

· 应用技术研究 ·

# 传输线变压器在多模多馈天线系统中的应用

詹华伟, 牛忠霞, 杜晓燕

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**对传输线变压器进行了分析,并在此基础上介绍了由传输线变压器构成的阻抗变换器和功率合成与分配器件的工作原理,以及它在多模多馈天线系统馈电网络中的应用。

**关键词:**传输线变压器;功率合成/分配;模馈电网络

**中图分类号:** TN811

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-0972(2005)01-0092-03

在通信现代化的战争中,短波通信被广泛用于传输电报、电话、数据和静态图像,短波通信特有的抗毁性强,组网灵活,成本低廉等特点,决定其在军用远程通信中占据极其重要的地位,同时由于短波通信的改进,在民用领域也有广阔的市场。但就短波天线而言,由于其(无源天线)性能对几何尺寸的依赖关系,使得短波天线体积大,占地多,尤其在通信中心台、站,往往要架设数副,甚至更多的天线,天线场的占地面积相当大。短波多模多馈天线系统<sup>[1]</sup>采用了短波多重馈电网络很好的解决了上述问题,可以使3部至10多部发射机共用一副短波天线,发射机之间隔离度高,发射机与天线之间匹配好,传输效率高。短波多模多馈天线系统是由天线体和馈电网络等部分组成的,其中,馈电网络是实现多模多馈特性的关键,而传输线变压器则是实现多模馈电网络功能的主要部件。

## 1 传输线变压器工作原理

传输线变压器<sup>[2]</sup>是将传输线绕在高导磁率低损耗的磁芯上制成,它是基于传输线理论和变压器理论上进行设计的,实现宽带阻抗匹配,功率合成/分配等功能。

当2个线圈通过大小相等,方向相反,即差模电流时,磁芯中的磁场相互抵消,此时,线圈不起作用,传输线变压器按照传输线理论进行功率传输。传输线变压器的这种工作状态称“传输线模式”。

当2个线圈中通过大小相等,方向相同,即共模电流时,磁芯中的磁场相互叠加,使得线圈产生大的感抗,起到隔离的作用。在这种工作状态下,由于输入端与输出端相互隔离,使得传输线变压器的工作原理与普通的变压器相似。传输线变压器的这种工作状态称为“变压器模式”。

传输线变压器的能量传输是借助于电感和分布电容之间的耦合完成的。由于传输线变压器中使用的传输线可以认为是均匀的,因此,在传输线变压器的工作过程中,沿线可以等效为许多电感和分布电容的相互连接。传输线变压器正是利用这些电感和电容之间的耦合,完成了能量的传输。

## 2 多模馈电网络

馈电网络的结构方框图见图1<sup>[3]</sup>,它是由3个阻抗变换器和6个隔离器组成,其中的阻抗变换器主要实现收发信机与天线的阻抗匹配和不平衡—平衡转换;隔离器主要解决多部发射机(或接收机)同时工作时,功率分配(合成)以及信号之间的相互隔离。馈电网络是建立在传输线变压器理论基础之上的。因此,对传输线变压器的分析是对馈电网络分析的关键。

### 2.1 阻抗变换器

多模馈电网络中的阻抗变换器是由1:4传输线变压器组成,主要实现收发信机与天线的阻抗匹配和不平衡—平衡转换。图2所示为其等效模型。

收稿日期:2004-09-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60071031)

作者简介:詹华伟(1979-),男,河南驻马店人,硕士研究生,主要研究微波网络与技术、互联网络子结构分析方法。

根据传输线理论,由图2可以得到其传输线方程<sup>[4]</sup>(假设传输线无耗,即 $r=j\beta$ ):

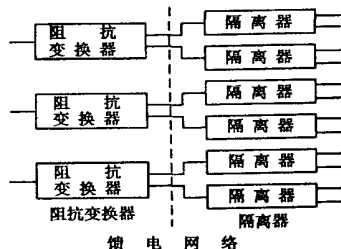


图1 馈电网络结构方框图

Fig. 1 The configuration frame figure of feed network

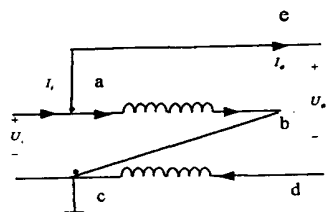


图2 1:4 传输线变压器的等效模型

Fig. 2 The equivalent model of 1:4 TLT

$$I_i - I_o = I_o \cos(\beta l) + j \frac{U_o - U_i}{Z_0} \sin(\beta l),$$

$$U_i = (U_o - U_i) \cos(\beta l) + j I_o Z_0 \sin(\beta l).$$

把变压器看作是一个二端口网络,可以写出其 $z$ 参数矩阵:

$$\begin{bmatrix} U_i \\ U_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -jZ_0 \sin(\beta l) & 1 + \cos(\beta l) \\ \sin(\beta l) & 2(1 + \cos(\beta l)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ -I_o \end{bmatrix}.$$

根据网络原理,其输入阻抗为:

$$Z_{in} = Z_{11} - \frac{Z_{12}Z_{21}}{R_L + Z_{22}},$$

所以可得:

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2 \sin(\beta l) - jR_L Z_0 \cos(\beta l)}{R_L \sin(\beta l) - j2Z_0(1 + \cos(\beta l))}.$$

当 $l \ll \lambda$ ,即传输线长远比工作波长短时:

$$\cos \beta l \rightarrow 1, \sin \beta l \rightarrow 0 \Rightarrow Z_{in} = R_L / 4.$$

由此可见可以实现1:4的阻抗变换.

## 2.2 隔离器(功率合成/分配器)

功率合成/分配网络通常由绕在高导磁率软磁铁芯上的线圈及相关的外围元件组成.本文分析的是2个线圈的情况,当线圈个数增加时,可以由类似的方法推导得到.

图3和图4分别给出了功率合成/分配网络在实现功率合成和分配功能时的等效电路图<sup>[5]</sup>.

图3中,当2个输入端输入幅度相等,相位相同的信号时,由于2组线圈产生的磁场方向相反,磁通相互抵消,铁芯不被磁化.因此,网络对信号

没有抑制作用,在负载 $R$ 处,信号的功率叠加,实现了功率合成的功能.

当两个输入端输入幅度相等,相位相差 $180^\circ$ 的信号时,由于2组线圈产生的磁场方向相同,磁通相互叠加.高导磁率的铁芯使线圈产生一个大的电感,线圈的阻抗抑制了信号的通过.

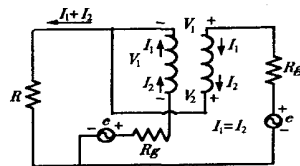


图3 功率合成网络

Fig. 3 Power combining network

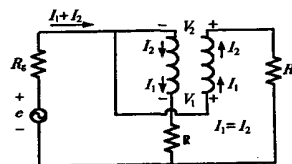


图4 功率分配网络

Fig. 4 Power splitting network

可以利用相似的方法分析图4中功率分配网络实现功率分配功能时线圈的工作状况.输入端的信号功率在两个负载 $R$ 处被平均分配.

## 3 传输线变压器在多模馈电网络中的应用

图5为馈电网络等效电路图,其中 $E1, E2, E3$ 为3个阻抗变换器, $J1 \sim J6$ 为6个功率合成/分配器.当天线实现发射功能时,馈电网络的3个馈电端口可同时接3部发射机,这3部发射机可以同时工作,3种模式的信号电流在天线辐射器上合成,并向空中辐射,而这3种模式的信号互不影响.

当馈电网络以HA1模式工作时,发射机与馈电网络的 $E1$ 端口相连.阻抗变换器 $E1$ 完成发射机与馈电网络端口之间的阻抗匹配,此时 $E1$ 实现的是不平衡—平衡阻抗变换器的功能.根据传输线变压器的电压、电流关系, $E1$ 的平衡端口输出两路交变电流.其中一路为正,另一路为负电流.假设 $E1$ 在 $J1$ 的输入端输入一路正的交变电流,在 $J2$ 的输入端输入一路负的交变电流.

$J1, J2$ 为3dB同相功率合成/分配器.因此, $E1$ 的平衡端输入 $J1$ 的正电流通过 $J1$ ,被 $J1$ 同相等分为两路正的交变电流,输入辐射器A和D,向空间辐射.同样, $E1$ 输出给 $J2$ 的负电流,被 $J2$ 同

相等分为两路负的交流电流,输入辐射器 B 和 C,向空间辐射.这样实现了 HA1 工作模式.

馈电网络根据相同的工作原理,实现了 HA2 和 LA 两种工作模式.

由于功率合成/分配器是基于传输线变压器理论基础之上进行设计的,根据传输线变压器的工作原理,当功率合成/分配器输入正向交流电流时,完成功率的分配;当功率合成/分配器反向输入交流电流时,如果两路电流同相,则二者相加,实现功率合成,如果二者反相,则呈现大的电抗,使其成为开路点,抑制电流的通过.

如果同时连接 3 路发射机,根据图 2 所示的馈电网络等效电路图,以 HA1 模式为例.此时,A、D 辐射 HA1 模式的正电流,B、C 辐射 HA1 模式的负电流.同时,A 辐射 LA 模式的正电流,HA2 模式的负电流;D 辐射 LA 模式的负电流,HA2 模式的正电流.由于 J1 连接的 A、D 辐射器辐射的 HA2、LA 电流反向,因此,对这两种模式的电流而言,J1 的反向端开路.因此,HA1 与 HA2、LA 模式的信号隔离.同理可分析 HA2、LA 两种模式的信号.表 1 给出 3 种模式信号在辐射器处的电流关系.

表 1 3 种模式下辐射器的电流关系

Tab. 1 Current relations of radiation apparatus under three modes

工作模式	A	B	C	D
HA1	+	-	-	+
LA	+	-	+	-
HA2	-	-	+	+

#### 参考文献:

- [1] 杨慎谦.短波多模多馈天线[J].电信技术研究,1994,(8):14-19.
- [2] ERSCH Rotholz. Transmission-line transformers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1981, MTT-29 (4):327-331.
- [3] 白贵芳.超宽带多模式全向短波天线馈电网络的研究[D].郑州:信息工程学院,1989.
- [4] 张纪纲.射频铁氧体宽带器件[M].北京:科学出版社,1986.
- [5] 朱强,周东方,任善圃,等.功率合成与分配网络的混合模式 S 参数分析方法[J].信息工程大学学报,2003,4(2):5-8.

## Application of transmission-line transformer in multimode multi-feed antenna system

ZHAN Hua-wei, NIU Zhong-xia, DU Xiao-yan

(College of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** The transmission-line transformer was analyzed, the principle of transmission-line transformer as impedance convertor and power combining/splitting apparatus is presented, and application of transmission-line transformer in multimode multi-feed antenna system were discussed.

**Key words:** transmission-line transformer; power combining/splitting; multimode feed network

责任编辑:任长江

通过分析发现,3 路发射信号实现了两两相互隔离.

通过上面的分析,可以发现,馈电网络对相位的要求十分严格,当相位偏差较大时,不但影响天线的工作效率,同时,可能在不同模式的工作状态下,产生严重的干扰.因此,需要对不同模式的馈电电流进行严格的相位控制.

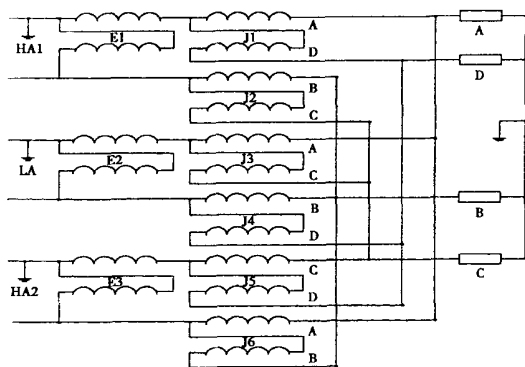


图 5 馈电网络等效电路

Fig. 5 The equivalent circuit of feed network

## 4 结束语

本文介绍了传输线变压器的工作原理以及由它构成的阻抗变换器和功率合成/分配器件在多模多馈天线系统馈电网络中的应用,由于传输线变压器具有频带宽,阻抗匹配好,截止频率高,功率容量大等特点,现在已经广泛用于通信的各个领域.

## 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](http://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](http://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](http://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>