

文章编号: 2095-4980(2021)01-0067-05

## 毫米波多功能和差网络设计

张 晨, 范少群, 赖清华

(中国电子科技集团公司 第三十八研究所, 安徽 合肥 230000)

**摘 要:** 设计了一种高集成多功能有源和差网络。该和差网络工作在 Ka 频段, 内部集成了无源和差器、功分器、有源收发组件、开关矩阵、控制电路等多个功能单元, 采用小型化、高集成设计方法, 大大减少了整个系统的质量和体积。实验结果表明, 在中心频点 3 GHz 带宽内, 该和差网络实现了良好的端口匹配, 小型化的设计没有影响射频性能。

**关键词:** 毫米波; 和差网络; 小型化; 多功能

**中图分类号:** TN819.1

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2019268

## Design of a millimeter wave band sum-difference network with multi-function

ZHANG Chen, FAN Shaoqun, LAI Qinghua

(The 38th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Hefei Anhui 230000, China)

**Abstract:** A kind of high integrated multifunctional sum-difference network which works in the millimeter wave band is presented. In the sum-difference network, a passive sum-difference network, dividers, active receivers, active transmitters, RF switches and a control circuit are integrated. Compared with the conventional RF sum-difference network, this highly integrated design proves to have much less volume and weight. As shown in the experiment measurement, the ports are well matched, and good RF performances are observed within highly reduced design.

**Keywords:** millimeter wave band; sum-difference network; miniaturized; multifunctional

和差网络是跟踪雷达系统中的一个常用射频器件, 通过对来自不同天线子阵信号的处理, 得到和波束、方位差波束、俯仰差波束。雷达系统通过处理和差网络生成的波束信号, 得到目标的位置、高度等信息<sup>[1]</sup>。

随着器件水平、设计水平的发展, 雷达、通信等电子系统的工作频率逐步扩展到毫米波频段。毫米波频段具有可用频带宽、设备尺寸小、抗干扰能力强、机动性高等优点。由于毫米波频段器件尺寸小, 精度要求高, 工作在毫米波频段的有源相控阵天线被要求具备高集成、高可靠性的特性。

为了满足弹载、机载、星载等狭小平台的要求, 需要在有限的空间内高密度地集成毫米波有天线系统的各个部分。针对雷达系统设计的射频器件多为分立的模块, 组装后质量体积大<sup>[2]</sup>。目前的小型化设计方案, 大多数针对某一种器件<sup>[3]</sup>。有文献[4]报道了收发电路与和差网络集成设计方案, 采用微带和差网络, 收发组件与和差网络集成在同一块介质板上, 大大提高了集成度。然而该设计采用的是微带和差网络, 容易实现高集成设计, 但是损耗和功率容量等性能不如波导和差网络<sup>[5-6]</sup>。

本文提出了一种多功能和差网络设计, 内部集成了无源和差网络、功分器、有源收发组件、开关矩阵、控制电路等多个功能单元, 采用小型化、高集成设计方法, 大大减少了整个系统的质量和体积。无源和差网络采用的是扁平波导和差设计, 提高了和差性能。测试结果表明, 该网络性能良好。

### 1 集成方案设计

为了实现系统的高度集成, 多功能和差网络需要完成和差波束形成、补偿放大、状态切换等功能。系统的功能组成如图 1 所示。

收稿日期: 2019-07-26; 修回日期: 2019-10-09

作者简介: 张 晨(1988-), 男, 博士, 主要研究方向为微波系统集成、数字电路设计、射频电路。email:windzc0557@163.com

和差网络具有 8 个信号端口(P1~P8)，每 2 个对应一个象限。射频信号进入多功能和差网络后首先通过功分芯片合成 4 个信号，对应 4 个象限。然后在收发通道对信号进行放大和移相衰减。4 个象限的信号进入波导和差网络，形成和差波束信号。总口 Q1 至 Q4 分别是接收和端口、发射总口、方位差端口、俯仰差端口。模块的 P9 端口用于连接校正天线。

模块采用分层设计，具体分层如图 2 所示。和差网络中，低频电路为射频芯片供电，并控制芯片状态和衰减移相。为了增加通道间隔离度，收发通道的不同链路之间放置隔筋。开关矩阵由射频的开关阵列组成，完成收发和状态切换。为保证可靠性，对电路部分整体气密安装。气密层与波导器件通过玻璃绝缘子互联。

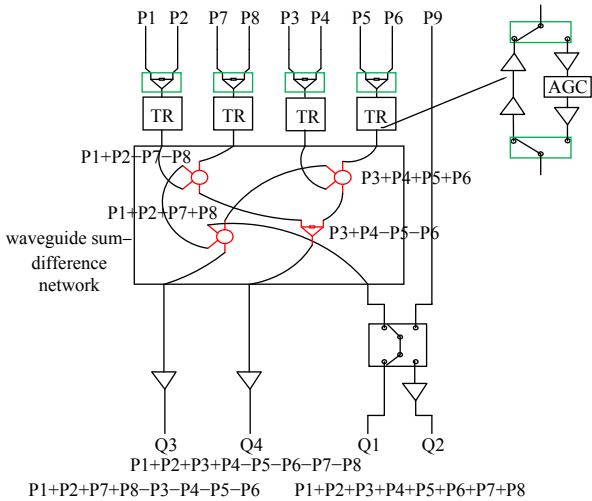


Fig.1 Block diagram of the sum-difference network  
图 1 多功能和差网络框图

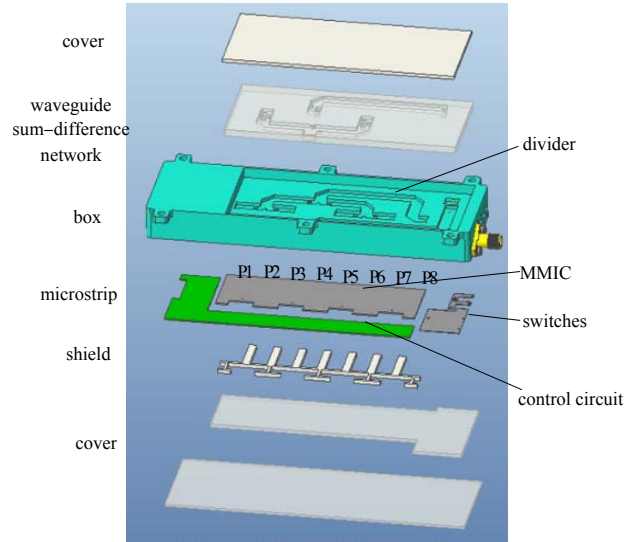


Fig.2 Internal structure of the sum-difference network  
图 2 多功能和差网络分层设计

## 2 仿真设计

### 2.1 波导同轴转换设计

为保证模块内部裸芯片气密性和实现信号垂直互联，需要设计波导到同轴转换。波同转换的原理如图 3 所示，采用的是同轴探针馈电的形式。

对波导同轴建模，仿真模型如图 4。玻璃绝缘子上部为空气腔，用于安装微带电路。微带电路与玻璃绝缘子的内导体通过金丝键合连接。玻璃绝缘子穿过波导金属壁，下端的内导体伸入波导腔中作为馈电探针。在 HFSS 软件中对该模型仿真，仿真结果如图 5 所示。可以看出回波损耗优于-30 dB。

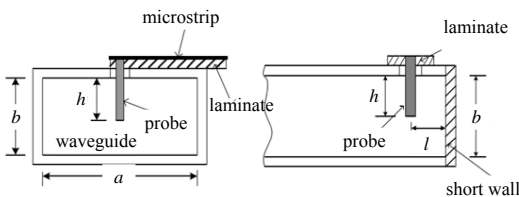


Fig.3 Transform of waveguide to coax  
图 3 波导到同轴转换示意图

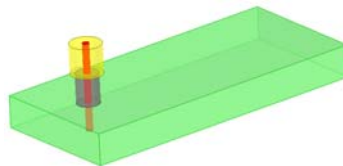


Fig.4 Model of waveguide to coax transform  
图 4 波导到同轴转换仿真模型

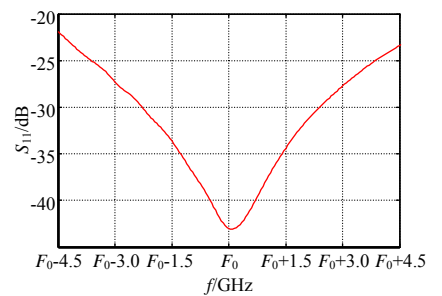


Fig.5 Simulation result of waveguide to coax transform  
图 5 波导到同轴转换仿真结果

### 2.2 波导和差单元设计

和差网络常见的有微带和波导等形式。微带和差网络的剖面低，质量小，通过优化设计可以降低插损和驻波<sup>[4]</sup>。但是对于毫米波频段，考虑到加工和工艺，波导和差网络性能更加优异。

为了实现高幅相一致性、零点深度等指标，故采用波导魔 T 结构的波导合路器来实现信号的和差<sup>[5]</sup>。波导和差单元的仿真模型如图 6 所示。

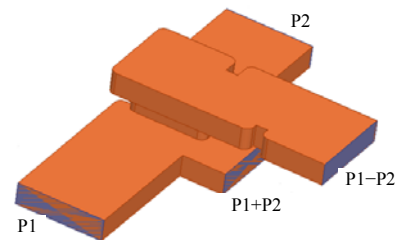


Fig.6 Model of waveguide sum-difference network unit  
图 6 波导和差单元仿真模型

在 HFSS 中进行仿真，波导和差单元的仿真结果如图 7~9 所示。可以看出，在频带中心附近的 3 GHz 带宽内，各端口的回波损耗优于-20 dB。

理论上两个分口到和端口的相位差相同，到差端口的相位相差 180°。从仿真结果看，两个分口到和端口的相位差在 2°范围内，两个分口到差端口的相位差与 180°的理论值相比较，误差小于 3°。

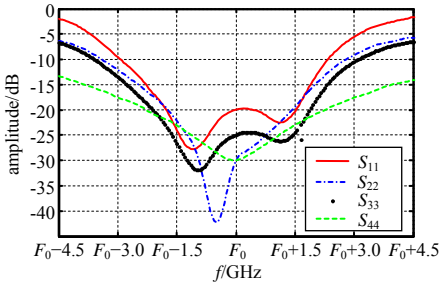


Fig.7 Return loss simulation  
图 7 波导和差单元回波损耗仿真结果

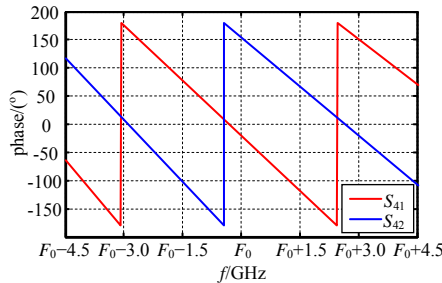


Fig.8 Phase difference of port 1 and port 2 to difference port  
图 8 波导和差单元分口到差端口的相位差仿真结果

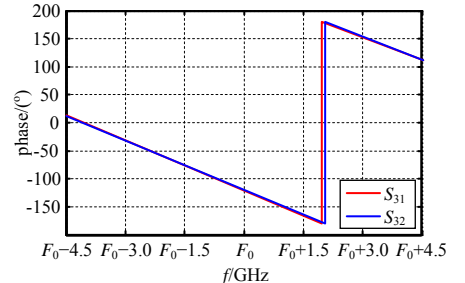


Fig.9 Phase difference of port 1 and port 2 to sum port  
图 9 波导和差单元分口到和端口的相位差仿真结果

### 3 和差网络整体仿真

基于上述的波导和差单元，设计了一种低剖面的波导和差网络。仿真模型和仿真结果如图 10 所示。和差网络具有 4 个分口，分别对应 4 个象限的信号。和差网络具有 3 个总口，分别是阵面和、方位差、俯仰差信号。

从图中可以看出，在频带中心附近的 3 GHz 带宽内，所有端口的回波损耗优于-20 dB，和波束的插损扣除功分比后小于 0.4 dB。

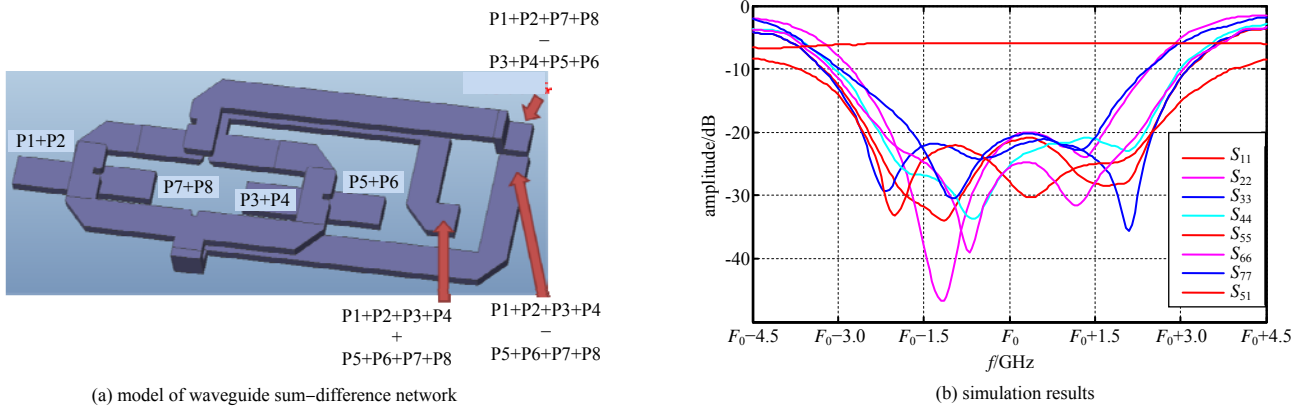


Fig.10 Model of waveguide sum-difference network and simulation results  
图 10 波导和差网络仿真模型和仿真结果

## 4 实物测试

### 4.1 单通道测试

为了验证有源及无源部分的仿真和设计，加工出实物并进行了测试。测试使用的仪表为罗德与施瓦茨公司的矢量网络分析仪 ZVA40、射频信号发生器 SMB100A、频谱分析仪 FSV40。分别测试了有源和差网络接收和发射状态的单通道性能，测试结果如图 11 和图 12 所示。

有源和差网络发射状态测试时，从总口馈入信号并由 8 个分口发射，图 11 为 P1 至 P8 的分口单通道饱和发射功率。

有源和差网络接收状态测试时，从待测分口馈入能量，其他分口连接负载，测试单个分口到 3 个总口(和端口、方位差端口、俯仰差端口)的增益。应当注意，此时测出的增益实际包含了分口到总口的功分比插损。

从测试结果可以看出，有源和差网络实现了收发切换、信号放大、功率分配等功能，证明整体设计正确，有源部分工作正常。发射状态下，同一通道的带内起伏不超过 ±0.7 dB，同一频点不同通道幅度不一致性不超过 ±0.6 dB。接收状态下，同一频点不同通道幅度不一致性最大约 ±1 dB。

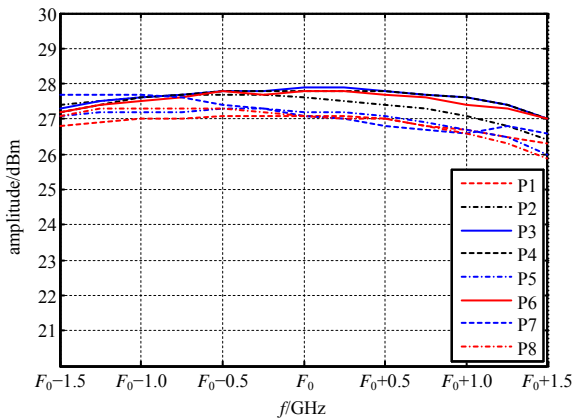


Fig. 11 Output power of 8 transmitting channels  
图 11 单通道饱和发射功率测试

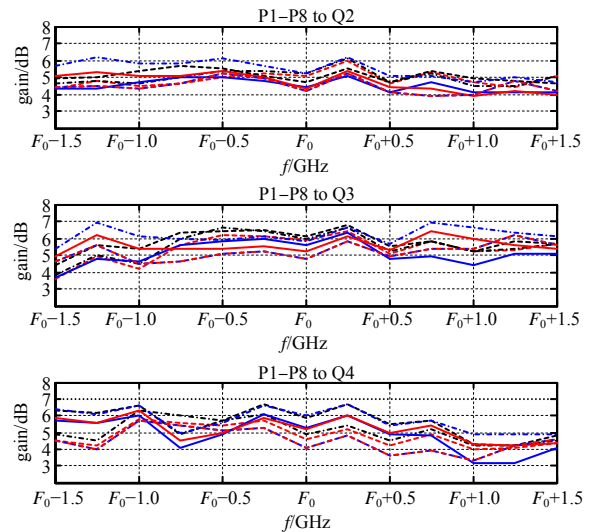


Fig. 12 Gain of receive channels from port P1-P8 to port Q2-Q4  
图 12 单通道接收增益测试

#### 4.2 总口测试

在产生和差信号时，有源和差网络的所有分口需要同时馈电，只借助仪表无法测试和差信号的指标。为了测试和差信号，实验设计了一种半测试法进行验证。半测试法的具体过程是：

1) 在接收状态测试分口 P1 至 P8 到总口 Q2, Q3, Q4 的  $S_{21}$ ，得到幅度和相位。以 P1 到各总口的相位为基准得到各通道的相位差。

2) 根据相位差和幅度增益，得到各分口信号在总口处叠加的信号，然后积分得到各总口处相对分口信号的幅度增益值，即和差信号的增益。

计算的结果如图 13 所示。用差信号的幅度增益减去和信号的幅度增益，即可得到差波束的零深。为了验证半测试法得到的差波束零深是否准确，采用一个 1:8 功分器模拟真实使用情形，并对比结果。测试时将功分器分口与和差网络分口相连，在功分器总口馈电，测量 Q2 至 Q3 的  $S_{21}$ 。然后用差端口的幅度增益减去和端口的幅度增益，得到差波束的零深。测量和比较结果见图 14，可以看出两种方法的幅度和变化趋势比较相似。特别是在中心频点 1 GHz 附近得到的结果比较近似，差信号的零深优于 -30 dB。

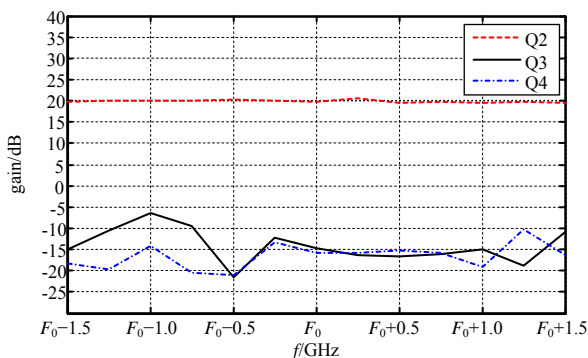


Fig. 13 Gain of sum and difference ports (Q2: sum port; Q3: azimuth difference port; Q4: elevation difference port)  
图 13 和差信号幅度增益(Q2: 和通道; Q3: 方位差通道; Q4: 俯仰差通道)

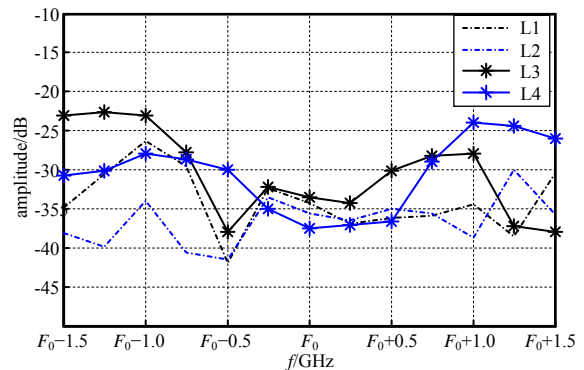


Fig. 14 Null depth of difference beam from 2 measure methods (L1: azimuth difference with test-calculation method; L2: elevation difference with test-calculation method; L3: azimuth difference with divider-simulation method; L4: elevation difference with divider-simulation method)  
图 14 两种方法得到的差波束零深曲线(L1: 半测试法方位差零深; L2: 半测试法俯仰差零深; L3: 模拟法方位差零深; L4: 模拟法俯仰差零深)

## 5 结论

本文提出了一种工作在毫米波频段的集成式多功能和差网络，包含了收发通道、波导和差器、功分器、开关矩阵等功能模块。仿真结果显示，和差网络在 3 GHz 的范围内实现了较好的端口特性和和差波束特性。文中对有源和差网络实物进行了单通道测试以及和差性能测试计算。单通道的接收和发射测试发现模块的幅度不一致性和带内起伏不够理想，主要来源于工艺加工误差和功放芯片本身的不一致性。总口中的和端口表现出较小的带内起伏，差信号在中心频点附近零深较理想，达到了设计的目的。

(下转第 74 页)