

# 传输线变压器巴仑的分析

杜晓燕<sup>1</sup>,牛忠霞<sup>1</sup>,周东方<sup>2</sup>,张秀钢<sup>1</sup>,朱强<sup>1</sup>

(1. 信息工程大学 信息工程学院,河南 郑州 450002; 2. 浙江大学 电信学院 浙江 杭州 310022)

**摘要:**本文介绍了满足多模多馈天线系统匹配要求的3种传输线变压器巴仑,应用电报方程分析了它们的阻抗变换特性和输出平衡特性,为多模馈电网络的设计、建模和优化提供了理论基础。

**关键词:**传输线变压器;巴仑;多模馈电网络;电报方程

中图分类号:TN925

文献标识码:A

文章编号:1671-0673(2003)02-0075-03

## Analysis of Transmission-Line Transformer Balun

DU Xiao-yan, NIU Zhong-xia, ZHOU Dong-fang, ZHANG Xiu-gang, ZHU Qiang

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

**Abstract:** This paper gives an introduction of three transmission-line transformer baluns, which can meet the need of the match of the multimode multi-feed antenna system. Then, with the application of transmission-line equation, it also presents an analysis for these baluns' characteristics of impedance converting and output balance. The analysis provides a favorable theoretical base for the device, model and optimization of multimode feed network.

**Key words:** transmission-line transformer; balun; multimode feed network; transmission-line equation

## 1 引言

巴仑(balun: balanced-to-unbalanced transformer)是一种非常重要的无源器件。它不仅可以起到阻抗变换的作用,而且可以实现某些天线馈电的不平衡到平衡的转换。在无线电技术中,它广泛地应用于双平衡混频器、推-挽放大器、倍频器和天线馈电网络中。

由阻抗变换器和隔离器组成的多模馈电网络<sup>[1]</sup>,是多模多馈天线系统的关键。其中的阻抗变换器是由1/4不平衡-平衡传输线变压器组成的,主要解决收发信机与天线的阻抗匹配和不平衡-平衡转换的问题。根据其作用和特点,将其称为巴仑更为恰当。

传输线变压器是从集总参数变压器和传输线

段阻抗变换器产生出来的。它既吸收了分布参数传输线段变换器能在高频工作的长处,又保持了集总参数变压器尺寸小、相对带宽大的优点,还可同时完成阻抗变换和不平衡-平衡转换。考虑到多模多馈天线系统的匹配特点,有3种结构的1/4传输线变压器巴仑可满足其要求。本文介绍了这3种结构的传输线变压器巴仑,并应用电报方程分析了它们的阻抗变换特性和输出平衡特性,为多模馈电网络的设计、建模和优化提供了理论基础。

## 2 3种1/4传输线变压器巴仑的分析

满足多模多馈天线系统匹配要求的传输线变压器巴仑有:双线传输线变压器(见图1)、三线传输线变压器(见图4)和四线传输线变压器(见图

收稿日期:2003-01-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60071031)

作者简介:杜晓燕(1975-),女,山东济南人,信息工程大学硕士研究生,主要研究微波网络与技术、互联网络子结构分析方法及其应用。

5)。尽管3者的结构不同,但都可以实现1/4阻抗变换和平衡-平衡转换。下面就应用电报方程对它们的阻抗变换特性和输出平衡特性进行分析。

2.1 双线巴仑的分析

双线1/4传输线变压器巴仑是将一根传输线绕在一个磁芯上制成的。图1所示等效模型的传输线方程(假设传输线无耗,即  $r=j$ ):

$$I_i - I_o = I_o \cos(\beta l) + j \frac{U_o - U_i}{Z_0} \sin(\beta l) \quad (1)$$

$$U_i = (U_o - U_i) \cos(\beta l) + j I_o Z_0 \sin(\beta l) \quad (2)$$

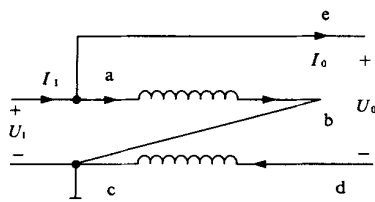


图1 双线1/4传输线变压器巴仑的等效模型

把变压器看作是一个二端口网络,可以写出其Z参数矩阵:

$$\begin{bmatrix} U_i \\ U_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -jZ_0 & \\ \sin(\beta l) & 1 + \cos(\beta l) \\ 1 + \cos(\beta l) & 2(1 + \cos(\beta l)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ -I_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据网络原理,其输入、输出阻抗分别为

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

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

所以,

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2 \sin(\beta l) - jR_L Z_0 \cos(\beta l)}{R_L \sin(\beta l) - j2 Z_0 (1 + \cos(\beta l))} \quad (4)$$

$$Z_{out} = \frac{Z_0^2 \sin(\beta l) - j2 R_L Z_0 (1 + \cos(\beta l))}{R_L \sin(\beta l) - jZ_0 \cos(\beta l)} \quad (5)$$

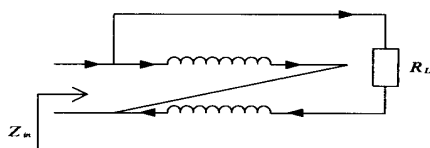


图2 双线传输线变压器巴仑的输入阻抗

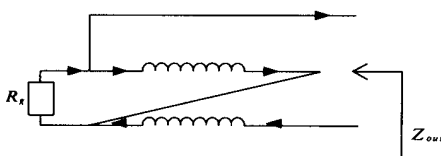


图3 双线传输线变压器巴仑的输出阻抗

输出平衡度也是巴仑的主要指标之一。图1

所示巴仑的输出电压的幅度和相位平衡度为:

$$\left| \frac{U_e}{U_d} \right| = \frac{\left[ \frac{Z_0}{R_L} \sin(\beta l) \right]^2 + (\cos(\beta l))^2}{\left[ \frac{Z_0}{R_L} \sin(\beta l) \right]^2 + 1} \quad (6)$$

$$= \arctg \left[ \frac{Z_0}{R_L} \operatorname{tg}(\beta l) \right] - \arctg \left[ \frac{Z_0}{R_L} \sin(\beta l) \right] \quad (7)$$

因为  $\cos(\beta l) < 1$ , 所以在一般情况下有  $|U_e| < |U_d|$ , 这就表明, 负载  $R_L$  两端电压的幅度始终是不平衡的, 只有当  $\beta l \ll 1$  时,  $|U_e| = |U_d|$  才成立。

对于输出电压而言, 相位平衡与幅度平衡一样重要。由图1和式(7), 输出端e与输入端的a电位相同, 两者无相位差。另一个输出端d相对于输入端a作了倒相变换, 即理想情况下 ( $\beta l = 0$ ) d端与a端电位幅度相同, 相位差  $180^\circ$ 。但由于实际变压器的  $\beta l > 0$ , d端与a端的相位差将偏离  $180^\circ$ 。所以, 输出端电压的相位一般也不平衡。

2.2 三线巴仑的分析

三线1/4传输线变压器巴仑是将一根三线传输线绕在一个磁芯上制成的。图4中, 3条线的电位成等位分布, 所以空间相对电场成偶对称分布, 其中ac、ec为偶对称线, bd为对称中心线, 此时为偶模变换。

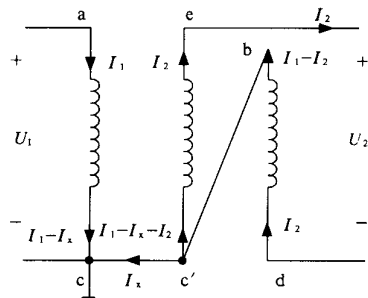


图4 三线1/4传输线变压器巴仑的等效模型

在理想情况下, ec、bd上的电流近似相等。根据电磁学理论, 馈以相同电流的平行线之间不存在电流耦合, 因此对于近似理想的三线变压器, ec、bd的电流耦合很弱, 所以可将三线的问题当作一对互不影响的传输线来分析。

由文献[2]可写出图4中三线的传输线方程:

$$U_1 - U_2 - U_d = j(I_1 - I_x - I_2) Z_{ac} \sin(\beta l) \quad (8)$$

$$I_2 = (I_1 - I_x - I_2) \cos(\beta l) \quad (9)$$

$$U_1 = -U_d \cos(\beta l) + jI_2 Z_{oe} \sin(\beta l) \quad (10)$$

$$I_1 - I_2 = I_2 \cos(\beta l) + j \frac{-U_d}{Z_{oe}} \sin(\beta l) \quad (11)$$

上式中,  $Z_{ac}$ 为传输线ac、ec的特性阻抗,  $Z_{oe}$ 为

偶模特性阻抗。

其  $Z$  参数矩阵为:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \left\{ -\frac{j}{\sin(\beta l)} \begin{bmatrix} Z_{0e} \cos(\beta l) & Z_{0e}(1 + \cos(\beta l)) \\ Z_{0e}(1 + \cos(\beta l)) & 2Z_{0e}(1 + \cos(\beta l)) + Z_{0e} \sin^2(\beta l) \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} I_1 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

所以输入、输出阻抗分别为:

$$Z_{in} = \frac{Z_{0e} \sin(\beta l) / Z_{0e} - Z_{0e} \cos(\beta l) / -jR_L Z_{0e} \cos(\beta l)}{R_L \sin(\beta l) - j[2Z_{0e}(1 + \cos(\beta l)) + Z_{0e} \sin^2(\beta l)]} \quad (13)$$

$$Z_{out} = \frac{Z_{0e} \sin(\beta l) / (Z_{0e} - Z_{0e} \cos(\beta l)) - jR_g [2Z_{0e}(1 + \cos(\beta l)) + Z_{0e} \sin^2(\beta l)]}{R_g \sin(\beta l) - jZ_{0e} \cos(\beta l)} \quad (14)$$

从结构上看,三线巴仑近似对称,所以输出可认为是平衡的。

### 2.3 四线巴仑的分析

四线结构的 1/4 传输线变压器巴仑是将两根相同的传输线绕在两个一样的磁芯(或一个双孔磁芯)上制成的。如果将两根传输线都绕在同一磁芯上,就会出现绕组短路,那么变压器将产生全反射而失去变换功能,所以四线巴仑必须用两个磁芯。

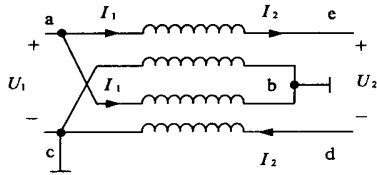


图 5 四线 1/4 传输线变压器巴仑的等效模型

由于两条传输线相同,所以只要写出一条线的传输线方程就可以。图 5 所示等效模型中的一条线传输线方程为:

$$I_1 = I_2 \cos(\beta l) + j \frac{U_2}{2Z_0} \sin(\beta l) \quad (15)$$

$$U_1 = \frac{U_2}{2} \cos(\beta l) + jI_2 \sin(\beta l) \quad (16)$$

其  $Z$  参数矩阵为:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \left\{ -\frac{jZ_0}{\sin(\beta l)} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cos(\beta l) & 1 \\ 1 & 2 \cos(\beta l) \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 2I_1 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其输入、输出阻抗分别为:

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2 \sin(\beta l) - j \frac{R_L Z_0}{2} \cos(\beta l)}{R_L \sin(\beta l) - j2Z_0(1 + \cos(\beta l))} \quad (18)$$

$$Z_{out} = \frac{Z_0^2 \sin(\beta l) - j2R_g Z_0(1 + \cos(\beta l))}{R_g \sin(\beta l) - j \frac{Z_0}{2} \cos(\beta l)} \quad (19)$$

图 5 中,输出端 e 相对于输入端 a 相位发生了变化,但变化大小与 d、a 之间偏离 180° 的大小相

同,也就是说,若上面的传输线相移为  $\theta$ ,则下面的传输线的相移为  $180^\circ + \theta$ 。所以,图 5 中的巴仑的输出始终是平衡的。

### 3 结束语

这三种结构在一定程度上丰富了多模馈电网络的设计方法,为其优化提供了多种途径。

从结构上看,四线巴仑结构最复杂,且尺寸较大。由于其结构完全对称,输出始终是平衡的,所以平衡度最好。双线巴仑结构简单但不平衡,其平衡度受传输线长度、频率等影响。而三线巴仑的结构近似对称,其输出也可认为是平衡的。

双线和四线巴仑中的传输线均是孤立的双线,其空间电场结构仅与双线本身有关,而与所传输的信号无关,因而其分布电容、特性阻抗等传输参量只与线本身有关,也就是说,对于既定的传输线其传输参量是固定的。然而三线巴仑中,其空间电场结构除与线本身有关外,还与线上的电位分布有关。这说明了三线中由任意两根线组成的传输线,其特性阻抗不仅与另一根线的存在有关,还与这根线的相对电位的高低有关,因此三线中任意两线间的特性阻抗一般是不同的。尽管三线巴仑的分析非常复杂,但实验证明,在许多情况下用三线比用双线的频带要宽<sup>[2]</sup>。

在相同情况下,四线比其它两种结构多用一个磁芯,这使得四线更适合大功率传输。另外,在相同条件下,四线的并联电感与双线的一样,而磁芯却多用一个,所以四线结构一般用于高频阻抗变换,而不适于低频阻抗变换。

当然,除了阻抗变换特性和输出平衡特性外,还要考虑巴仑的传输损耗、功率容量等参数,由此才能根据天线的匹配要求,选择适当的巴仑。

#### 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] 张纪纲. 射频铁氧体宽带器件[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [3] 尹应增, 夏静改. 宽频带微带传输线巴仑的研究[J]. 电波科学学报, 1999, 2: 191 - 195.
- [4] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.