

文章编号: 2095-4980(2019)06-1041-04

## V 频段小型化集成接收前端技术

裴乃昌

(中国电子科技集团公司 第十研究所, 四川 成都 610036)

**摘要:** V 频段小型化集成接收前端主要实现对 V 频段毫米波信号的低驻波、低噪声接收和产品小型化。采用多功能芯片与混合集成技术, 实现了毫米波接收信道的小型化集成。引进了微带正交耦合器, 构成平衡式分布放大优化射频接收端口输入驻波系数的设计思路, 替换了体积笨重的波导宽带隔离器, 减小了毫米波接收前端体积和重量。通过对 V 频段波导微带过渡探针的容错性设计, 降低了 V 频段毫米波接收前端的组装难度, 提高了接收前端的一次组装合格率。最终实现批量化 V 频段小型化集成接收前端射频的输入驻波系数优于 1.6, 噪声系数优于 4.2 dB, 外形尺寸(含插座)33.4 mm×30 mm×12 mm。

**关键词:** V 频段; 接收前端; 驻波系数; 正交耦合器; 波导微带探针

**中图分类号:** TN820

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201906.1041

## Miniaturized integrated receiving front-end in V-band

PEI Naichang

(The 10th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu Sichuan 610036, China)

**Abstract:** A V-band miniaturized integrated receiving front-end mainly realizes the low Voltage Standing Wave Ratio(VSWR), low noise and miniaturization of V-band millimeter wave signal. In this paper, the miniaturized integration of millimeter wave receiver channel is realized by using multi-function chip and hybrid integration technology. A microstrip quadrature coupler is introduced to form a balanced distribution amplifier to optimize the input coefficient of the radio frequency receiving port, replacing the bulky waveguide broadband isolator, which reduces the volume and weight of the millimeter wave receiver front-end. Through the fault tolerance design of the transition probe of V-band waveguide, the assembly difficulty in the receiving front of the V-band is reduced, and the one-time assembly qualification rate of the front-end is improved. The input standing wave coefficient of the quantization V-band miniaturized integrated receiving front-end Radio Frequency(RF) is better than 1.6, the noise coefficient is better than 4.2 dB, and the external dimension(including the socket) is 33.4 mm × 30 mm × 12 mm. The V-band miniaturized integrated receiving front-end provides an effective solution for the integrated design and quantitative assembly production of V-band millimeter-wave miniaturization.

**Keywords:** V-band; front-end; Voltage Standing Wave Ratio; quadrature coupler; transition probe of waveguide

V 频段作为卫星大气遥感遥测的重要探测窗口, 1961 年 Meeks 等提出通过对 V 频段大气氧气吸收谱线的两侧进行多频观测, 从而描绘大气温度分布廓线的方法<sup>[1]</sup>, 这在气象探测领域已经得到了广泛应用<sup>[2-7]</sup>。美国的国防气象卫星(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)的探测仪器, 就包括了 7 通道微波垂直探测器(SSM/T), 其工作频率为 50~60 GHz<sup>[8]</sup>。国内早期的气象卫星微波辐射计有效载荷均采用进口的 V 频段毫米波接收设备。近年来, 随着国内毫米波技术的飞速发展, V 频段毫米波单片集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMICs)从无到有, 促进了 V 频段毫米波集成技术的快速发展, V 频段的收发组件的研制开发已经取得一定的突破<sup>[9-13]</sup>。但是 V 频段的低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)芯片输入端的驻波系数普遍很差, 通常在 2~2.5 之间。微波辐射计作为高灵敏度的接收射频, LNA 的反向噪声会明显恶化系统的温度灵敏

度。过去通常会采用波导宽带隔离器，优化驻波系数，但是波导宽带隔离器体积大。星载平台对设备体积、质量提出了苛刻要求，减小 V 频段接收前端的外形尺寸，提高产品的可生产性等问题亟需解决。

## 1 设计方案

V 频段小型化集成接收前端工作原理如图 1 所示，接收前端采用外差式正交下变频接收体制。接收通道包括三级低噪声放大、一级正交下变频和本振倍频链路。其工作流程如下：天线接收的毫米波信号经过波导微带过渡电路，将波导电路形式转换为微带电路，再经过正交耦合器 1，等幅度正交分成两路信号，分别经过 2 个 LNA，然后通过正交耦合器同相合成输出到后两级 LNA。最终在混频器多功能芯片中与外部提供的本振信号进行正交下变频，输出 I/Q 两路中频信号。为了实现接收前端的小型化设计，采用定制开发的混频多功能芯片单片与单功能芯片混合集成的设计方案。混频多功能芯片集成了 I/Q 正交混频器和本振二次倍频放大链路，并对前端的接插件进行高低频混装定制开发，将直流信号、中频信号和本振信号的馈线集成在一个接插件中。

### 1.1 V 频段分布式平衡放大设计

V 频段的 LNA 的输入驻波系数非常差，以 CHA2157 为例，在工作频带内其输入端的驻波系数为 3.1，不能满足项目低驻波的需求。为了优化接收前端的输入驻波系数，引入微带宽带正交耦合器构成平衡式分布放大电路。其工作原理图如图 2 所示，2 个低噪声放大器 LNA1 和 LNA2 为同一型号。假设 LNA1 和 LNA2 的输入驻波相同，则放大器输入端反射回来的信号经过正交耦合器 HYB1 时，在输入端口 P\_IN 会形成反向抵消隔离，在隔离端 ISO 处形成同相迭加，输出到负载 Term1 中。这样在射频输入端 P\_IN 的驻波系数主要与正交耦合器的平衡度和 2 个 LNA 的反射系数的一致性相关，而与 LNA 本身的输入驻波系数无关。该电路能够有效优化射频电路的输入驻波系数。

### 1.2 V 频段宽带 3 dB 电桥设计

微带 3 dB 电桥是一种常用的正交耦合器，其设计原理简单。但传统的微带 3 dB 电桥由 2 个  $\lambda/4$  长度耦合臂组成，其工作带宽通常只有 10% 左右<sup>[14]</sup>，无法满足项目的工作带宽需求。本文在传统的微带 3 dB 电桥基础上，增加一个耦合臂，构成一个三臂的 3 dB 电桥，其电路模型如图 3 所示。采用石英基板设计开发微带 3 dB 电桥，石英薄膜材料具有较低的介质损耗角(0.015‰)，比软基片材料低了一个量级<sup>[15]</sup>。且石英薄膜电路的加工精确度非常高( $\pm 0.0025$  mm)，比软基片的加工工艺高一个量级。采用石英基板设计的毫米波电路具有传输损耗低、加工精确度高的优点，其仿真结果见图 3。从仿真数据可以看出，三臂的 3 dB 电桥的 I/Q 两路幅度差异 0.1 dB 的工作带宽超过了 8 GHz，满足项目使用需求。

### 1.3 V 频段波导微带过渡电路容差设计

V 频段频率高，波长短，往往对毫米波产品的组装精确度要求更高，这严重制约了 V 频段毫米波设备从实验室产品向货架产品的转化。为了提高 V 频段小型化集成接收前端的可生产性和一次组装合格率，对毫米波接收

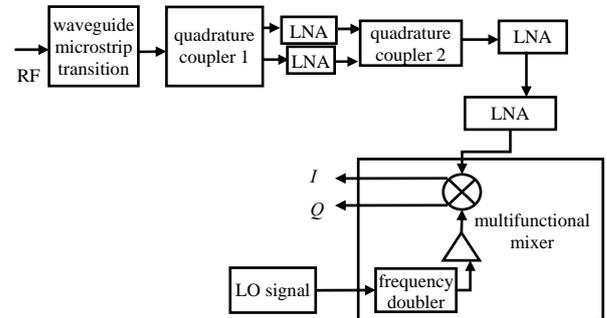


Fig.1 Block diagram of miniaturized integrated receiver front-end for V-band

图 1 V 频段小型化集成接收前端工作原理框图

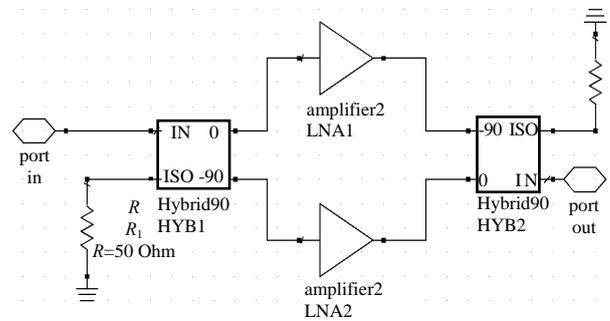


Fig.2 Block diagram of balanced distributed amplification based on quadrature coupler

图 2 基于正交耦合器的平衡分布式放大工作原理图

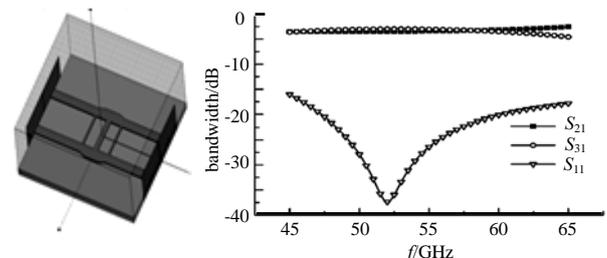


Fig.3 Circuit model and simulation data of 3 dB bridge in V band  
图 3 V 频段 3 dB 电桥电路模型及仿真数据

前端进行分析，发现波导微带过渡电路的水平位置对位精确度和微带片焊锡焊接厚度是毫米波前端的组装生产过程中较难控制的参数且直接影响产品的电气性能。考虑从设计上针对这两个问题做容错性设计，以提高产品的一次组装合格率。

采用三维电磁场仿真软件对波导微带探针模型进行容差仿真分析，如图 4 所示。可以看出，波导微带过渡电路在水平安装误差  $\pm 0.1$  mm 时，即组装时波导探针电路在水平中心没对齐的情况下，也能保证电路的  $S_{11}$  在  $-20$  dB 以下，有效降低了波导微带探针电路对水平安装误差的要求，降低了微带片在基片粘接组装工序的操作难度。从图 5 可以看出微带片焊接的焊锡厚度在  $\pm 0.1$  mm 时，即微带片焊料厚度误差较大的情况下，也能保证波导探针电路的  $S_{11}$  在  $-20$  dB 以下，有效降低了波导微带探针电路对垂直方向的安装误差的要求，降低了微带片在基片焊接工序的操作难度。通过上述手段，最终实现了 75 套毫米波接收前端全部一次组装合格，接收前端的射频输入驻波系数全部优于 1.6 dB。

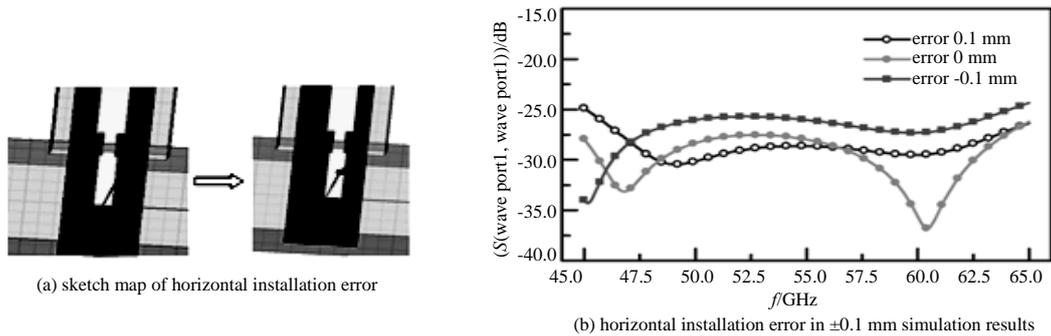


Fig.4 Simulation of horizontal installation tolerance of the transition circuit waveguide to microstrip  
图 4 波导微带过渡电路水平安装容差仿真设计

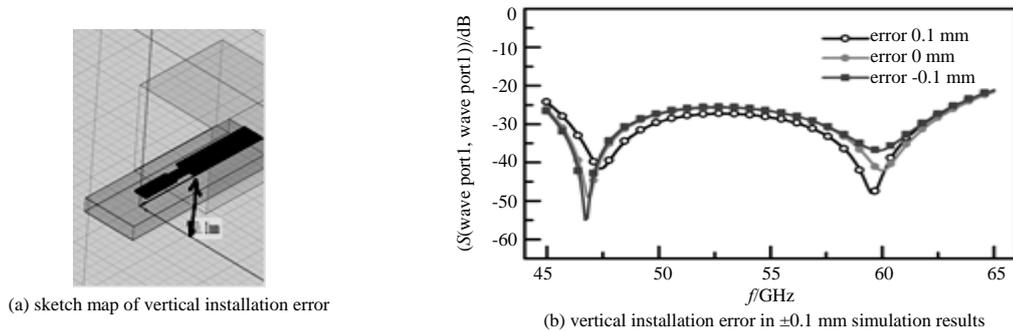


Fig.5 Simulation of vertical installation tolerance of the transition circuit waveguide to microstrip  
图 5 波导微带过渡电路垂直安装容差仿真设计

## 2 测试数据

使用矢量网络分析仪分别对直通测试件和背靠背安装 2 个 3 dB 电桥的测试件进行测试。测试结果如图 6 所示，图 6(a)为直通件的测试结果，图 6(b)为背靠背安装 3 dB 电桥的测试结果。直通件带内传输损耗为 2.9~3.3 dB，背靠背带内传输损耗为 3.1~3.6 dB。测试结果表明，V 频段宽带 3 dB 电桥的传输损耗优于 0.3 dB，带内驻波系数优于 1.5。

通过上述设计，V 频段小型化集成接收前端最终实物如图 7 所示，其外形尺寸为 33.4 mm × 30 mm × 12 mm。接收前端主要测试结果如下：

- a) 工作频率：V 频段；
- b) 接收带宽： $\geq 6$  GHz；
- c) 接收噪声系数： $\leq 4.2$  dB；
- d) 射频输入驻波系数： $\leq 1.6$ ；
- e) 接收增益： $> 42$  dB；
- f) 套间增益一致性： $\leq 1$  dB。

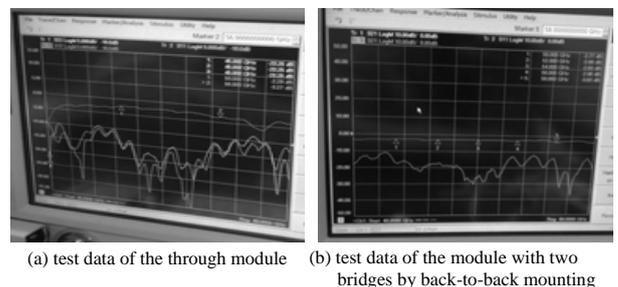


Fig.6 Test data of V-band broadband bridge  
图 6 V 频段宽带电桥的测试数据



Fig.7 Photo of V-band miniaturized integrated receiving front-end  
图 7 V 频段小型化集成接收前端实物图

### 3 结论

本文针对 V 频段毫米波接收前端低驻波、低噪声接收和小型化的研制需求,引入基于微带 3 dB 电桥的分布式平衡放大的设计方案,替换了传统的波导宽带隔离器,有效减小了毫米波接收前端的外形尺寸。设计了微带三臂 3 dB 电桥,提高了 3 dB 电桥的工作带宽。并根据实际生产需求,针对毫米波接收前端组装困难的问题,通过改进波导微带过渡电路的设计,提高了产品的一次组装合格率。最终实现了 V 频段小型化集成接收前端的低驻波、低噪声接收和产品小型化,为该频段毫米波电路的低驻波设计提供了一种全新的解决途径。

#### 参考文献:

- [1] 周秀骥. 大气微波辐射及遥感原理[M]. 北京:科学出版社, 1982. (ZHOU Xiuji. Atmospheric microwave radiation and the principle of remote sensing[M]. Beijing:Science Press, 1982.)
- [2] 李向芹,谢振超. 基于参数化控制的亚毫米波辐射计天线容差分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(4): 508-512. (LI Xiangqin,XIE Zhenchao. Tolerance analysis of sub-millimeter wave radiometer antenna based on parametric control method[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(4):508-512.)
- [3] FABIO B,ANTONELLA B,ALBERTO R,et al. Comparative analysis of recent satellite missions for multi-temporal SAR interferometry[C]// Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. Edinburgh,UK:[s.n.], 2016.
- [4] COOPER K B,MONJE R R,MILLAN L,et al. Atmospheric humidity sounding using differential absorption radar near 183 GHz[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018,15(2):1-15.
- [5] 宋方雷,甄卫民,於晓,等. TIEGCM 与 IRI 在中国垂测站的预测性能比较[J]. 电波科学学报, 2017,32(3):356-364. (SONG Fanglei,ZHEN Weimin,YU Xiao,et al. Prediction performance comparison between TIEGCM and IRI over China ionosonde stations[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2017,32(3):356-364.)
- [6] DEEB E J,MARSHALL H P,FORSTER R R,et al. Supporting NASA SnowEx remote sensing strategies and requirements for L-band interferometric snow depth and snow water equivalent estimation[C]// 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS). Fort Worth,TX,USA:IEEE, 2017:1395-1396.
- [7] COCCIA A,TRAMPUZ C,ORTOLANI M,et al. Deployment of the snowsar sensor in the snowex campaign by nasa and preliminary results[C]// International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Fort Worth,TX,USA:IEEE, 2017:1403-1405.
- [8] 江晓华. 世界气象卫星的发展与应用[J]. 科技导报, 2001,19(1):13-17. (JIANG Xiaohua. The development and application of the world meteorological satellite[J]. Science & Technology Review, 2001,19(1):13-17.)
- [9] 余晓川. 毫米波宽带角跟踪接收机研究与实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014. (YU Xiaochuan. Research and implementation of the broadband angle tracking receiver of millimeter wave band[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2014.)
- [10] WANG Chong,LI Zhiqun,LI Qin. 60 GHz broadband variable gain mixer using positive feedback in 65 nm CMOS[J]. Electronics Letters, 2015,51(19):1503-1505.
- [11] 张峻齐,王志刚. 60 GHz CMOS 片上巴伦及功率放大器设计[J]. 电子科学技术, 2017,4(2):6-10. (ZHANG Junqi,WANG Zhigang. Design of 60 GHz CMOS on-chip balun and power amplifier[J]. Electronic Science & Technology, 2017,4(2):6-10.)
- [12] CHI Taiyun,LI Sensen. A 60 GHz on chip linear radiator with single-element 27.9 dBm psat and 33.1 dBm peak EIRP using multifeed antenna for direct on antenna power combining[C]// 2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Shanghai,China:IEEE, 2017:1403-1405.
- [13] 洪伟. 毫米波与太赫兹技术[J]. 信息科学, 2016,46(8):1086-1107. (HONG Wei. Millimeter wave and terahertz technology[J]. Information Science, 2016,46(8):1086-1107.)
- [14] HSU Y C,HAROUN I,CHANG D C,et al. A low-cost small-size 60 GHz quadrature coupler for IPD-based SiP radio systems[C]// Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference. Sendai,Japan:IEEE, 2014:831-833.
- [15] 裴乃昌. W 频段机场异物探测雷达收发前端[J]. 电讯技术, 2013,53(10):1357-1361. (PEI Naichang. A W band T/R front end for airport foreign body detection radars[J]. Telecommunication Engineering, 2013,53(10):1357-1361.)

#### 作者简介:



裴乃昌(1979-),男,辽宁省法库县人,硕士,高级工程师,主要研究方向为回旋器件、大功率、太赫兹技术.email:peinch@163.com.