传输的微波的相移常数 β_1, β_2 不相等, 在模式变换的起始端的两部分的电场相位相同, 经过一定长度 $L(L = \pm\pi/(\beta_2 - \beta_1))$ 的传输距离后, 在模式变换末端的两部分电场的相位差为 180° , 因此实现了相位的翻转, 从而实现了 TEM- TE_{11} 模式的变换。为

了实现一体化辐射天线的小型化, 需要尽量缩短模式变换的长度 L 。根据以上模式变换的基本原理, 两分区域中微波传输的相移常数的差 $\beta_2 - \beta_1$ 越大, 则模式变换的长度 L 越小。

介质+插板移相型模式变换器的具体设计过程如下:

首先, 利用金属插板将同轴线一分为二, 分别为 180° 的扇形截面波导, 再将其中的一个扇形截面 N 等分, N 越大越好, 原因是 N 越大, 等分的扇形截面波导的角度越小, 这些扇形截面波导的截止频率越高, 所以频率一定的微波在这些扇形截面波导中的相移常数越小。固然 N 越大越好, 但是需要根据所设计的频率和同轴线的阻抗来考虑, 在某些 N 值的条件下, 传输可能已经截止, 无法实现模式转换。

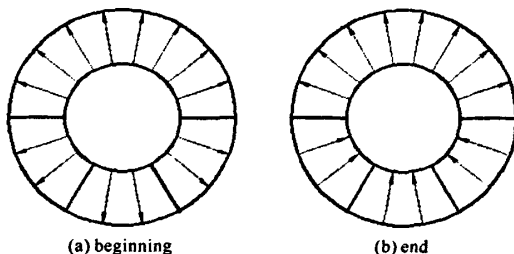


Fig. 1 E-field distribution at the cross section

图 1 模式变换始末端的截面电场分布图

• 收稿日期: 2007-09-06; 修订日期: 2008-01-29

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 陈代兵(1975—), 男, 博士生, 主要从事微波器件研究及微波测量等工作; Renture@sina.com。

其次,在剩下的 180° 的扇形波导中填充介质,介质的相对介电常数越大越好,原因是介质的相对介电常数越大,频率一定的微波在其中的导播波长越小,则微波在扇形截面波导中的相移常数越大。但介质的相对介电常数太大可能会引起反射损耗增大,匹配调节更加困难,因此需要根据情况选择相对介电常数适中的介质。

2 一体化天线的设计

高效率小型化 L 波段 MILO 的同轴输出结构为同轴内导体 $\phi 61\text{ mm}$,外导体 $\phi 120\text{ mm}$,器件的中心频率为 1.77 GHz 。微波信号经过模式变换后,再通过喇叭天线进行微波辐射,喇叭天线口面直径 $\phi 400\text{ mm}$,喇叭段长度 200 mm 。

根据小型化的需要,模式变换采用 4 个插板,对应 4 个分区(图 1),分别是 1 个 180° 分区波导和 3 个 60° 的分区波导。据已有数据,我们选用尼龙介质(相对介电常数为 3.2)作为 180° 分区波导内的移相介质。针对中心频率 1.77 GHz ,通过计算可以得到填充尼龙移相介质的 180° 分区波导内的导播波长为 9.61 cm ,而 60° 的分区波导内的导播波长为 37.75 cm ,因此可以得到模式变换器插板的长度为 6.4 cm 。为了实现从同轴波导 TE_{11} 模到圆波导 TE_{11} 模的转换,在同轴线内导体的末端设计成一个锥体。

图 2 为一体化天线的示意图。图 3 为 3 维远场方向图,从图可得到天线增益约 12.8 dB ,此时的一体化天线的长度约 264 mm (从插板开始到天线口面)。

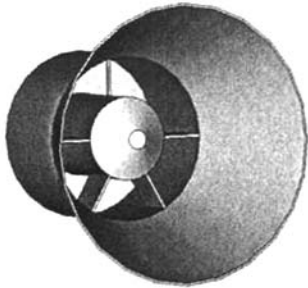


Fig. 2 Schematic of the integrated antenna

图 2 一体化辐射天线示意图

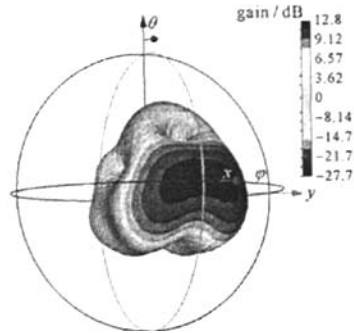


Fig. 3 3D far-field patterns of the integrated antenna

图 3 一体化辐射天线的 3 维远场方向图

图 4 是辐射天线反射系数曲线图,从图 4 可以看出,天线的驻波系数较大,需要优化。同时从方向图(图 3)可以看出, E 面方向图在 $\varphi=0^\circ$ 位置出现了凹坑,而 H 面方向图的最大值偏离了 $\theta=90^\circ$,因此首先需要对模式变换的长度进行优化。图 5 表示了一体化天线内的电场矢量分布图。图 6 表示进行参数扫描后不同的模式变换的长度条件下的 E 面和 H 面的方向图,图中的 l_2 表示模式变换的长度。综合图 6,选定模式变换的长度为 5.5 cm 。因此优化后反射系数如图 7 所示,可以看出,反射系数降低了很多,中心频率的反射系数从 0.42 降低到 0.19 ,而同时天线的增益得到了提高(从 12.3 dB 增大到 13.6 dB),如图 8 所示。

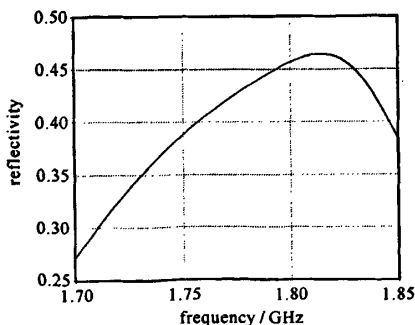


Fig. 4 Reflectivity of the integrated antenna

图 4 辐射天线反射系数曲线

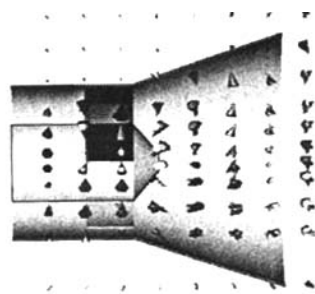


Fig. 5 Electrical field distribution of the integrated antenna

图 5 一体化天线的电场分布图

另外,为了进一步缩短一体化天线的长度,将模式变换部分直接放入喇叭段内,经过模式变换后直接进行微波辐射。图 9 表示进一步缩短的一体化辐射天线的示意图,图 10 为进一步缩短的一体化辐射天线的 3 维远场方向图,此时可得到天线增益约 13.8 dB ,一体化辐射天线的长度主要由喇叭段长度决定,为 200 mm 。

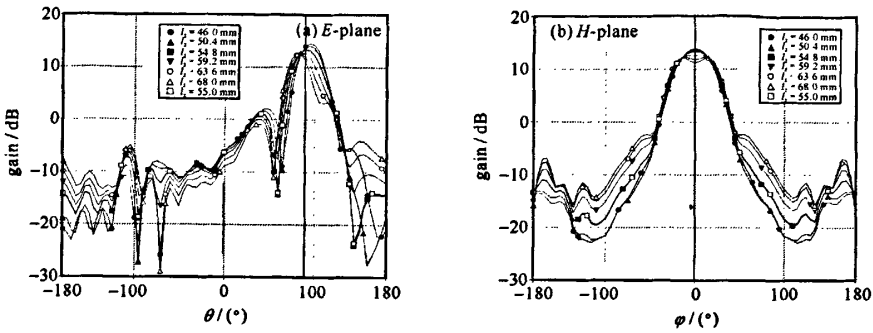


Fig. 6 Far-field patterns of E-plane and H-plane in different converter length

图 6 不同模式变换长度条件下的 E 面和 H 面方向图

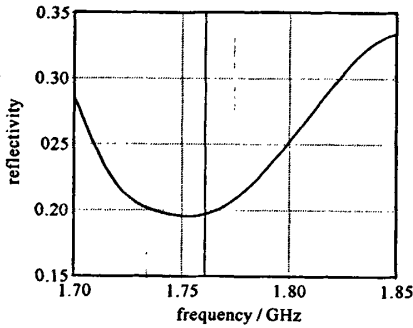


Fig. 7 Reflectivity of the optimized integrated antenna

图 7 优化后的辐射天线的反射系数

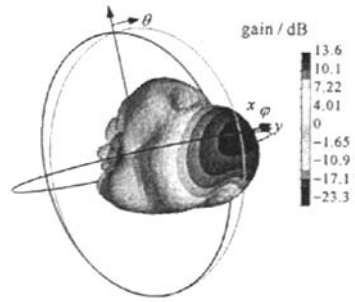


Fig. 8 3D far-field patterns of the optimized integrated antenna

图 8 优化后的一体化辐射天线的 3 维远场方向图

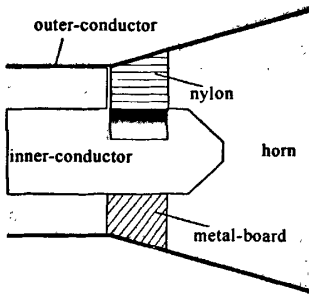


Fig. 9 Schematic of the further shortened integrated antenna

图 9 进一步缩短的辐射天线示意图

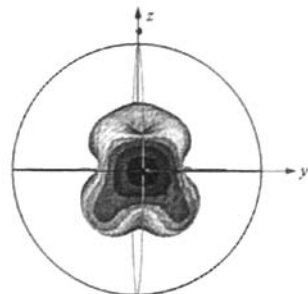


Fig. 10 3D far-field patterns of the further shortened integrated antenna

图 10 进一步缩短的一体化辐射天线的 3 维远场方向图

为了进一步证明介质+插板移相型在小型化方面的优势,将介质移相型、金属插板移相型和介质+插板移相型三者在实现模式变换时所需要的长度做了比较。按照模式变换器的原理,实现相位翻转的最短的模式变换长度 L 决定于

$$L = \pm \pi / (\beta_e - \beta_i) \quad (1)$$

式中: $\beta = 2\pi/\lambda_g$, 表示相移常数, λ_g 为扇形波导中的导波波长。则

$$L = \left| \frac{\lambda_{g1} \lambda_{g2}}{2(\lambda_{g2} - \lambda_{g1})} \right| \quad (2)$$

(1) 介质移相型: 采用的模型是在同轴传输波导内一半填充相对介电常数为 3.2 的尼龙, 另外一半扇形波导为真空, 因此有 $\lambda_{g1} = 0.09610 \text{ m}$, $\lambda_{g2} = 0.17786 \text{ m}$, 代入式(2)可得模式变换所需要的长度约为 0.105 m。

(2) 金属插板移相型: 采用的模型类似图 2 所示, 分区结构为 3 个 60° 扇形波导和 1 个 180° 扇形波导, 波导内均为真空, 因此有 $\lambda_{g1} = 0.37751 \text{ m}$, $\lambda_{g2} = 0.17786 \text{ m}$, 代入式(2)可得模式变换所需要的长度约为 0.168 m。

(3) 介质+插板移相型: 采用的模型如图 2 所示, 因此有 $\lambda_{g1} = 0.37751 \text{ m}$, $\lambda_{g2} = 0.09610 \text{ m}$, 代入式(2)可得模式变换所需要的长度约为 0.064 m。

通过上述的比较可以得出,介质+插板移相型的模式变换器在实现相同的模式变换时所要求的长度最短。同样,在达到相同的相移条件下,基于该模型的高功率微波移相器具有尺寸较短的优点。

3 结 论

本文提出了介质+插板移相型的模式变换器,并根据所设计的小型化的 MILO 的输出结构参数,设计了可以用于小型化 L 波段 MILO 的一体化辐射天线,给出了一体化辐射天线的方向图、增益、物理长度等特性的研究结果,并比较了介质移相型、金属插板移相型和介质+插板移相型三者 in 实现模式变换时所需要的长度,结果表明介质+插板移相型的模式变换器可以极大地缩短模式变换器的物理长度,并且在达到相同的相移条件下,基于该模型的高功率微波移相器也将具有尺寸较短的优点。

参考文献:

- [1] 陈代兵,周海京,刘庆想,等.圆波导斜劈辐射天线的实验研究[J].强激光与粒子束,2002,14(4):595-598. (Chen D B, Zhou H J, Liu Q X, et al. Experimental research of a circular waveguide bevel cut radiation antenna. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(4):595-598)
- [2] 周海京,丁武,刘庆想.VLASOV 天线的研究[J].强激光与粒子束,2002,14(3):431-433. (Zhou H J, Ding W, Liu Q X. Research on VLASOV type antenna. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(3):431-433)
- [3] Yang S W, Li H F. Numerical modeling of 8 mm TM_{01} - TE_{11} mode converter[J]. *Infrared and Millimeter Waves*, 1996, 17(11):1935-1943.
- [4] Eisenhart R L. A novel wideband TM_{01} - TE_{11} mode converter[J]. *IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques*, 1988, 1(11):249-252.
- [5] 陈代兵,范植开,周海京,等.L 波段硬管磁绝缘线振荡器的研制[J].强激光与粒子束,2007,19(8):1352-1356. (Chen D B, Fan Z K, Zhou H J, et al. Investigation of L-band hard-tube magnetically insulated transmission line oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(8):1352-1356)
- [6] 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,2005,17(8):1256-1258. (Xu F K, Zhou H J, Ding W. Design of improved COBRA lens antenna. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(8):1256-1258)
- [7] 刘庆想,袁成卫.一种新型同轴 TEM-圆波导 TE_{11} 模式变换器[J].强激光与粒子束,2004,16(11):1421-1424. (Liu Q X, Yuan C W. A new type of coaxial TEM- TE_{11} mode converter. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(11):1421-1424)
- [8] 袁成卫,刘庆想,钟辉煌.大尺寸模式转换天线的设计和实验研究[J].强激光与粒子束,2005,17(9):1405-1408. (Yuan C W, Liu Q X, Zhong H H. Design and experiment research on an oversize mode-transducing antenna. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(9):1405-1408)

Integrated radiation antenna of L-band magnetically insulated transmission line oscillator

CHEN Dai-bing^{1,3}, FAN Zhi-kai¹, ZHOU Hai-jing², WANG Dong¹

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1015, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088, China;

3. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: According to the requirement of miniaturization, a kind of radiation antenna model integrated with mode converter for the compact L-band magnetically insulated transmission line oscillator(MILO) is put forward. The model uses dielectric and metal board for phase shift. It can greatly shorten the physical length of the mode converter. Based on this model, an integrated radiation antenna is investigated. The radiation antenna is designed and optimized by numerical calculation. The antenna's characteristics such as far-field patterns, gains and physical length are also obtained.

Key words: Magnetically insulated transmission line oscillator; Antenna; High power microwave; L-band

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>