

文章编号: 1672-2892(2012)01-0056-04

## 定向耦合器的高功率小型化设计

覃基伟, 陈晓光

(复旦大学 通信科学与工程系, 上海 200433)

**摘 要:** 利用奇偶模分析法对定向耦合器进行基本的描述与分析, 利用 HFSS 软件辅助设计了一种三节 3 dB 定向耦合器。为解决此耦合器耐压低的问题, 在耦合器的上下两板间引入了绝缘介质, 设计了一种耦合为 3 dB, 最大输入功率不低于 17 kW 的定向耦合器。加入耦合介质, 除了可以提高耦合器的输入功率外, 还可缩减耦合器的尺寸, 减小耦合器质量, 并节约材料成本, 从而实现了 3 dB 定向耦合器的高功率及小型化设计。

**关键词:** 功率分配器; 定向耦合器; 奇偶模分析; 击穿场强

**中图分类号:** TN622

**文献标识码:** A

## Design of high-power small-size directional coupler

QIN Ji-wei, CHEN Xiao-guang

(Communication Science and Engineering Department, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** With the use of the even-odd mode analysis theory, a third-order 3 dB directional coupler is analyzed and designed by HFSS. On this basis, a ceramics chip is used as coupling medium, and a high-power third-order 3 dB directional coupler is analyzed and designed with the maximum input power above 17 kW. The adding of the ceramic chip can improve the coupler's capability of voltage resistance and cut the size of the directional coupler, therefore high-power small-size coupling is achieved. This coupler can be applied to the high-power broadcasting transmitter system.

**Key words:** power divider; directional coupler; even-odd mode analysis; breakdown strength

定向耦合器属于无源滤波器件, 用于功率分配或功率组合。微波功率分配技术是将 1 个输入信号分成 2 个或多个较小的功率信号。与其工作方式相反的是微波功率合成技术, 此技术已经在微波功率放大器、天线系统和微波测量系统中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。耦合器可以是三端口器件, 也可以是四端口器件。四端口网络通常采用定向耦合器和混合网络形式<sup>[2]</sup>。最早的定向耦合器出现在 20 世纪 20 年代, 由 2 根平行放置的四分之一波长相互耦合的导线构成<sup>[3]</sup>。单节耦合器耦合度与频率的关系由 Oliver B M 于 1954 年给出<sup>[4]</sup>。近年来, 耦合器在广播电视、移动通信和卫星通信等无线通信领域得到了更多应用。随着应用的增多, 对耦合器的输入功率、尺寸、集成度和制造成本等方面指标提出了更高的要求。本文中的设计思想实现了 3 dB 耦合器的高功率及小型化设计, 在广播电视的工程应用中具有较高的使用价值。

### 1 耦合器的分析与设计

图 1 为定向耦合器的基本表示形式, 它拥有 4 个端口, 端口 1 为输入端, 信号从此端口进入耦合器, 然后被分配到直通端口(端口 2)和耦合端口(端口 3)。在理想情况下, 隔离端(端口 4)无功率输出。

通常用耦合度  $C$ 、方向性  $D$  和隔离度  $I$  这 3 个参量表征定向耦合器, 单位均为 dB:

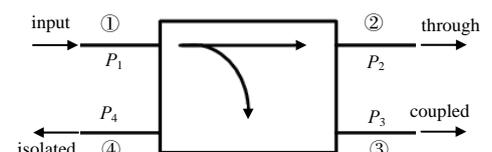


Fig.1 A commonly used symbol for directional couplers  
图 1 定向耦合器的常用表示形式

$$C = 10 \lg \frac{P_1}{P_3} \quad (1)$$

$$D = 10 \lg \frac{P_3}{P_4} \quad (2)$$

$$I = 10 \lg \frac{P_1}{P_4} \quad (3)$$

对于 3 dB 定向耦合器，直通端与耦合端均分功率，且在耦合端与直通端之间有 90° 的相移。

对于图 2 所示的单节耦合线耦合器，采用奇偶模分析法进行分析<sup>[2]</sup>，直通端电压  $V_2$ 、耦合端电压  $V_3$ 、隔离端电压  $V_4$  表示如下：

$$V_2 = V_1 \frac{\sqrt{1-k^2}}{\sqrt{1-k^2} \cos \theta + j \sin \theta} \quad (4)$$

$$V_3 = V_1 \frac{j k \tan \theta}{\sqrt{1-k^2} + j \tan \theta} \quad (5)$$

$$V_4 = 0 \quad (6)$$

式中： $k$  为电压耦合因数，定义为：

$$k = \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}} \quad (7)$$

若给定电压耦合因素  $k$  及特征阻抗  $Z_0$ ，可得出偶模和奇模特征阻抗为：

$$Z_{0e} = Z_0 \sqrt{\frac{1+k}{1-k}} \quad (8)$$

$$Z_{0o} = Z_0 \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} \quad (9)$$

得到奇偶模特征阻抗后，即可综合得到耦合器的物理尺寸。

在广播电视发射系统的工程应用中，定向耦合器采用平行传输线结构，便于实现高功率。图 3 是 1 个三节 3 dB 定向耦合器。P P Toullos 给出了对称 TEM 模三节定向耦合器各节奇偶模特征阻抗的综合方法<sup>[5]</sup>，对称多节定向耦合器的精确设计表格由 E G Cristal 与 L Young 给出<sup>[6]</sup>。在此基础上综合得到此耦合器的物理尺寸见图 4。

图 3 中的三节 3 dB 定向耦合器 HFSS 软件仿真得到的  $S$  参数曲线见图 5，直通  $S_{21}$  和耦合  $S_{31}$  都达到了很好的平衡，隔离端  $S_{41}$  和反射波  $S_{11}$  也得到了较好的抑制(前者在 -15 dB 以下，后者 -20 dB 以下)。

## 2 广播电视发射机中 3 dB 耦合器的高功率及小型化设计

在广播电视发射系统中，耦合器的输入功率往往很大(如：从十几到数十千瓦)。图 3 中的定向耦合器，上下两块传输板之间以空气为介质( $\epsilon_r=1$ )，在高功率的情况下两块容易发生击穿，造成短路，使系统蒙受损失。

为了解决这个工程问题，在上下两板间使用绝缘介质代替空气，见图 6。

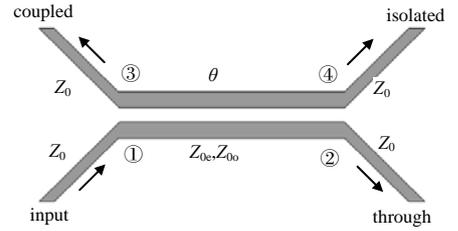


Fig.2 A single-section coupled coupler  
图 2 单节耦合线耦合器

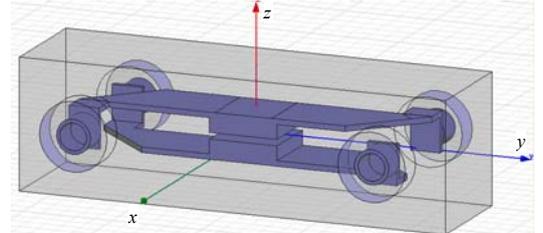


Fig.3 A 3-D model of a third-order 3 dB directional coupler  
图 3 三节 3 dB 定向耦合器的 HFSS 3-D 模型

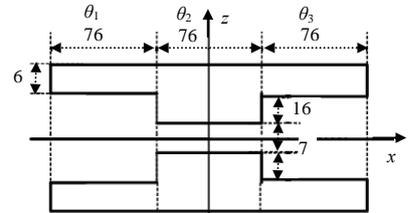


Fig.4 Size of the third-order 3 dB directional coupler  
图 4 三节 3 dB 定向耦合器的尺寸(单位:mm)

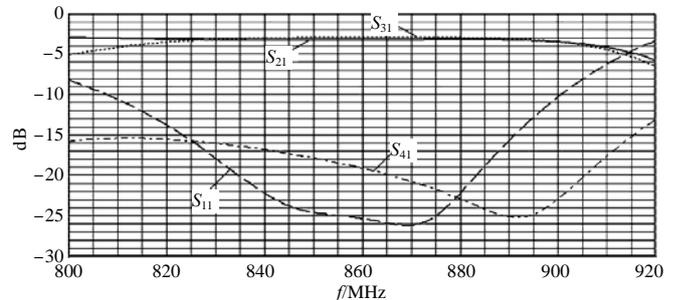


Fig.5 S parameter curves of the third-order 3 dB directional coupler  
图 5 每节长度为 76 mm 的三节 3 dB 定向耦合器的 S 曲线

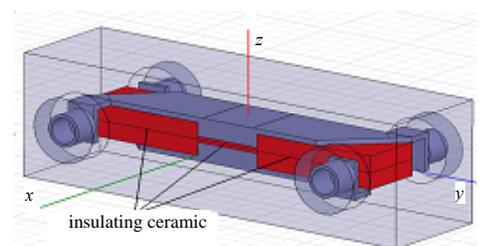
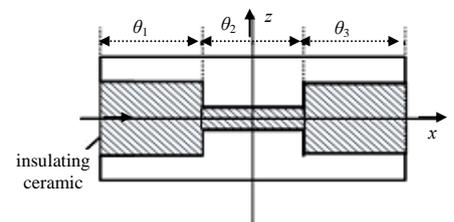


Fig.6 A third-order 3 dB directional coupler with a ceramics chip as coupling medium  
图 6 增加了陶瓷绝缘介质的 3 dB 定向耦合器

在引入介质后, 电磁波等效波长变短(见式(10)), 因此耦合器的尺寸需相应地缩小。

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (10)$$

绝缘介质可以三氧化二铝为材料, 其相对介电常数  $\epsilon_r=9.8$ 。在间距为 1 mm 的情况下, 三氧化二铝的击穿电压达到 10 kV, 可实现高功率输入。由此可见, 使用绝缘介质代替空气, 一方面可以增加耦合器的输入功率, 另外也可以减小耦合器的尺寸, 实现小型化设计。

图 6 中需要说明, 上下两块传输板并没有被介质完全包围, 因此耦合器的尺寸并不能按照式(10)给出的比例线性缩小。在工程设计中, 利用 HFSS 软件进行优化设计不失为一种明智选择。

图 7 和图 8 给出了介质的相对介电常数( $\epsilon_r$ )分别为 9.8 及 14 的情况下, 3 dB 耦合器  $S$  参数的 HFSS 仿真结果。在相对介电常数  $\epsilon_r=9.8$  的情况下, 耦合器传输板每节的长度由原 76 mm 缩短到 55 mm; 同理, 在相对介电常数  $\epsilon_r=14$  的情况下, 耦合器传输板每节的长度由原 76 mm 缩短到 45 mm, 从而实现了耦合器的小型化设计。

此外, 通过 HFSS 仿真, 分别得到相对介电常数  $\epsilon_r$  为 1(空气)及 9.8(三氧化二铝)情况下两板间的电场分布和最大场强, 根据击穿电压分别计算 2 种情况下的耦合器的最大输入功率。

当  $\epsilon_r=1$  时, 耦合器两板间的最大电场强度为 2 040.7 V/m(输入 1 W 时得到的最大电场强度), 空气的击穿电场强度是: 3 000 000 V/m。由于两块传输板之间是空气介质, 所以得到最大允许输入功率为  $3\,000\,000 \div 2\,040.7=1.47$  kW。即当输入功率小于 1.47 kW 时, 基本保证耦合板之间不被打火击穿<sup>[7]</sup>。

当  $\epsilon_r=9.8$  时, 耦合器两板间的最大电场强度约 572.86 V/m(输入 1 W 时得到的最大电场强度), 由于两块传输板间三氧化二铝介质的击穿电场强度为 10 000 000 V/m<sup>[7]</sup>, 所以得到最大允许输入功率为  $10\,000\,000 \div 572.86=17.46$  kW。即当输入功率小于 17.46 kW 时, 基本保证耦合板之间不被打火击穿<sup>[7]</sup>。

综上所述, 在上下两传输板之间引入绝缘介质代替空气, 一方面可以提高耦合器的输入功率, 另一方面也可以缩小耦合器的尺寸及质量, 节约材料。这在实际的工程应用中具有重要意义。

### 3 广播电视发射机中高功率小型化 3 dB 耦合器的制造与测试

在实物制造过程中, 为了控制制造成本, 仅仅在耦合器上下两板的中间节之间加入了一块三氧化二铝的陶瓷介质(相对介电常数  $\epsilon_r=9.8$ ), 见图 9 和图 10。

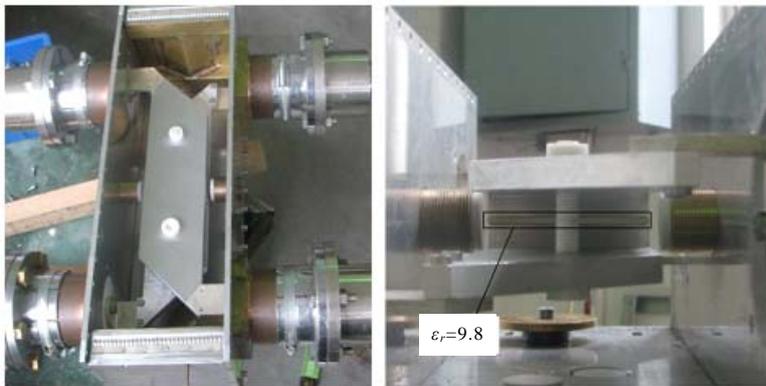


Fig.9 Photograph of a high-power small-size third-order 3 dB directional coupler  
图 9 高功率小型三节 3 dB 介质定向耦合器实物图

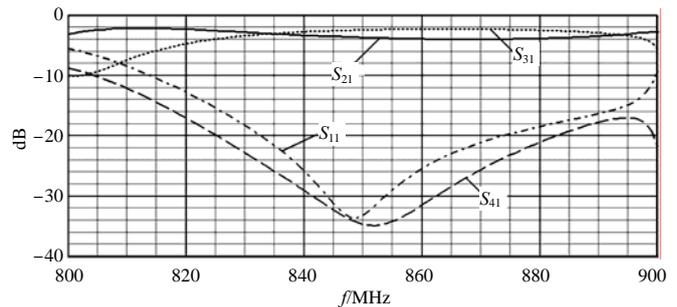


Fig.7  $S$  parameter curves of the third-order 3 dB directional coupler( $\epsilon_r=9.8$ )  
图 7  $\epsilon_r=9.8$  的三节 3 dB 定向耦合器的  $S$  曲线

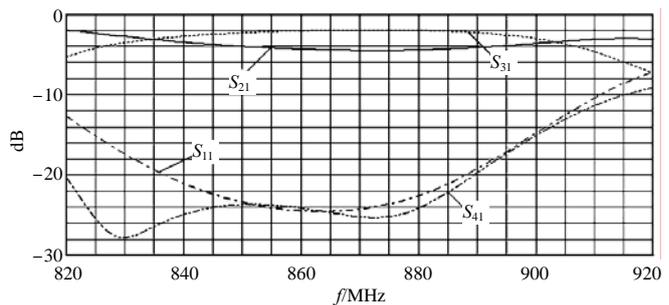


Fig.8  $S$  parameter curves of the third-order 3 dB directional coupler( $\epsilon_r=14$ )  
图 8  $\epsilon_r=14$  的三节 3 dB 定向耦合器的  $S$  曲线

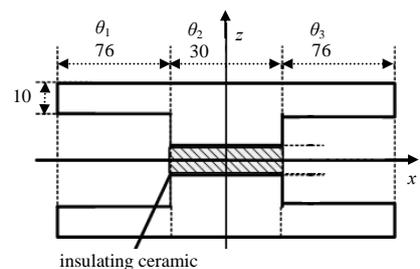


Fig.10 The size of the high-power small-size third-order 3 dB directional coupler  
图 10 高功率小型三节 3 dB 介质定向耦合器尺寸图

参考图 4 和图 6, 由于只在中间节间加入介质, 中间节长度需缩减, 而两边的两节保持 76 mm 不变。同样由于传输板并未被介质完全包围, 采用 HFSS 软件进行仿真, 得到中间节长度为 30 mm, 见图 10,  $S$  曲线见图 11。

使用安捷伦的网络分析仪(型号: Agilent 8712ET 300 kHz~1300 MHz RF NETWORK ANALYZER)对图 9 中的耦合器实物进行测量, 调试结果显示, 在 800 MHz~900 MHz 范围内, 此耦合器能达到较好的平衡度, 除去网络测试仪测量线损耗(约 0.2 dB)的影响, 直通  $S_{21}$  和耦合  $S_{31}$  均保持在  $-3.0$  dB~ $-3.2$  dB 范围内。对于隔离和回波反射, 在 810 MHz~912 MHz 能保持在 20 dB 以下, 并接近 30 dB。

#### 4 结论

本文首先描述了定向耦合器的基本工作原理, 利用 HFSS 软件辅助设计了一款三节 3 dB 定向耦合器。此耦合器以空气为介质, 耐压低。为解决此问题, 在耦合器的上下两板间引入绝缘介质。加入介质后, 一方面可以增加两块传输板间的击穿电压, 提高耦合器的输入功率, 另一方面可以缩减耦合器的尺寸, 减小耦合器质量并降低成本, 从而实现了 3 dB 定向耦合器的高功率及小型化的优化设计。通过 HFSS 的优化设计, 最终选择相对介电常数为 9.8 的三氧化二铝陶瓷作为耦合介质, 并制造实物, 利用网络分析仪对实物进行测量, 得到了预期结果。这种高功率小型化的设计思想在广播电视发射系统中具有十分重要的应用价值和良好的可操作性。需要指出的是, 引入陶瓷作为耦合介质片, 在潮湿天气下, 陶瓷表面容易凝水导致打火短路, 因此在工程应用中, 应当加入适当的防湿物质, 并为耦合器创造干燥的工作环境, 避免置于露天环境中工作。最后, 采用渐变线耦合器<sup>[8]</sup>或者更高阶耦合器的方法重新设计此类耦合器, 并利用具有更高介电常数的陶瓷作耦合介质, 能进一步提高耦合器的带宽并减小尺寸, 降低成本, 这是此课题的后续研究方向。

#### 参考文献:

- [1] 张文赋, 刘长军, 吴金国, 等. 一种双频微波功率合成器的设计与实现[J]. 信息与电子工程, 2007, 5(6): 414-417. (ZHANG Wenfu, LIU Changjun, WU Jinguo, et al. Design and Implementation of a Dual Frequency Microwave Power Combiner[J]. Information and Electronic Engineering, 2007, 5(6): 414-417.)
- [2] David M Pozar. Microwave Engineering[M]. 3rd ed. [S.l.]: Wiley, 2006.
- [3] Seymour B Cohn, Ralph Levy. History of Microwave Passive Components with Particular Attention to Directional Couplers[J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 1984, MTT-32(9): 1046-1054.
- [4] Oliver B M. Directional Electromagnetic Couplers[J]. Proceedings of the IRE, 1954, 42(11): 1686-1692.
- [5] Toullos P P, Todd A C. Synthesis of Symmetrical TEM-Mode Directional Couplers[J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 1965, MTT-13(9): 536-544.
- [6] Cristal E G, Young L. Theory and tables of optimum symmetrical TEM-mode directional couplers[J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 1965, MTT-13(9): 544-558.
- [7] 龙以水, 陈晓光, 朱继宏. 数字邻频双工器中大功率三分贝耦合器设计与分析[J]. 电视技术, 2008, 32(10): 22-27. (LONG Yishui, CHEN Xiaoguang, ZHU Jihong. Design and Analysis of High-power 3 dB-coupler in Digital Adjacent-channel Duplexer[J]. Video Engineering, 2008, 32(10): 22-27.)
- [8] Tresselt C P. The design and construction of broadband, high directivity, 90-degree couplers, using nonuniform line techniques[J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 1966, MTT-14(12): 647-657.

#### 作者简介:



覃基伟(1983-), 男, 湖南省张家界市人, 在读硕士研究生, 研究方向为无源滤波器件、定向耦合器等的设计。email:faman7856@163.com.

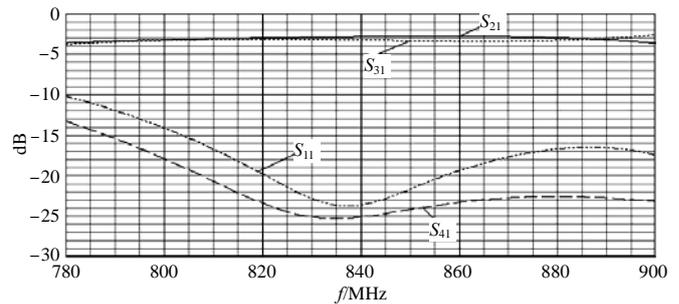


Fig.11 The  $S$  parameter curves of the third-order 3 dB directional coupler  
图 11 高功率三节 3 dB 介质定向耦合器的  $S$  曲线

陈晓光(1964-), 男, 安徽省五河县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为无线通信、RF 理论与技术。