文章编号:1001-893X(2012)07-1155-05

# 一种 Ka 频段瓦片式 TR 组件子阵集成方案\*

#### 赵青

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:提出了一种 Ka 频段瓦片式 TR 组件子阵集成方案,采用多层电路技术、内层带状线功分器、 优化脊波导口径、同型端口集中分布等手段大幅提高集成度,采用高可靠性小截面脊波导实现模块 间高性能垂直互联。给出了 TR 组件子阵电路布局设计,对小截面脊波导传输特性、脊波导 - 微带 探针过渡和集成功率分配网络等关键无源电路进行了设计、仿真和测试。测试结果表明其性能和尺 寸满足 Ka 频段 TR 组件子阵集成要求。

关键词:有源相控阵;TR 组件;Ka 频段;垂直互联;无源电路

中图分类号:TN80 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.07.022

## A Sub-array Integration Solution for Ka-band Tile-type TR Module

## ZHAO Qing

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract**: A new sub – array integration solution for Ka band tile – type TR module is proposed. By applying multilayer circuit technology, inner layer stripline power divider, section optimized ridge waveguide, same type ports centralized distribution, the circuit integration level is increased substantially. Low cross – profile ridge waveguide is employed as vertical interconnection between modules. Layout of sub – array circuit is provided. Passive components such as ridge waveguide transition and divider are modeled, simulated and demonstrated. The result shows that the size and performance of these passive circuits can fulfill the integration requirements. **Key words**: active phased array; TR module; Ka – band; vertical interconnection; passive circuit

## 1 引 言

按组装方式进行划分,二维有源相控阵天线 TR 组件可分为砖块式和瓦片式两种结构<sup>[1]</sup>。近年来, 砖块式结构在有源阵列中得到广泛应用,因为其技 术成熟度高,电路设计及组装容易实现。但其子阵 集成度低、纵向尺寸大,不利于共形;散热路径长,难 以实现大型阵列应用并保证 TR 组件长期可靠工 作。而瓦片式 TR 组件技术难度大,单元尺寸更小, 必须采用高密度集成技术(HDI)和小型化、高性能 高可靠射频垂直互联。但瓦片式 TR 组件可以采用 整体液冷散热,具有优良的散热能力,子阵集成度 高,在降低 TR 组件成本、减小体积尺寸、减轻设备 重量方面具有优势,易于实现大规模阵列。随着集 成化程度的逐步提高,瓦片式 TR 组件有望在现有小 型化砖式 TR 组件基础上体积减小20%~80%。由于 z向尺寸大幅缩减,热路径缩短,散热效率也相应提 高,具有更高可靠性。文献[2]提供了砖瓦两种结构 TR 组件在体积、重量、成本等几方面的详细对比。

未来几年,随着自动化微组装技术的普及,瓦片 式 TR 组件由于集成度更高、芯片布局更为规则,可 一次性完成子阵模块所有芯片的自动化装配,其生 产效率将大大提升,因此,在批生产阶段将具有更好 的生产性。同时,瓦片式 TR 组件的低廓线结构特 点,便于天线实现共形设计,特别适合于在共形有源 相控阵领域的应用。

美国在瓦式相控阵天线领域的研究开展的最早, 相关报道主要集中在系统整机的研制<sup>[3]</sup>,而鲜有提及 关键技术的具体设计。近年来,欧洲对该领域关注度 提高,就瓦式相控阵天线 TR 组件的多功能专用芯片、 垂直互联技术、多层电路设计、子阵设计等各项关键 技术都有研究<sup>[4-5]</sup>。但这些解决方案目前多处于学 术科研机构的实验室阶段,其中一些方案在工程应用 实际环境条件的工作效果有待验证。毫米波频段由 于工作波长很短,对瓦式 TR 组件的设计、生产、制造、 组装各环节要求更高。毫米波瓦式 TR 组件的发展有 赖于先进制造业的配套发展。

本文提出的子阵集成方案,以目前国内成熟的 加工制造技术及组装工艺为设计基础,以低成本、高 可靠为目标,采用脊波导保证信号垂直传输的高可 靠互联。对子阵进行合理的模块划分,并通过采用 多层电路、在内层设计功分网络、同型端口集中布局 等方式大幅提高电路集成度。

#### 2 系统方案

#### 2.1 半双工 Ka 频段 TR 组件功能及组成

半双工 TR 组件需要实现接收低噪声放大及发 射功率放大,并以电子开关实现收发切换。为提高 集成度,一般采用双向工作的移相器及衰减器做收 发公共支路。通常一个 TR 组件集成 2n 个通道,以 Wilkinson 功分器实现各通道按比例功率分配及合 成,常见为等功分;为降低副瓣电平,也有用不等功 分来实现幅度加权的。针对具体指标分配情况,可 能还需要在功分合成网络后加驱动,功能框图见图 1,虚线框内为 TR 组件。



图 1 半双工体制 TR 组件框图 Fig.1 Architecture of TR module

#### 2.2 TR 组件子阵集成方案

设垂直于天线口径面为 z 向,瓦式 TR 组件结构 特点要求通道间距在 x,y 方向都严格受限于波长的 比值。若扫描角度 60°,则单元间距在 x,y 方向均要 求小于 0.53 $\lambda$ 。以中心频率30 GHz的阵列天线为例, TR 组件通道间距小于等于5.3 mm。对于瓦式 TR 组 件,则要求通道面积小于等于5.3 mm×5.3 mm。在此 范围内要实现收发放大、移相衰减等功能,即使采用 高集成度专用芯片也可能无法完成电路排布。因此, 需要把 TR 组件进行模块划分。

以满足性能指标要求为前提,以设备尽量简单 并具工艺可实现性为原则,划分方式比较灵活。可 按功能芯片进行划分,如所有的收发放大器划分为 一个模块,移相衰减划分为另一模块。根据实际电 路排布,本文按通道数划分为两个模块,单行通道划 分为一个模块,双行划分为另一模块。两模块叠装 为一个完整 TR 组件,每个模块的输入或输出接口 穿过另一模块,最终在顶层汇集为完整的对天线接 口数,如图 2 所示。



图 2 按行列数划分模块的方案 Fig.2 Division scheme according to row number

## 3 子阵电路布局设计

大规模及超大规模阵列,一般由小规模子阵构 成,如 256 阵列可由 4 个 8 × 8 子阵组成。子阵划分 要综合各种因素,规模过大,可能会带来某些电路加 工困难、腔体结构表面平整度降低等问题;而规模太 小,不仅组装工作量增加,而且集成度也降低。本文 以 8 × 8 通道数的子阵作为研究目标。

图 3 为 8×8 子阵两模块电路布局图。图 3(a) 所示模块一与天线对接,包括 8 个输入口、64 个输 出口,其中 32 个为模块二输出信号提供到天线的传 输通道;图 3(b)所示模块二与模块一对接,包括 16 个输入口、32 个输出口,其中有 8 个输入口为模块 一输入(都对发射状态而言)。两模块垂直组装为一 体后,对天线阵列接口如图 4 所示。为提高集成度, 每个模块电路集成一分四功分合成网络,输入接口 数减少为通道数 1/4。



(a)模块一电路布局
(b)模块二电路布局
图 3 8×8子阵两模块电路布局图
Fig.3 Layout of 8×8 array circuit



图 4 矩形布阵示意图 Fig.4 Diagram of rectangle array

## 4 关键无源部件设计

#### 4.1 Ka 频段脊波导垂直互联

对于较低工作频率,可采用同轴接插件等方式 实现模块间的垂直互联。Ku频段也采用 BGA 工艺 实现垂直互联<sup>[6]</sup>。本方案采用脊波导互联,以获得 低插损、高可靠性。脊波导压缩波导宽边长度,提高 集成度。

对该过渡结构加工参数进行容差分析得到,在 ±0.02 mm的电路加工精度范围内,带内 S<sub>11</sub>仿真结 果均优于 – 20 dB。

对组装过程引入的各项误差参数容差分析发现,垂直于宽边方向的装配误差对过渡性能影响较大。根据波导短路面和输入波导在垂直于宽边方向的装配误差的容差分析结果,误差取值在 $\pm 0.05$  mm以内,带内 $S_{11}$ 仿真结果低于 – 20 dB。

脊波导垂直互联具有较高容差性,加工及组装 公差并不会导致驻波大幅恶化,通道幅相一致性更 易得到保证。对大规模阵列,这一点很关键。

#### 4.2 平面集成功分合成网络

图 5 给出一分四功分网络电路布局及场仿真结果。采用带状线 Wilkinson 功分器与芯片连接处过 渡为微带线。由仿真结果可看出,4 个功分端口之 间幅度一致性在0.1 dB以内。出于电路布局的考 虑,4个输出端口接微带线长度略有差异,带来8°相 位差。通过相控阵天线校准技术,这种固定相位误 差的影响可以去掉。







图 5 一分四功分网络电路布局及场仿真 Fig.51-4 divider network circuit layout and simulation result

#### 5 结构设计

完整的TR组件由两个模块、共计4个金属腔体 及两块多层电路基板组装而成,多层电路板与腔体 压合成形为一体,如图6所示。



图 6 结构爆炸图 Fig.6 Explosive view of TR module

## 6 实验及验证

6.1 单脊波导到标准波导测试

对基于脊波导的垂直互联进行测试,设计脊波 导到标准波导过渡。结构及仿真性能如图7所示。



图 7 脊波导到标准波导过渡 Fig.7 Ridge waveguide to waveguide transition

表1给出单个脊波导到标准波导变换背靠背结构 *S*参数测试结果。扣除掉两个波导同轴过渡插损约 0.9~1 dB,单个脊波导到标准波导过渡测试件插损0.4 dB以内。

表1 单脊波导到标准波导变换测试结果

Table 1 Measurement of ridge – WG to WG					
频率/GHz	$S_{21}/\mathrm{dB}$	$S_{11}/\mathrm{dB}$			
29	-0.4	- 12.7			
30	-0.3	- 19.8			
31	-0.3	-20.7			

## 6.2 四端口脊波导阵列到四端口标准波导阵列变 换及测试

为实现对 TR 组件每个通道电性能的独立测试,除单个脊波导到标准波导变换,还须解决阵列脊

波导测试问题。图 8 所示为 4 个脊波导组到四错位 标准波导变换,可实现对每个通道的单独测量。其 结构仿真结果如图 9 所示。



图 8 四端口单脊波导到标准波导过渡件结构图 Fig.8 Structure of the 4 - port ridge WG to WG



图 9 四口单脊波导到标准波导变换结构仿真 Fig.9 Schematic diagram of 4 – port ridge WG to WG and simulation result

表2给出了四端口脊波导到标准波导过渡的测试结果。扣除标准波导同轴过渡的插损,脊波导到标准波导过渡插损约0.5 dB,带内波动0.3 dB以内。

表 2 四端口单脊波导到标准波导过渡

Table 2 Measurement of 4 – port ridge – wG to wG									
频率/GHz -	$P_1$		Р	$P_2$		$P_3$		$P_4$	
	$S_{21}/\mathrm{dB}$	$S_{11}/\mathrm{dB}$	$S_{21}/\mathrm{dB}$	$S_{11}/\mathrm{dB}$	$S_{21}/\mathrm{dB}$	$S_{11}/\mathrm{dB}$	$S_{21}/\mathrm{dB}$	$S_{11}/\mathrm{dB}$	
29	-0.3	- 22.2	-0.35	- 10.2	-0.4	- 10.3	-0.2	- 23.8	
30	-0.4	- 11.6	-0.30	- 16.0	-0.2	- 16.0	-0.4	- 12.2	
31	-0.5	- 18.7	-0.50	- 12.0	-0.5	- 12.4	-0.5	- 17.8	
32	-0.3	- 12.3	-0.35	- 11.0	-0.3	- 11.0	-0.4	- 12.9	

#### 6.3 脊波导微带过渡测试

分别对3片脊波导微带过渡电路进行测试,每 片测试电路包含了4对背靠背过渡及一段微带线, 如图 10 所示。长微带线约40 mm,短微带线约 30 mm,从上往下分别以 No.1~No.4进行编号。扣 除掉测试用波导同轴过渡(一对),脊波导到标准波 导过渡(一对)的插损实测结果如表 3 所示。

第7期

表 3 脊波导微带过渡测试 Table 3 Measurement of ridge WG - to - MS

Table 5 Measurement of Huge work to this								
基片 -	$S_{21}/\mathrm{dB}$			$S_{11}/\mathrm{dB}$				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.1	No.2	No.3	No.4
基片一	- 1.00	-0.80	-0.85	-0.60	- 13.10	- 20.80	- 18.20	- 15.30
基片二	-0.70	-0.70	-0.70	-0.60	-9.50	- 21.70	- 13.70	- 22.80
基片三	-0.80	-0.85	-0.75	-0.65	- 11.20	- 11.15	- 21.40	- 12.50



图 10 脊波导到微带过渡测试电路 Fig. 10 Ridge WG-to-MS layout

## 7 结 论

本文提出了一种基于小截面脊波导的 Ka 频段 瓦式 TR 组件子阵集成方案。本方案继承了波导连 接的高可靠性,同时又大幅提高了电路集成度。对 关键无源部件的数值分析表明本方案具有良好容差 性,这对保证阵列的通道间一致性极为关键。实验 结果与仿真吻合。下一步在对无源电路进一步优化 的基础上,还要解决有源高密度组装后可能带来的 其他问题。

#### 参考文献:

- Gregorwich W. Conformal Airborne Arrays[C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Snawmass at Aspen, Co: IEEE, 1997:463 – 470.
- [2] Haube M S, Wooldridge J J. High density packaging of X band active array modules[J]. IEEE MIT\_S Digest, 1997,

20(3): 279 - 291.

- [3] Watson T, Miller S, Kershner D, et al. Design of a K band Transmit Phased array for low earth orbit satellite communications[C]// Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology. Dana Point, California; IEEE, 2000;211 – 214.
- [4] Stefano Vaccaro, Daniel Llorens delRio, Roberto Torres Sánchez, et al. Low cost phased array for mobile Ku – band satellite terminal [C]//Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. Barcelona, Spain: IEEE, 2010: 1 – 5.
- [5] Rens Baggen, Stefano Vaccaro, Daniel Llorensdel Rio, et al. First Prototyping of a Compact Mobile Ku – Band Satellite Terminal[C]//Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. Barcelona, Spain: IEEE, 2010:1-4.
- [6] Schreiner M, Leier H, Menzel W, et al. Architecture and interconnect technologies for a novel conformal active phased array radar module[C]//Proceedings of 2003 IEEE MTT – S International Microwave Symposium Digest. Philadelphia: IEEE, 2003: 567 – 570.

#### 作者简介:

**赵** 青(1979—),女,四川泸州人,2004 年于电子科技 大学获硕士学位,现为工程师,主要从事毫米波组件的开发 研究工作。

ZHAO Qing was born in Luzhou, Sichuan Province, in 1979. She received the M.S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2004. She is now an engineer. Her research concerns R&D of millimeter wave module.

Email: qinglemon@gmail.com