

# 新型基片集成波导三孔定向耦合器的设计

邹雄<sup>1</sup>, 童创明<sup>1,2</sup>, 陈浩<sup>1</sup>, 余定旺<sup>1</sup>, 鲍峻松<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西三原, 713800; 2. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京, 210096)

**摘要** 利用矩形波导多孔定向耦合器理论和基片集成波导与矩形波导的等效关系, 设计了基片集成波导三孔定向耦合器。通过在耦合孔的上金属面开哑铃形槽来增加能量的耦合, 从而提出一种新型的三孔定向耦合器。实验结果表明: 该耦合器在 8.6 GHz - 10.6 GHz 的频率范围内, 输入端反射系数和隔离口的电压传输系数均小于 -15 dB, 相对带宽达到 20%, 通带内直通口与耦合口的电压传输系数均在 -8.2 dB - -3.3 dB 之间, 耦合度约为 6 dB, 隔离度大于 15 dB, 性能获得了较大提高。该耦合器设计方法简单, 加工成本低廉, 可以广泛用于微波毫米波系统中。

**关键词** 基片集成波导; 定向耦合器; 矩形波导; 金属化孔

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.03.009

**中图分类号** TN713; TN015 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)03-0040-05

在微波毫米波频段, 采用传统波导技术已经可以准确地设计出 3 dB、6 dB 和 10 dB 耦合度的定向耦合器, 其理论已趋于成熟<sup>[1-3]</sup>。但矩形金属波导耦合器加工复杂、难于集成且成本较高。基片集成波导<sup>[4]</sup> (Substrate Integrated Waveguide, SIW) 是近年来出现的一种新型传输线, 它是在介质基片上采用周期性排列的金属通孔代替矩形波导的侧壁, 与上下表面的金属层一起构成准封闭的导波结构, 因而既具有与传统矩形金属波导相类似的低差损、低辐射、高品质因数等优点, 同时, 又克服了其不方便集成, 且制作难度和成本较高的缺点, 在微波电路中有着广泛的应用, 可以设计高性能的功率分配器<sup>[5-6]</sup>、耦合器<sup>[7-9]</sup>、滤波器<sup>[10-11]</sup> 和天线<sup>[12]</sup> 等。

由于 SIW 和传统矩形波导存在一定的等效关系<sup>[13]</sup>, 因此, 可以利用矩形波导的设计理论, 方便地设计出多种 SIW 器件。2004 年, 李皓<sup>[8]</sup> 利用波导 3 dB 电桥的概念, 设计了一种 SIW 双孔定向耦合器, 其耦合度为 7 dB, 隔离度大于 10 dB。2008 年, Zhai<sup>[9]</sup> 等人从 SIW 窄边缝隙定向耦合器出发, 设计了一种折叠式的 HM-SIW 定向耦合器, 电路面积大大缩小, 其耦合度为 4.1 dB, 隔离度大于 15 dB。本文利用波导多孔定向耦合器的工作原理, 并通过改变耦合孔处的表面金属结构, 设计了一种新型的 SIW 三孔定向耦合器, 取得了较好的实验结果。

## 1 $N$ 元均匀多孔定向耦合器的原理

在波导式定向耦合器中, 耦合孔一般用单孔、多孔及长槽来耦合, 这种耦合方式习惯上称为弱耦合。单孔定向耦合器的缺点是耦合度(过渡衰减)很大, 频带较窄。为了克服这些缺点, 常采用多孔或长槽耦合。多孔定向耦合器主要分为 2 种情况, 即均匀多孔和非均匀多孔, 其中, 均匀多孔定向耦合器的设计方法较为简单。设  $N$  元均匀多孔定向耦合器相邻 2 孔的间距为  $u$ , 相位差为  $\phi = 2\pi u/\lambda_g$ 。  $N$  个孔径相等, 见图 1。电

\* 收稿日期: 2011-09-09

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2011JM8025)

作者简介: 邹雄(1987-), 男, 湖北孝感人, 博士生, 主要从事基片集成波导的应用研究。

E-mail: zouxiong0522@163.com

磁能量由主波导的“1”臂传向“2”臂,经过  $N$  个孔把能量耦合到副波导中。

分析时忽略电磁能量在主波导传输时由于耦合而引起的衰减作用<sup>[14]</sup>,即令耦合能量  $a_1 = a_2 = \dots = a_N$ ,这样耦合到“3”臂的电磁能量总和为:

$$A_3 = \sum_{i=1}^N a_i e^{-j(N-1)\phi} = Na_1 e^{-j(N-1)\phi} \quad (1)$$

而耦合到“4”臂的电磁能量的总和可用等比数列求和公式和欧拉公式求出:

$$A_4 = a_1 (1 + e^{-j2\phi} + e^{-j4\phi} + \dots + e^{-j2(N-1)\phi}) = a_1 e^{-j(N-1)\phi} \frac{\sin N\phi}{\sin\phi} \quad (2)$$

则耦合器的方向性为:

$$K_D = 20 \lg \left| \frac{A_3}{A_4} \right| = 20 \lg \frac{N \sin\phi}{\sin N\phi} \quad (3)$$

由上式可知,孔数愈多,方向性  $K_D$  也愈大,理想方向性的条件是  $\sin N\phi = 0$ ,即为:  $N\phi = q\pi$ ,其中  $q$  为任意正整数,而其相邻 2 孔的距离为:

$$\frac{2\pi}{\lambda_g} u = \phi \quad (4)$$

$$u = \frac{\lambda_g}{2\pi} \phi = \frac{q}{2N} \lambda_g \quad (5)$$

取  $q = 1$ ,当  $N = 2$  时,则  $u = \lambda_g/4$ ,  $\phi = \pi/2$ ,这即是双孔定向耦合器。

多孔定向耦合器通常在输出端要求得到较大功率的场合。若多孔定向耦合器的孔无限增加,相邻两孔的距离无限缩短,则多孔定向耦合器变为缝隙定向耦合器了。

## 2 SIW 三孔定向耦合器

SIW 多孔定向耦合器的设计类似于矩形波导多孔定向耦合器的设计,矩形波导中的孔可以是圆形、矩形等多种形状,但 SIW 中的孔是通过在窄壁上开一条缝隙来实现的,即增大公共窄壁的金属化孔的间距,使能量由主波导泄露到副波导中。

由以上分析,可以得出 SIW 多孔定向耦合器的设计步骤:①首先确定介质板的型号,并根据 SIW 的宽度,计算出其等效宽度和截止频率;②然后计算出 SIW 的等效阻抗,从而确定微带到 SIW 的过渡长度和宽度;③再确定孔的个数,并根据式(5)得到相邻 2 孔之间的距离;④将孔径大小设为变量,按照设计的预期指标进行优化仿真。

利用上述设计方法,可以设计 SIW 三孔定向耦合器,见图 2。 $q$  取 3,则 2 孔间距  $u = 2\lambda_g/3$ 。该耦合器设计的中心频率为 10.0 GHz,SIW 宽度为 12.0 mm,通孔直径 0.6 mm,周期 1.0 mm。则微带线宽  $w_{50} = 2.0$  mm,SIW 过渡处线宽  $w_s = 4.0$  mm,过渡段长度  $l = 7.5$  mm。耦合孔的宽度  $u_1 = 6.6$  mm,2 孔壁的距离  $u_2 = 5.8$  mm。采用环氧玻璃布板,相对介电常数 4.3,介质板厚度 1.0 mm,损耗角正切  $\tan\delta < 0.001$ 。

利用 Ansoft HFSS10.0 仿真软件对该耦合器进行仿真实验, $S$  参数结果见图 3。该耦合器在 9.2 - 10.8 GHz 的频率范围内,输入端反射系数和隔离口的电压传输系数均小于 -15 dB,在 9.5 GHz 处达到最小,均低于 -40 dB。通带内直通口的电压传输系数在 -1.5 - -4.4 dB 之间,当频率低于 10.4 GHz 时波动较小;而通带内耦合口的电压传输系数在 -4.8 - -10.0 dB 之间,且随着频率的升高而增大,波动较大。可见,该定向耦合器的方向性较差,耦合度不够理想。

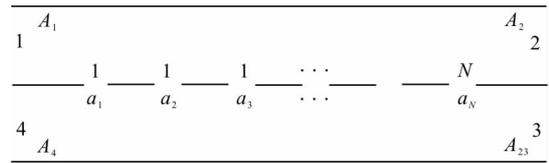


图1 均匀多孔定向耦合器的结构图

Fig. 1 Layout of even multi-aperture directional coupler

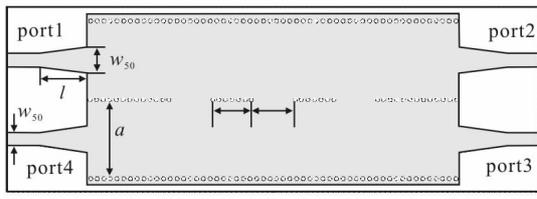


图2 SIW 三孔定向耦合器的结构图

Fig. 2 Layout of SIW three apertures directional coupler

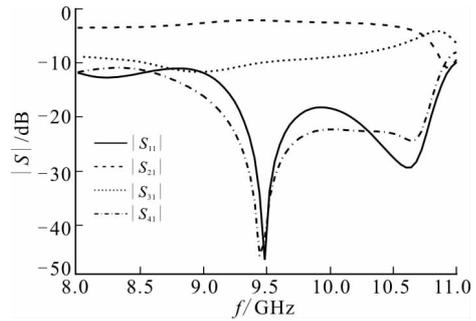


图3 SIW 三孔定向耦合器的 S 参数仿真结果

Fig. 3 Simulated results for SIW three apertures directional coupler

### 3 新型 SIW 三孔定向耦合器

为了提高 SIW 三孔定向耦合器的方向性,本文首次在各个孔的上表面金属开了一个类似于哑铃形的槽,以此来增加能量的耦合,通过仿真优化得到尺寸参数。该槽为完全对称结构,见图 4,上下 2 侧宽度  $t_1 = 1.8 \text{ mm}$ ,中间宽度  $t_2 = 0.8 \text{ mm}$ ,中间到两侧的长度  $t_3 = 4.0 \text{ mm}$ 。

改进后的 SIW 三孔定向耦合器见图 5,尺寸参数与改进前的相同,利用 HP8720ET 矢量网络分析仪对电路进行了测试,S 参数的测试结果见图 6。

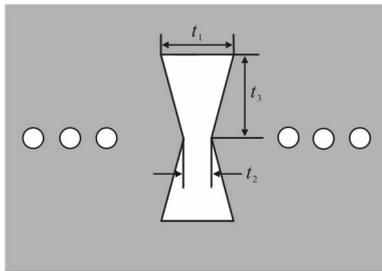


图4 耦合孔处哑铃形槽的结构示意图

Fig. 4 Layout of dumbbell-shaped slot on the coupling aperture

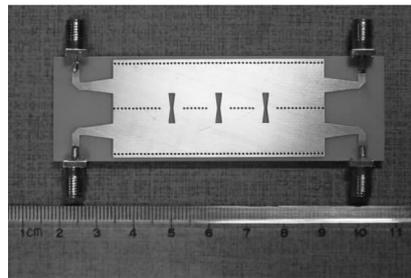
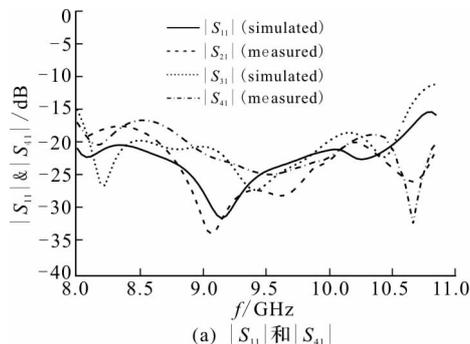
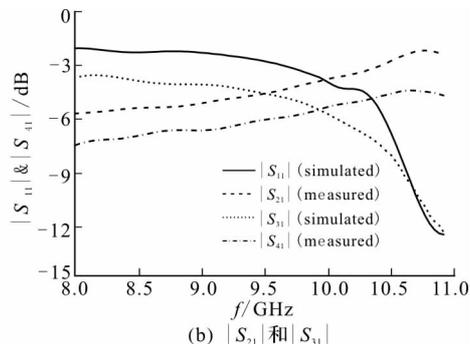


图5 新型 SIW 三孔定向耦合器

Fig. 5 Circuit of the new SIW three apertures directional coupler



(a)  $|S_{11}|$  和  $|S_{41}|$



(b)  $|S_{21}|$  和  $|S_{31}|$

图6 新型 SIW 三孔定向耦合器的 S 参数

Fig. 6 S-parameter of the new SIW three apertures directional coupler

该耦合器在 8.6 - 10.6 GHz 的频率范围内,实测的输入端反射系数小于 -17 dB,隔离口的电压传输系数小于 -15 dB,相对带宽达到 20%。通带内仿真的直通口与耦合口的电压传输系数均在 -6.2 - -2.6 dB 之间,实测结果在 -8.2 - -3.3 dB 之间。中心频率处,二者大小几乎相等,实测结果约为 -6.1 dB,而隔离口的电压传输系数为 -22.4 dB,可见,该耦合器的隔离度大于 15 dB。

该耦合器的工作频带较宽,隔离度较高,但插入损耗较大,仿真结果为 1.5 dB 左右,这是由耦合孔的不连续性、哑铃形槽的空间辐射和微带-SIW 转接器的损耗造成的。而实测的  $|S_{21}|$  和  $|S_{31}|$  比仿真结果低 1.4

dB 左右,  $|S_{11}|$  和  $|S_{41}|$  略高于仿真结果,这主要是由于介质板的不稳定性和 SMA 接头的损耗引起的。

## 4 结束语

本文从传统矩形波导  $N$  元均匀多孔定向耦合器的原理出发,分析得出 SIW 多孔定向耦合器的设计方法和步骤,并首次在耦合孔的上表面金属开哑铃形槽来调节耦合强度,从而设计了一种新型 SIW 三孔定向耦合器。相比于双孔定向耦合器而言各项指标均有较大改善,可以广泛应用于微波毫米波系统中。

### 参考文献(References):

- [1] Chiu Juichieh, Lin Jihming, Houng Mauphon, et al. A PCB-compatible 3 dB coupler using microstrip-to-CPW via-hole transitions[J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2006, 16(6): 369-371.
- [2] Hildebrand Louis T. Results for a simple compact narrow-wall directional coupler[J]. IEEE microwave and guided wave letters, 2000, 10(6): 231-232.
- [3] Chen J X, Hong W, Hao Z C, et al. Development of a low cost microwave mixer using a broad-band substrate integrated waveguide (SIW) coupler[J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2006, 16(2): 84-86.
- [4] Wu K. Integration and interconnect techniques of planar and nonplanar structures for microwave and millimeter-wave circuits-current status and future trend[C]//In Asia-pacific microwave conf proc. Taipei:IEEE press,2001:411-416.
- [5] Sarhadi K, Shahabadi M. Wideband substrate integrated waveguide power splitter with high isolation[J]. IEEE microwave antennas propagation, 2010, 4(7): 817-821.
- [6] 邹雄,童创明,周明,等. X波段基片集成波导四路功分器的设计[J]. 工程设计学报,2011,18(2):144-148.  
ZOU Xiong, TONG Chuangming, ZHOU Ming, et al. Design of an X-band four-way substrate integrated waveguide power divider[J]. Journal of engineering design, 2011,18(2):144-148. (in Chinese)
- [7] 邹雄,童创明,黄学宇. 基片集成波导3 dB定向耦合器的设计[C]//2011年全国微波毫米波会议. 青岛:中国电子学会,2011:2-5.  
ZOU Xiong, TONG Chuangming, HUANG Xueyu. Design of a 3 dB directional coupler based on substrate integrated waveguide[C]//2011 national conference on microwave and millimeter wave in China. Qingdao: Chinese institute of electronics, 2011: 2-5. (in Chinese)
- [8] 李皓,陈安定,洪伟,等. 基片集成波导定向耦合器的仿真与实验研究[J]. 微波学报,2004,20(4):54-56.  
LI Hao, CHEN Anding, HONG Wei, et al. Investigations on directional couplers based on substrate integrated waveguide[J]. Journal of microwaves, 2004, 20(4): 54-56. (in Chinese)
- [9] Guo Hua Zhai, Wei Hong, Ke Wu, et al. Folded half mode substrate integrated waveguide 3 dB coupler[J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2008, 18(8): 512-514.
- [10] Qiao Li Zhang, Wen Yan Yin, Sailing He, et al. Compact substrate integrated waveguide(SIW) bandpass filter with complementary split-ring resonators(CSRRs)[J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2010, 20(8): 426-428.
- [11] Xiong Zou, Chuangming Tong, Dingwang Yu. Design of an c-band dysmmetrical eindow nandpass gilter nased on dubstrate integrated eaveguide[C]//2011 cross strait quad-regional radio science and wireless technology conference. Harbin: Harbin institute of technology, 2011: 571-574.
- [12] Yuandan Dong, Tatsuo Itoh. Miniaturized substrate integrated waveguide slot antennas based on negative order resonance[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2010, 58(12): 3856-3864.
- [13] Wu Linan, Zhang Xuchun, Tong Chuang-ming, et al. A new substrate integrated waveguide six-port circuit [C]//2010 international conference on microwave and millimeter wave technology (ICMMT 2010). Chengdu: IEEE press,2010: 59-61.
- [14] 顾瑞龙,沈民谊. 电磁场与微波技术与天线[M]. 北京:国防工业出版社,1980.  
GU Ruilong, SHEN Minyi. Microwave technology and antennas[M]. Beijing:National defense industry press, 1980. (in Chinese)

(编辑:田新华)

## Design of A New Three Apertures Directional Coupler Based on Substrate Integrated Waveguides

ZOU Xiong<sup>1,2</sup>, TONG Chuang-ming<sup>1,2</sup>, CHEN HAO<sup>1</sup>, YU Ding-wang<sup>1</sup>, BAO Jun-song<sup>1</sup>

(1. School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2. Southeast University State Key Lab of Millimeter Waves, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In this paper, a SIW three apertures directional coupler is designed by the theory of rectangular waveguide multi-aperture directional coupler and the equivalent relation between SIW and rectangular waveguide. Then, a new three apertures directional coupler is proposed through opening a dumbbell-shaped slot on the metallic surface of coupling aperture. The experiment result shows that the performance of the directional coupler is greatly enhanced. Within the frequency range of 8.6 GHz - 10.6 GHz, the reflection coefficient of the input and transmission coefficient of the isolated port are both below -15 dB, and the relative bandwidth is 20%. Transmissions of the straight port and coupled port in the pass-band are between -8.2 dB and -3.3 dB. This coupler's coupling is about 6 dB, and the isolation is over 15 dB.

**Key words:** substrate integrated waveguide; directional coupler; rectangular waveguide; metallized vent

(上接第 24 页)

[7] MIL-F-8785C. 军用规范——有人驾驶飞机的飞行品质的背景资料和使用指南[S].

MIL-F-8785C. Background information and user guided for MIL-F-8785C, military specification - flying qualities of piloted airplanes[S].

[8] 王大海, 苏彬. 舰面运动对弹射起飞特性的影响[J]. 飞行力学, 1994, 12(1): 59-63.

WANG Dahai, SU Bin. The deck motion effects on the catapult assisted take-off characteristics of the carrier-based airplane [J]. Flight dynamics, 1994, 12(1): 59-63. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)

## Static Balance Analysis of Carrier - Based Aircraft Catapult Launch with Six Degrees of Freedom

BAI Shuang-gang<sup>1</sup>, HU Meng-quan<sup>1</sup>, DUAN Jin-tan<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** Static balance is the initial condition of catapult launch dynamic analysis, and the foundation of establishing the catapult launch model. Carrier, aircraft and landing gears, etc. are considered as multi-motion bodies that have their own masses, and the coupling relationships within these multi-motion bodies are also analyzed. The six degrees of freedom model of carrier-based aircraft is established in the condition of static balance, with the influences of carrier movement, deck wind and the airflow interference on aircraft considered. This model is applied to calculate and simulate the static balance of aircraft in different situations. The simulation and calculation results are consistent with the actual situation, which lays a foundation of dynamics analysis on carrier-based aircraft catapult launch with the six degrees of freedom model.

**Key words:** carrier-based aircraft; static balance; catapult launch; six degrees of freedom