

用于智能天线测试的低成本可调功分移相电路设计

李婵娟 傅世强 邵特

(大连海事大学 信息科学技术学院 大连 116026)

摘要: 为满足智能天线的波束赋形要求,设计一种用于微波暗室智能天线方向性测试的可调功分移相微带电路。该电路由 Wilkinson 功分器、 π 型电阻衰减器、加载线型移相器和同轴传输线级联而成。利用 HFSS 仿真软件优化设计了工作于 TD-LTE 的 F 频段功分比 $1:2:2:1$,依次相差 105° 的一分四电路结构,并进行了实物加工和测试。实测结果表明,电路输入输出驻波比均小于 1.3,幅度误差小于 0.6 dB,相位误差小于 3° 。该电路结构制作成本低,幅相分配易于调整,满足测试应用需求。

关键词: 智能天线;Wilkinson 功分器;电阻衰减器;加载线移相器

中图分类号: TN62 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Design of a low-cost adjustable power divider and phase shifter circuit for smart antenna testing

Li Chanjuan Fu Shiqiang Shao Te

(School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to satisfy the requirements of smart antenna beam-forming, an adjustable power-splitter and phase-shifter microstrip circuit has been developed for radiation pattern measurement of smart antenna in microwave anechoic. The circuit is composed of Wilkinson power divider, π -type resistance attenuator, loaded line phase shifter and cascade of a coaxial transmission line. The one-to-four power-divider and phase-shifter microstrip circuit has been realized with power ratio $1:2:2:1$ and sequence phase difference 105 degrees in TD-LTE F band. Simulation software of HFSS was used to optimize the design of the circuit. And the circuit was fabricated and measured. The measured results show that the input VSWR is less than 1.2 with the amplitude error less than 0.5 dB and the phase error less than 3° . The structure of the circuit is of low cost, and the distribution of the amplitude and phase is easy to adjust. It can meet the needs of the testing application.

Keywords: smart antenna; Wilkinson power divider; resistance attenuator; loaded line phase shifter

1 引言

随着移动通信技术 TD-LTE 的发展,系统用户数量不断增加。智能天线技术^[1]能够提高系统的容量,扩大小区的覆盖范围,提高信号的质量并增大数据传输速率。在智能天线中,波束赋形是最重要的一项关键技术,为了保证赋形的正确性和可靠性,阵列中各单元的幅度和相位分配尤为重要^[2]。功分移相器是幅相分配电路的关键部件,要求其在系统工作频带内具有较大的回波损耗,稳定的功率分配比,线性的相位输出。文献[3]设计了大下倾角电调基站天线的移相器及馈电网络,应用于 GSM1800 频段并取得了良好的幅度变化和大下倾角所需的移相量。文献[4]提出一种用于移动通信电调天线的功分移相器,通过介质滑

动来改变相位,通过局部阻抗匹配保证稳定的功率分配。介于现代阵列天线组阵要求能量不等比分配的情况,文献[5]基于 Wilkinson 功分器原理,设计了用于天线阵馈电的高隔离度一分八不等比功分器。近年来,宽频带的功分移相器^[6-7]、数字集成化的功分移相器^[8-9]均得到了广泛的研究,取得的一些成果为功分移相电路的发展提供了较好的借鉴。

由于在微波暗室测量智能天线辐射特性时,没有实际的数字波束赋形^[10]部分,需要用一个可调功分移相馈电网络来给被测的 TD-LTE 基站天线馈入信号。采用文献[3-5]提出的功分移相馈电网络,虽功能满足要求,但制作成本高、电路复杂。本文针对 TD-LTE 的 F 频段(1880~1920 MHz),设计了一种用于微波暗室天线测试的无源功

分移相模块电路。该电路结构简单、成本低,可根据不同的实际需要进行幅相修改,易于实现和调试。论文给出了详细设计思路和实验结果,为其他相控阵天线方向性测试提供了一种思路。

2 电路结构设计

馈电功分移相电路的主要任务是保证各阵元能够激励起所要求的幅度和相位,形成所需的最佳方向性图。为了实现波束扫描,需要固定的相移,同时合理地分配各个端口输出功率,可以很好地抑制副瓣电平。本文设计的功分比为 $1:2:2:1$,依次相差 105° 的一分四的电路结构。该电路由威尔金森功分器、电阻衰减器、加载线微带移相器和同轴传输线组成,如图 1 所示,同轴传输线连接详见电路加工实物图。

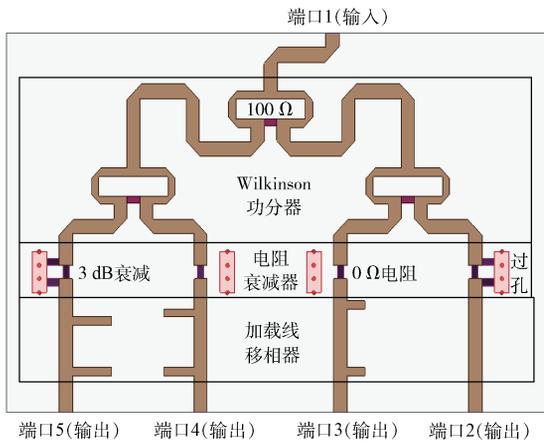


图 1 设计的功分移相电路结构

幅度分配采用了 Wilkinson 功分器和电阻衰减器相结合的方式,实现各支路不等幅输出。由于在暗室中进行方向性测试^[11],不是实际工程中的大功率应用,因此采用能量衰减的方式控制功分比是可行的。Wilkinson 功分器设计已非常成熟,文献[12]给出了不同级联方式的 Wilkinson 功分器的性能比较。本文的 Wilkinson 功分器采用一分二后再分二的等功率输出电路结构,每个端口都匹配到 $50\ \Omega$ 阻抗系统。经过四路输出后,在不考虑传输线损耗的情况下,其每路输出功率降低 6 dB。为了实现中间两路(端口 3 和端口 4)输出功率高,是边缘两路(端口 2 和端口 5)输出功率的 2 倍,采用电阻衰减器将边缘两路输出功率衰减 3 dB。为降低电路结构的复杂性,减小电阻接地电感,采用 π 型电路结构,另外为了保持各个支路的一致性,并且便于修改各个支路的功分比,每个支路均留有衰减器电路位置,本设计中中间两路放置 $0\ \Omega$ 电阻,实现 0 dB 衰减。

在幅度分配完成之后,相位分配采用加载线微带移相器和同轴传输线相结合的方式,实现各支路依次 105° 相移要求。由于加载线型移相器在实现小相移时,具有结构简单、移相精度高的特点^[13],所以小度数 15° 、 30° 、 45° 相移,采

用加载线型微带电路结构。加载的并联枝节长度越长,相移度数越大。为获得最佳的匹配,并联枝节之间的传输线段通常取 $\lambda_g/4$, λ_g 是中心频率处介质波长,并且随着并联枝节长度的加大,即移相度数的增加,需要减小并联枝节之间的传输线长度。加载的并联开路微带枝节相当于在电路中并联电容,如图 2 的 Smith 圆图所示,给出了两种移相情况的对比,第一种小角度移相,并开路枝节移动轨迹 OA,串联微带传输线移动轨迹 AB,再次并联开路枝节移动轨迹 BO,实现匹配;第二种大角度移相,并开路枝节移动轨迹 OM,串联微带传输线轨迹 MN,再次并联开路枝节移动轨迹 NO,实现匹配。可见,为了保证端口匹配,串联的微带线长度略小于四分之一介质波长,随着移相度数增大长度需进一步减小,并且大角度移相时,电路的 Q 值较高,必然带来匹配带宽的减小。由于设计任务要求依次 105° 相移,加载线仅仅实现了依次 15° 的移相,剩下的依次 90° 移相采用同轴电缆传输线的形式,保证电缆长度依次相差四分之一介质波长即可。

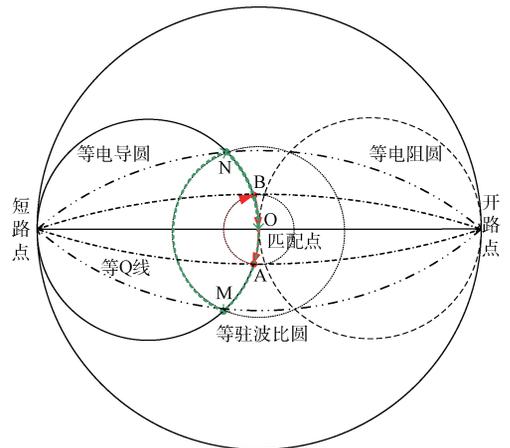


图 2 加载微带线移相匹配原理图

3 仿真与实测

运用 HFSS 仿真软件对所设计的功分移相电路进行仿真实验,使用介电常数 $\epsilon_r = 2.65$,厚度 $h = 2\ \text{mm}$ 的微波介质材料基板,损耗角正切 $\tan D$ 为 0.0015,仿真过程中暂不考虑同轴传输线的影响,仿真模型电路如图 1 所示。仿真得到的各端口的匹配结果曲线如图 3 所示,由图可知,在 $1880 \sim 1920\ \text{MHz}$ 的频率范围内,各端口的输入匹配较好,反射系数均小于 $-25\ \text{dB}$,另外可以看出,输出端口的匹配带宽不一致,端口 5 匹配带宽最窄,原因是端口 5 移相度数最大,符合前面高 Q 值窄带的解释;端口间的功分和隔离曲线如图 4 所示,从图中可以看出,各输出端口的插入损耗分别为 $S_{21} = -9.3\ \text{dB}$, $S_{31} = -6.3\ \text{dB}$, $S_{41} = -6.2\ \text{dB}$, $S_{51} = -9.2\ \text{dB}$,实现了要求的各输出端口功分比,另外,各输出端口的隔离度均超过 $20\ \text{dB}$ 以上;仿真的输出端口相

位随频率变化曲线如图5所示,在工作频带内相移实现了依次相差 15° 要求,但是偏离工作频率后,受到曲线斜率的影响,相移误差增大,当引入电长度 90° 同轴传输线后,只有中心频率处才是准确的 90° 相移,因此这种移相器设计是窄带的。

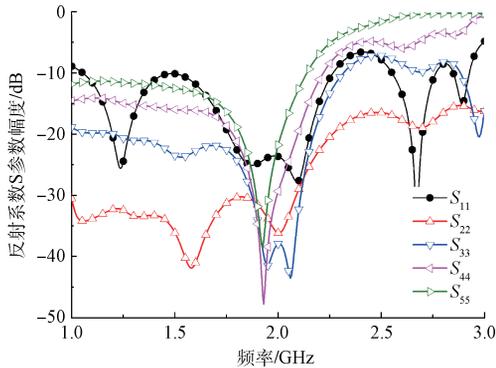


图3 各端口反射系数随频率变化仿真结果

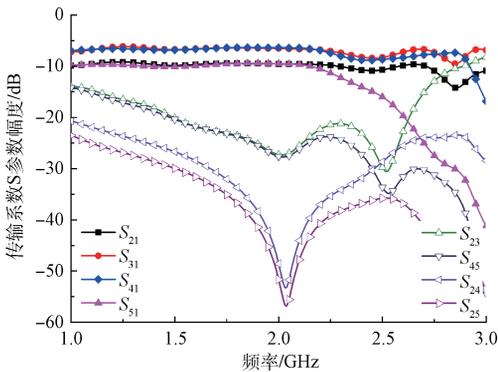


图4 端口间传输系数随频率变化仿真结果

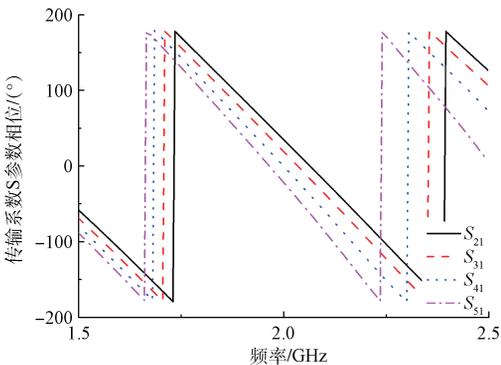


图5 输出端口相位随频率变化仿真结果

经过大量的电磁仿真优化,最终得到几点规律便于调试参考:1)功分器级联过程中,一分二功分后再级联功分器时,级联之间的微带线长度满足 $3/4$ 介质波长时,整个电路的功分匹配带宽最宽;2)加载线移相器枝节长度增加可增大移相度数,长度减小可减小移相度数,并且在小范围内微

调移相度数,不会明显恶化输入输出驻波比;3)衰减器电阻可根据需要改变阻值实现任意功分比,同轴传输线长度可调整长度差实现需要的移相度数,电路设计具有较大的灵活性。

根据 HFSS 仿真优化得到的尺寸,加工制作实物,加工的功分移相电路整体实物如图6所示。实物图中引入同轴传输线,各端口间电缆电长度相差 90° 。实际由于线长误差,对移相精度会造成影响,可根据仿真得到的规律指导实物调试。实验测试使用矢量网络分析仪 Agilent N5230A,实测在 $1880\sim 1920$ MHz 的频率范围内输入驻波比小于1.2,中心频率处输出特性最终测试数据见表1,可知幅度误差小于0.6 dB,相移误差小于 3° 。实测数据的插入损耗比仿真稍有增加,主要原因是仿真没考虑接头和线缆的损耗,以及测试误差;相位误差可通过修正加载线微带移相器并联枝节长度来进一步降低。总体来说,该功分移相电路实现了需要的电路功能。

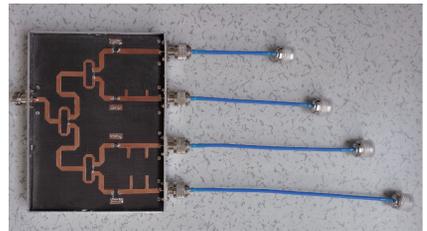


图6 所设计电路加工实物图

表1 中心频率处实测传输特性结果

输出端口号	插入损耗/dB	输出相位/($^\circ$)	输出驻波比
2	-9.6	21.0	1.12
3	-6.5	-86.1	1.22
4	-6.6	167.8	1.17
5	-9.8	63.7	1.28

4 结 论

本文在仿真设计的基础上设计并实现了用于暗室测试智能天线波束扫描的不等幅功分移相电路。提供了一种低成本的设计思路,通过威尔金森等功分器结合电阻衰减器实现各支路不等幅输出;通过改变同轴传输线物理长度实现中心频率附近的大角度相移粗调,同时通过修正加载微带线长度实现中心频率附近的小角度相移微调,从而达到任意幅度比和任意相位输出的要求。制作了 TD-LTE 的 $1880\sim 1920$ MHz 频段功能电路,并进行了测试,实验结果表明该结构性能优良,易于调谐,便于开发其他频段的模块电路,完全满足应用需求,为类似的天线测试提供了较好的参考价值。

参考文献

- [1] 马颖,金婧,刘光毅. TD-LTE 基站智能天线性能分

- 析[J]. 电信科学, 2012(11):142-147.
- [2] 张向鹏,余建国,邹丽红,等. TD-LTE 系统中的一种智能天线校准的方法[J]. 电信科学, 2012(3):62-67.
- [3] 江椿,代喜望,焦永昌,等. 大下倾角电调基站天线移相器及馈电网络设计[J]. 微波学报, 2010(S2):200-203.
- [4] 张晓,薛锋章,赖展军. 用于移动通信电调天线的宽频移相器[J]. 微波学报, 2014, 30(4):63-66.
- [5] 徐焯,刘永良,蒋学斌. 用于天线阵馈电的高隔离度一分八不等比功分器设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(4):111-115.
- [6] 曾会勇,宗彬锋,王光明,等. 基于单一左、右手传输线的宽带 180°移相功分器[J]. 压电与声光, 2015, 37(1):13-16.
- [7] 刘文,王敏,李有权. 宽频功分移相器性能仿真分析[J]. 空军雷达学院学报, 2012, 26(6):431-433.
- [8] 安士全,郭本青. 一种 X 波段五位数字移相器的研究与设计[J]. 雷达与对抗, 2013, 33(4):28-31.
- [9] 郝金中,张瑜,周扬. 一种宽带多通道瓦片式 T/R 组件的研制[J]. 电讯技术, 2015, 55(1):108-112.
- [10] 张书仙,李璐,潘点飞. 基于数字波束形成的多目标测控[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(8):73-77.
- [11] 王亚海,刘伟,常庆功. 170~325GHz 频段天线测试系统方案设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(12):1195-1199.
- [12] 徐琰,韩淑萍,王俐聪. 三种一分三路等功率分配器的性能比较[J]. 制导与引信, 2012, 33(3):41-45.
- [13] 吴贻伟,朱旗. 小型化 L 波段四位数字移相器[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(10):843-849.

作者简介

李婵娟, 1982 年出生, 工程师, 主要从事微波技术与天线方面的实验测量研究。

E-mail:lichj2011@dlmu.edu.cn

傅世强, 1981 年出生, 副教授, 主要从事天线与射频电路方面的教学和科研工作。

E-mail:fushq@dlmu.edu.cn

邵特, 1991 年出生, 博士研究生, 主要从事电磁数值计算和射频微波器件的设计研究。

E-mail:shortt@dlmu.edu.cn

NI 发布 VirtualBench 多功能一体式仪器增强版

新版 VirtualBench 为使用台式测试设备的工程师提供了更多功能

2016 年 4 月 8 日, NI (美国国家仪器公司, National Instruments, 简称 NI) 作为致力于为工程师和科学家提供解决方案来应对全球最严峻的工程挑战的供应商, 近日宣布推出了全新的高性能 VirtualBench。软件定义的 VirtualBench 多功能一体式仪器结合了混合信号示波器、函数发生器、数字万用表、可编程直流电源和数字 I/O。通过 350 MHz 的带宽、4 个模拟通道和以太网连接, 新版 VirtualBench 提供了更多的功能来帮助工程师标定和调试新设计或自动化测试系统。

“自从我们向市场推出 VirtualBench 以来, 它的多功能性和实用性都为用户创造了可观的效益,” NI 数据采集研发部副总裁 Stefanie 表示, “在这个新版本中, 我们集成了更高的性能和更多的功能, 为工程师与台式测试设备的交互开创了更多可能性。”

用户仍然可以通过在 PC 或 iPad 上运行的免费可升级软件应用程序与 VirtualBench 交互, 通过统一的软件轻松玩转 5 种仪器。由于 VirtualBench 采用的是最新的消费

计算平台, 工程师和科学家可以使用多点触控显示屏、多核处理器、无线连接和直观的界面来操作仪器, 从而提高生产效率。此外, 软件提供的简便性和更高性能使得工程师能够更有效地进行电路调试和验证。

主要优势

1) 增强的混合信号示波器, 具有协议分析功能, 提供了 350 MHz 的带宽和四个模拟通道, 可实现更高性能的交互式测试

2) 更高功率的可编程直流电源, 其中 6V 输出通道的最高电流可达 3A, 25 V 和 -25 V 通道的最高电流可达 1A, 适用于更高电流的应用

3) 通过一个统一、方便的视图操作五种仪器、更大的屏幕显示以及保存数据和截图的快捷功能

4) 除了 USB 和 WiFi 兼容性外, 还提供以太网连接, 适用于分布式测量

5) 与 LabVIEW 系统设计软件无缝集成