

文章编号: 1001-893X(2012)10-1652-06

微带 Rotman 透镜的分析与改进设计^{*}

刘熠志

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘要:对微带 Rotman 透镜的分析与设计方法进行了研究。针对几个制约微带 Rotman 透镜性能的因素, 采取了多项改进措施。介绍了一种以平面薄膜电阻为吸收负载的旁壁结构, 减少了透镜的体积和重量。为实现端口最佳波束指向, 采用了一种优化的端口结构。采用了一种新型的传输线结构, 消除了传统传输线结构中出现的尖锐拐角, 实现了良好的匹配性能。设计了一个高交叠电平的微带 Rotman 透镜, 分别采用等效口径理论和仿真软件对微带 Rotman 透镜进行分析, 仿真结果与理论值非常吻合, 交叠电平仿真值大于 -1.5 dB。

关键词: Rotman 透镜; 微带; 多波束; 交叠电平; 改进设计

中图分类号: TN823 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.10.019

Analysis and Improved Design of Microstrip Rotman Lens

LIU Yi-zhi

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: The analysis and design method of microstrip Rotman lens is studied. According to the factors limiting the performance of microstrip Rotman lens in usual design, several measures are presented to improve the performance. First, a new sidewall absorption structure using planar resistor as absorption load is introduced to simplify microstrip Rotman lens' geometry. As a result, the size and weight are largely reduced. Second, in order to attain the best beam pointing of each port, an improved port structure is adopted. Third, an improved transmission line structure is used to eliminate a small angle corner at traditional feed network, which attains good match performance. Finally, a high beam crossovers microstrip Rotman lens is designed. The lens is analysed using two dimensional aperture theory and electromagnetic full wave simulated software HFSS. The analysis results are presented and compared. The comparison shows that simulation results agree well with theory and the simulated beam crossovers is larger than -1.5 dB.

Key words: Rotman lens; microstrip; multiple beam; beam crossovers; improved design

1 引言

在很多雷达和通信系统中, 需要天线实现多波束。天线实现多波束形成和波束扫描有两种类型: 相控阵和多波束天线。相控阵需要大量的有源 TR 组件, 成本高, 结构复杂。多波束天线由多波束形成网络和天线阵面组成, 其中 Rotman 透镜是一种最常用的多波束形成网络^[1-2], Rotman 透镜利用波束口

到天线阵上各个单元的光程差来确定波束指向, 是一种“time-delay”波束形成器, 理论上波束指向与工作频率无关, 频率变化时波束指向固定不变, 实际上由于信号传输线的色散以及辐射天线有一定的工作带宽, 因此不可能是真的与频率无关, 但它具有很宽的频带。Rotman 透镜天线具有两种实现形式: 微带或带状线型 Rotman 透镜、波导型 Rotman 透镜。波导型 Rotman 透镜的优点是插入损耗低^[3]。微带或带状线型 Rotman 透镜的电路简单, 体积小, 重量轻, 设计灵

^{*} 收稿日期: 2012-08-02; 修回日期: 2012-09-12

3 微带 Rotman 透镜的改进设计

微带 Rotman 透镜的常见结构如图 3 所示^[4],从图中可以看出微带 Rotman 透镜由波束口(input ports)、透镜腔体、阵列口(output ports)、虚端口(吸收端口)、传输线等组成。图中透镜腔体两旁的虚端口连接到同轴匹配负载上,用来吸收传输到虚端口上的电磁波,避免这部分能量在透镜腔体内多次反射导致阵列口的幅度相位分布恶化,但采用同轴匹配负载增大了整个透镜的体积和重量,并且价格较高。另外,从图中可以看出,传统的传输线结构存在一个尖尖的锐角,在该拐角处反射很大,很难实现良好的匹配。针对传统微带 Rotman 透镜结构存在的问题,对微带 Rotman 透镜的结构进行了研究并提出了一些改进措施。

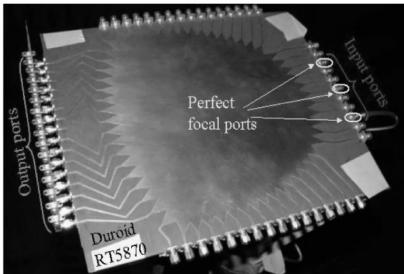


图 3 传统微带 Rotman 透镜结构

Fig.3 Traditional geometry of microstrip Rotman lens

为了简化虚端口结构,实现结构一体化,采用平面薄膜电阻作为虚端口的吸收负载,图 4 是改进后的吸收负载结构示意图,薄膜电阻通过特性阻抗相同的微带线连接到虚端口,另一端接一段微带开路短截线,微带开路短截线的长度约为介质波长的 1/4。采用该吸收负载结构后,整个透镜结构印制在一块带电阻层的介质板上,加工容易,结构简单,便于电路集成。

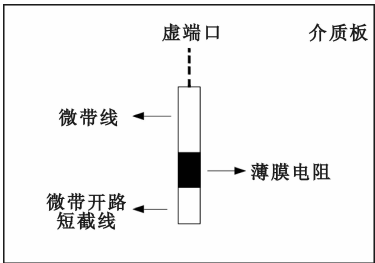


图 4 平面薄膜电阻吸收负载结构

Fig.4 Structure of planar resistor for dummy port

为了改善阵列口后传输线的匹配性能,对图 3 所示的传输线传统结构进行了改进,采用了如图 5 所示的新型结构传输线。新结构传输线与传统结构相比,在传统结构的锐角处增加了一段过渡传输线段,从而消除了锐角,新结构的所有拐角都是钝角或直角,通过对这些拐角进行切角匹配,可以使传输线实现良好的匹配。传输线新结构包括 6 个拐点,对其设计就是要确定这些拐点的坐标,设计方法可以归纳如下:首先根据设计出的阵列口轮廓线和输出端口位置确定 P_1 、 P_2 、 P_5 、 P_6 点坐标(其中,也可对线段 P_1P_2 和 P_5P_6 的长度和倾斜方向进行优化选择),然后给定合适的线段 P_3P_4 长度和 P_3 的 x 坐标,根据设计得出的传输线长度计算出 P_3 、 P_4 的 y 坐标,最后计算相邻传输线的间距,间距足够大时,表明设计效果好,不然重复上述设计过程直至达到理想设计效果。根据经验可知,通常一次设计就可以达到合适的设计结果。

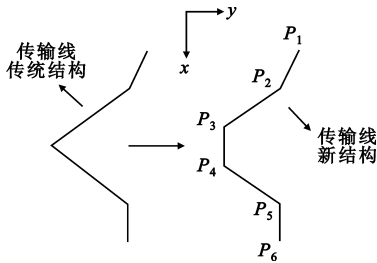


图 5 传输线新结构示意图

Fig.5 Structure of new transmission lines

在微带 Rotman 透镜中采用传输线渐变张开段作为透镜端口,端口等效为一个口径场均匀分布的二维辐射口径,根据文献研究可知^[5-6],端口的波束指向对准对面轮廓中点时最佳。实际上透镜的端口波束指向往往不能自然实现最佳指向,只有当透镜的轮廓线是以对面轮廓线的中点为圆心的圆弧时,口径方向沿着轮廓线的端口的波束指向是最佳的。在实际设计中,透镜的轮廓线曲率可能偏大或偏小。为了优化端口的波束指向,可以对端口的结构进行改进。一种最简单的做法是在设计端口结构时,令端口的口径方向垂直于最佳波束指向,而不是沿着透镜轮廓线方向,设计示意图如图 6 所示,从图中可以看出端口呈交错排列位置关系,相邻端口间存在遮挡,甚至可能产生交叠。在本文中,采用了一种新型结构的端口结构如图 7 所示。该端口的口径方向

沿着透镜轮廓线,从而避免了端口间的遮挡或交叠,端口由两部分组成,分别是线性渐变段和直角三角形过渡段,该端口的波束指向介于透镜轮廓线的法线方向和线性渐变段的对称轴方向之间,因此,通过选择合适的对称轴方向可以优化端口波束指向。

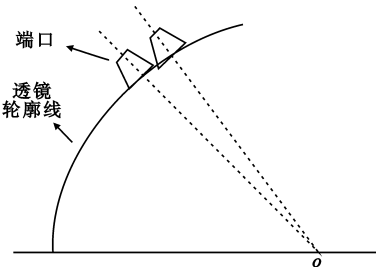


图 6 交错排列的端口结构图
Fig. 6 Structure of staggered port

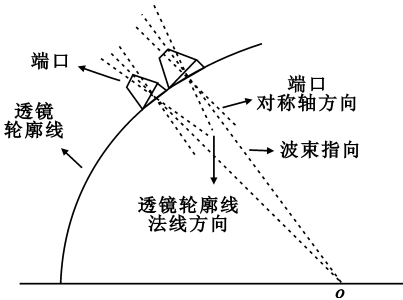


图 7 改进的端口结构图
Fig. 7 Improved structure of port

4 微带 Rotman 透镜的设计结果

根据前面介绍的改进设计方法,设计了一个微带 Rotman 透镜,该透镜的频带比较宽(37 ~ 41 GHz),共有 3 个波束,要求实现高的交叠电平,相邻波束的交叠电平大于 -1.5 dB,相邻波束的角度间隔为 2°。经过优化,确定透镜的参数为: $\alpha = 2.7^\circ$, $\beta = 2^\circ$, $F = G = 75\text{ mm}$,波束口个数为 3,阵列口个数为 18, $d = 6.72\text{ mm}$ 。整个透镜印制在一块介电常数 2.2、厚 0.254 mm 的介质板上。采用 HFSS 仿真软件对该微带透镜进行建模并仿真,图 8 是该微带 Rotman 透镜的仿真模型。在该仿真模型中,在波束口和阵列口设置波导端口(waveport),通过仿真可以得到各个波束口激励时,阵列口上的幅度和相位,由此可以计算出形成的波束方向图。

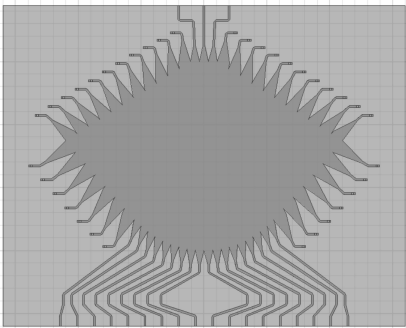
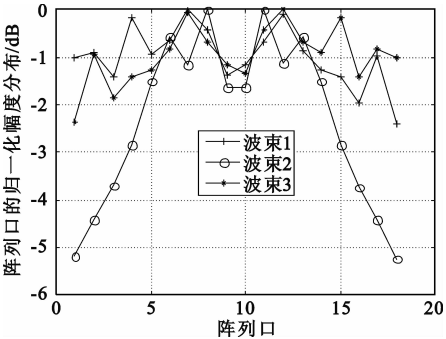
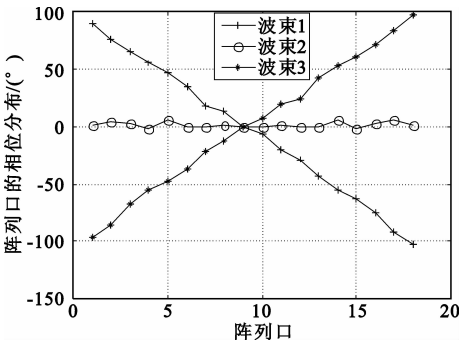


图 8 微带 Rotman 透镜的仿真模型
Fig. 8 Simulated model of microstrip Rotman lens

图 9(a)、(b)分别是 39 GHz 仿真得到的阵列口幅度和相位分布,图 10(a)是 39 GHz 由仿真的阵列口幅相分布计算出的波束方向图,图 10(b)是基于等效口径理论分析得到的 39 GHz 的理论方向图,对比图 10(a)、(b)可知,两者非常吻合,验证了本文分析与设计方法的正确性。该微带 Rotman 透镜具有非常宽的带宽,两个边频 37 GHz 和 41 GHz 的仿真结果如图 11 ~ 13 所示,图 11 ~ 13 分别是 37 GHz 和 41 GHz 时的阵列口幅度分布、相位分布和形成的波束方向图。

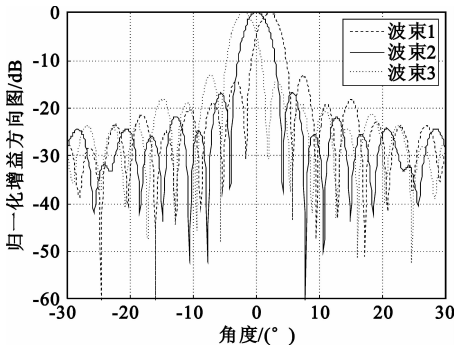


(a)39 GHz 阵列口仿真的幅度分布

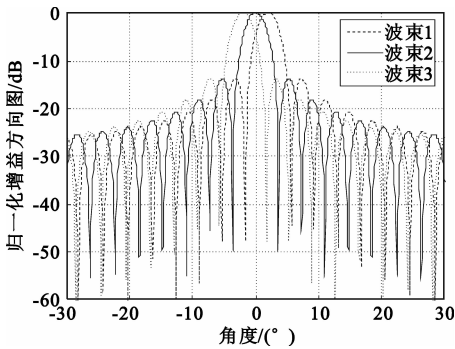


(b)39 GHz 阵列口仿真的相位分布

图 9 中心频率上阵列口仿真的幅相分布
Fig.9 Simulated magnitude and phase distribution of array ports at center frequency

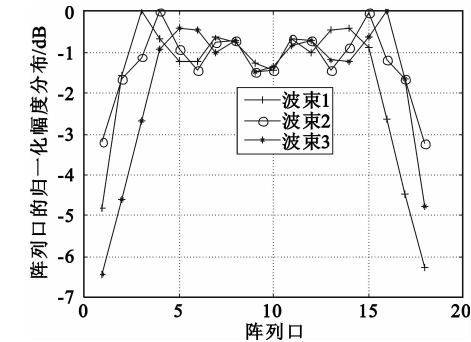


(a)39 GHz 基于仿真形成的方向图

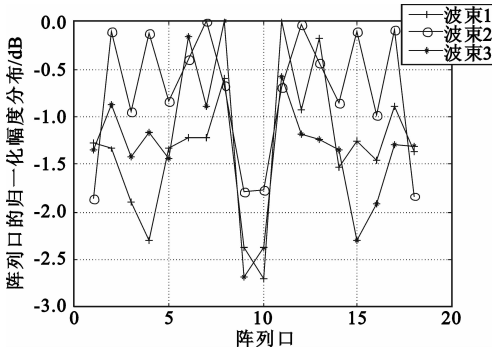


(b)39 GHz 的理论方向图

图 10 中心频率上的仿真方向图和理论方向图
Fig.10 Simulated and theoretical gain pattern at center frequency

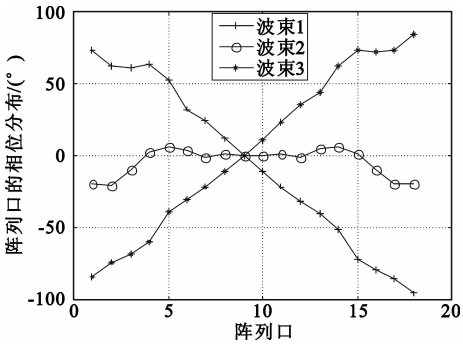


(a)37 GHz 阵列口仿真的幅度分布

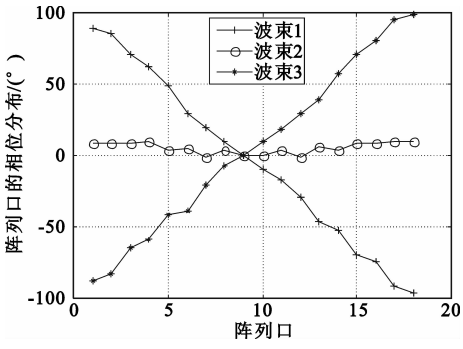


(b)41 GHz 阵列口仿真的幅度分布

图 11 边频上阵列口仿真的幅度分布
Fig.11 Simulated magnitude distribution of array ports at edge frequency

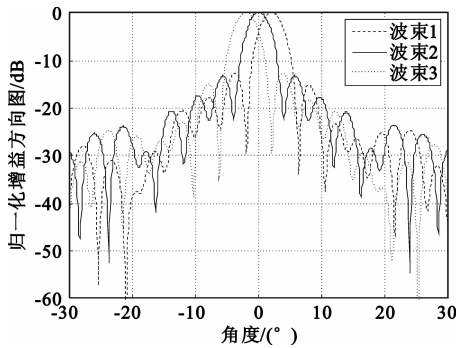


(a)37 GHz 阵列口仿真的相位分布

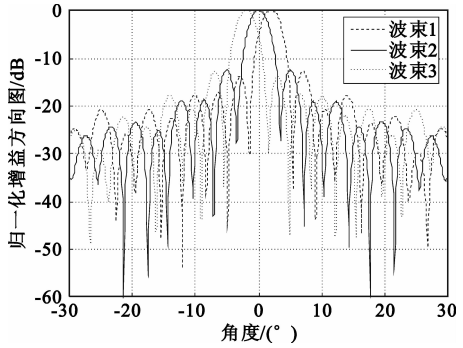


(b)41 GHz 阵列口仿真的相位分布

图 12 边频上阵列口仿真的相位分布
Fig.12 Simulated phase distribution of array ports at edge frequency



(a)37 GHz 的仿真方向图



(b)41 GHz 的仿真方向图

图 13 边频上的仿真方向图
Fig.13 Simulated gain pattern at edge frequency

从图 9~13 的仿真结果可知,该微带 Rotman 透镜形成的波束方向图达到了理想的效果,与理论结果比较吻合,阵列口相位分布误差基本上小于 10° ,副瓣电平约为 -13 dB,波束宽度为 3.3° 左右,相邻波束的交叠电平大于 -1.5 dB,计及整个微带 Rotman 透镜的介质损耗和金属损耗仿真得到的插入损耗为 -5.5 dB 左右。从上述仿真结果还可以看到,高频时阵列口的幅度分布起伏变小,经过分析认为端口与透镜腔体之间的匹配是引起幅度分布起伏的一个主要原因,高频时端口的口径电尺寸变大,匹配效果更好,因此阵列口的幅度分布起伏变小。同理,为了改善低频时阵列口的幅度分布可以增大透镜尺寸,这是一个综合权衡的设计过程。

5 结 论

对微带 Rotman 透镜的传统结构中几个制约透镜性能的因素进行了研究,介绍了微带 Rotman 透镜的改进设计方法,并对所采用的改进措施进行了验证。采用平面薄膜电阻取代同轴负载作为虚端口的吸收负载,简化了透镜结构,减少了透镜的体积和重量。采用了一种新型的传输线结构,避免了传统传输线结构中出现的尖锐拐角,明显改善了传输线的匹配性能。对实现端口最佳波束指向的端口结构进行了研究,介绍了一种优化的端口结构形式。根据本文介绍的微带 Rotman 透镜的改进设计方法,设计了一个宽频带、高交叠电平的微带 Rotman 透镜,分别采用 HFSS 仿真和二维等效口径场理论进行分析,仿真结果和理论分析结果非常吻合,验证了所用分析与设计方法的正确性。进一步设计微带 Rotman 透镜的辐射阵列、对微带 Rotman 透镜进行实物加工和测试是后续要开展的工作。

参考文献:

- [1] Rotman W, Turner R F. Wide-Angle Microwave Lens for Line Source Applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1963, 11(11): 623 - 632.
- [2] Dong Junwei, Zaghoul A I, Sun Rensheng, et al. EHF Rotman Lens for Electronic Scanning Antennas [C]//Proceedings of 2008 Asia-Pacific Microwave Conference. Macau: IEEE, 2008: 1 - 4.
- [3] 李峰, 刘熠志. 低副瓣多波束 Rotman 透镜天线设计 [J]. 电讯技术, 2011, 51(10): 92 - 98.
Li Feng, Liu Yi-zhi. A Low Sidelobe Rotman Lens Antenna with Multi-Beams [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(10): 92 - 98. (in Chinese)
- [4] Kilic O, Dahlstrom R. Rotman Lens Beam Formers for Army Multifunction RF Antenna Applications [C]//Proceedings of 2005 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Society. Washington DC, US: IEEE, 2005: 43 - 46.
- [5] Musa L, Smith M S. Microstrip port design and sidewall absorption for printed Rotman lenses [J]. IEE Proceedings Microwave Antennas and Propagation, 1989, 136(2): 53 - 58.
- [6] 姜海玲, 纪学军. 微带 Rotman 透镜的设计与软件分析 [J]. 无线电工程, 2006, 36(1): 45 - 46.
JIANG Hai-ling, JI Xue-jun. Design and Software Analysis of Microstrip Rotman Lens [J]. Radio Engineering of China, 2006, 36(1): 45 - 46. (in Chinese)
- [7] Hansen R C. Design Trades for Rotman Lenses [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991, 39(4): 464 - 472.

作者简介:

刘熠志(1982—),男,安徽安庆人,分别于 2003 年和 2006 年获武汉大学学士学位和硕士学位,现为工程师,主要研究方向为天线理论与设计。

LIU Yi-zhi was born in Anqing, Anhui Province, in 1982. He received the B.S. degree and the M.S. degree from Wuhan University in 2003 and 2006, respectively. He is now an engineer. His research concerns antenna theory and design.

Email: yzhliuq@163.com