

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.10.020

W 频段机场异物探测雷达收发前端*

裴乃昌**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:主要介绍了一种用于机场异物探测雷达的 W 频段调频连续波(FMCW)收发前端的研究工作。基于波导 T 形接头的等效计算公式,对 W 频段波导合成电路进行了集中参数的电路建模,通过优化设计波导合成电路的参数,提高了波导合成电路的容差特性,解决了 W 频段波导功率合成电路加工精度要求高的问题,实现了 W 频段 4 路功率合成;采用低损耗的石英基材设计开发了微带薄膜滤波器技术,实现了 W 频段 FMCW 雷达接收前端的一体化集成设计;通过对低噪声放大器芯片键和金丝的匹配设计,实现了 W 频段收发前端的低噪声接收。最终实现的 W 频段 FMCW 收发前端的发射功率优于 360 mW,接收机噪声系数优于 5 dB。研制的收发前端为 W 频段 FMCW 雷达提供了一种有效的射频前端的解决方案。

关键词:机场异物探测雷达;W 频段;调频连续波;收发前端;功率合成;石英薄膜滤波器

中图分类号:TN80 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)10-1357-05

A W-band T/R Front-end for Airport Foreign Body Detection Radars

PEI Nai-chang

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

Abstract: The research work on a W-band frequency modulation continuous wave(FMCW) transceiver front-end for airport foreign body detection radars is introduced. By modeling the lumped-parameter equivalent circuit model of waveguide power combining circuit, the strict demand of machining accuracy of W-band waveguide circuits is satisfied and 4-channel power combination in W-band is achieved. Through the use of quartz thin-film filter technology, the integration of W-band receiver front-end FMCW radar is realized. By matching design of low noise amplifier chip bonding and wire, the low noise receiving of W-band transceiver front-end is realized. Finally the transmitting power of W-band FMCW transceiver front-end is better than 360 mW, and receiver noise coefficient is better than 5 dB. The designed transceiver provides an effective solution to RF front-end for W-band FMCW radars.

Key words: airport foreign body detection radar; W-band; FMCW; T/R module; power combining; quartz thin-film filter

1 引言

W 频段 FMCW 雷达由于其波束窄、分辨率高的优点,非常适合近距离对微小目标的探测。W 频段 FMCW 收发前端是 W 频段异物探测雷达的关键部件之一。受国内基础器件发展缓慢的影响,国内外在 W 频段收发前端的研究差距较为明显。国外在

20 世纪 90 年代初就开展了 W 频段毫米波收发前端的研究工作^[1],目前国外基于 CMOS 工艺进行了低成本的 W 频段收发组件的研究工作^[2],并基于 W 频段 FMCW 收发前端开展了直升机防撞 FMCW 雷达、成像雷达等研究工作^[3-4]。国内在 W 频段的毫米波组件研究较少,大部分研究多是基于混频器、倍

* 收稿日期:2013-07-01;修回日期:2013-09-03 Received date:2013-07-01;Revised date:2013-09-03

** 通讯作者:peinch@163.com Corresponding author:peinch@163.com

频器等器件^[5-7]。

W 频段毫米波信号频率高,波长短,对电路加工、结构加工、组装工艺等多方面提出了苛刻的要求。W 频段 FMCW 收发组件需要解决以下几个问题:

第一,由于功率放大器单片输出功率低,约为 100 mW,需要采用功率合成技术实现大功率发射。而采用 Ka 频段功率合成器扩频至 W 频段,功率合成器对结构加工精度要求提高,导致电路结构加工无法实现。本文采用 T 形接头的理论计算公式,对波导合成器进行了电路建模,采用电路分析的方法重新计算波导合成器的电路参数,降低了对结构加工精度的要求;

第二,为了提高收发组件的集成度,不能采用波导滤波器体。软基片电路加工精度低,无法满足微带滤波器的加工要求。本文采用石英薄膜电路加工工艺,实现了微带带通滤波器设计;

第三,由于芯片组装工艺引入的键和金丝在 W 频段的影响不能忽略,本文采用一种金丝匹配电路设计,实现了接收信道的低噪声放大。

2 W 频段 FMCW 收发前端设计方案

W 频段 FMCW 收发前端工作原理如图 1 所示。收发前端包括一路激励发射、一路校准发射和两路接收通道。激励发射支路实现对输入激励信号的 6 次倍频、放大、滤波和功率放大,同时激励发射支路具备自检功能和功率控制功能。由于目前现有器件输出功率水平不能满足项目需求,需要采用功率合成技术提高模块的输出功率。校准支路实现对校准信号的 6 次倍频滤波。两路接收通道实现对毫米信号的低噪声放大、I/Q 混频,接收支路具备幅度检测功能,并根据正常工作状态和校准需要,可关断幅度检测功能。

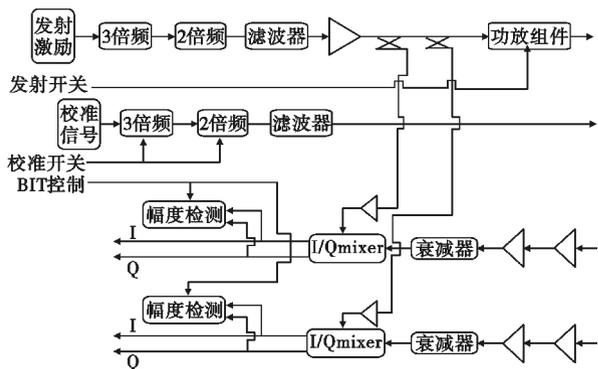


图 1 W 频段 FMCW 收发前端工作原理框图
Fig. 1 The principle block diagram of W-band FMCW transceiver front-end

3 关键电路设计

3.1 功率合成电路设计

采用波导正交耦合电路与波导双探针电路实现 4 路功率合成是非常普遍的做法,尤其在 Ka 频段已经非常成熟。采用 Ka 频段毫米波波导正交耦合器模型扩频到 W 频段,在初样设计中发现波导耦合电路的加工精度很高,加工精度要求 ± 0.015 mm,现有加工精度 ± 0.02 mm,无法满足加工要求。通常采用的电磁场仿真工具仿真计算非常缓慢,且不易求解模型的最优解。若能够实现波导正交耦合器的集中参数电路建模,则可以大大提高电路的仿真计算的速度,更易求解。通过查阅文献,波导 T 形接头可采用等效电路进行建模,如图 2(a) 所示。1 端口为输入端,2 端口为直通端,3 端口为耦合端。

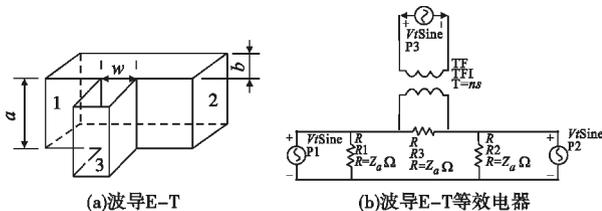


图 2 波导 T 形接头三维结构及其等效电路模型
Fig. 2 The three-dimensional structure and equivalent circuit of waveguide T junction

设直通波导长宽为 $a \times b$, 耦合波导耦合缝宽 w , 则 T 形接头可用如公式(1)表示^[8]:

$$\begin{cases} Z_a = \frac{z_0 \lambda_g 16b}{\pi^2 w^2 J_0^2(\pi w / \lambda_g)} \\ Z_1 = \frac{z_0 b \lambda_g 16b}{c - z_0 / 2z_1} \\ C = \frac{2b(\ln(\frac{b}{w}) + 2(\frac{b}{\lambda_g})^2)}{\lambda_g (\frac{\sin(\pi w / \lambda_g)}{\pi w / \lambda_g})} \\ ns = \sqrt{W/b} \frac{\sin(\pi w / \lambda_g)}{\pi w / \lambda_g} \end{cases} \quad (1)$$

其中, Z_0 为波导阻抗, λ_g 为波导波长。

波导正交耦合器是多个 T 形接头连接,波导正交耦合器等效电路可建模如图 3 所示。再将两个正交耦合器背靠背仿真,计算合成网络的传输损耗。图 4 和图 5 中给出了两组仿真数据。在不计算加工公差的情况下,两种合成电路的传输损耗都小于 0.6 dB(背靠背仿真)。但是在加工公差为 ± 0.03 mm 的情况下,合成电路的传输损耗变化很明

显,图 4 的数据明显不可用,图 5 数据具有良好的容差特性。通过合理选择耦合缝隙宽度并优化设计,最终实现 W 频段波导合成电路实测结果,带内插入损耗不大于 0.6 dB。

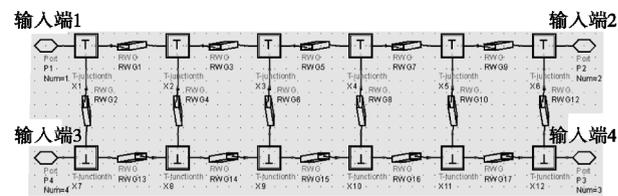


图 3 波导正交耦合器电路模型

Fig. 3 Circuit model of orthogonal coupler waveguide

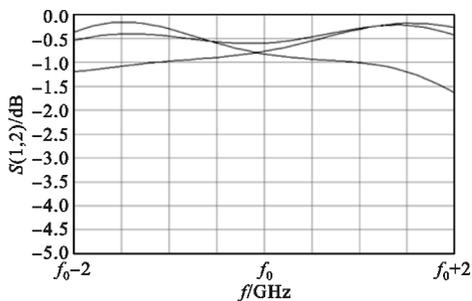


图 4 窄耦合缝隙±0.03 mm 公差仿真数据

Fig. 4 The simulation data of narrow coupling gap width with ±0.03 mm tolerance

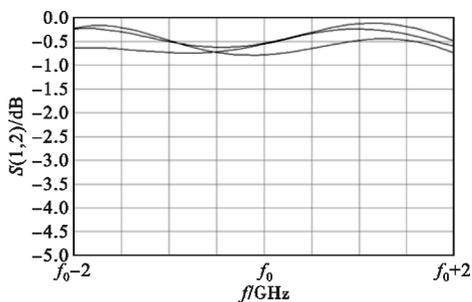


图 5 宽耦合缝隙±0.03 mm 公差仿真数据

Fig. 5 The simulation data of wide coupling gap width with ±0.03 mm tolerance

3.2 微带滤波器电路设计

发射信号经过 6 次倍频后发射,倍频过程中产生的 n 次谐波,尤其是 5 次和 7 次,发射功率比较大,必须采用滤波器进行滤波处理。在 W 频段常常采用波导滤波器^[9]和微带滤波器进行抑制。波导滤波器具有 Q 值高、传输损耗小的优点,但是其电路形式为波导,无法实现平面的集成设计。采用软基片设计的微带滤波器则存在介质损耗高缺点,软基片 Duriod5880 的介质损耗角 0.6‰,同时软基片加工精度±0.025 mm,也无法满足设计加工精度的

需要。

石英薄膜材料具有低的介质损耗角 0.015‰,比常用的软基片材料低了一个量级。同时石英薄膜电路的加工精度非常高±0.0025 mm,比软基片的加工工艺高一个量级。采用石英材料设计的微带滤波器具有传输损耗低、加工精度高的优点,采用石英电路设计的微带滤波器电路如图 6 所示。采用安立的矢量网络分析仪对石英薄膜滤波器进行测试,测试结果如图 7 所示。扣除波导微带探针和微带传输线的传输损耗,则石英薄膜微带滤波器的带内传输损耗优于 1 dB。

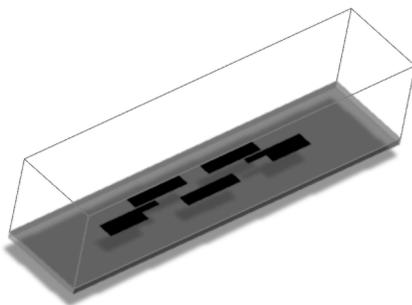


图 6 石英薄膜滤波器模型

Fig. 6 The quartz thin-film filter model

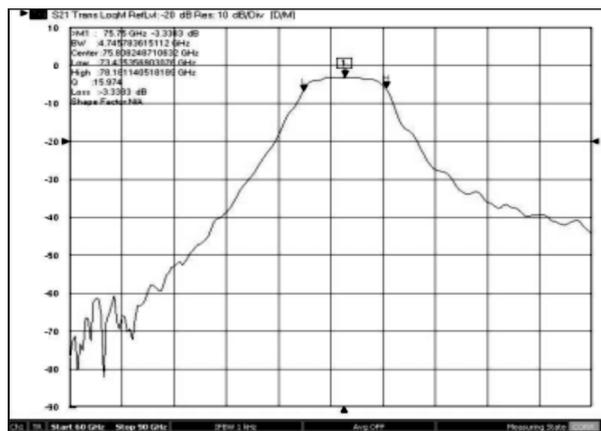


图 7 石英薄膜滤波器测试结果

Fig. 7 The test result of quartz thin film filter

3.3 低噪声放大电路设计

低噪声放大器位于接收机的前级,其噪声系数直接决定了接收通道的噪声系数。低噪声放大器芯片键合金丝引入的电感量约为 70 fH/0.1 mm。假设芯片键合金丝数量为两根,长度为 0.15 mm,采用 ADS 建模仿真可得在 Ka 频段其引入的插入损耗约小于 0.1 dB,而在 W 频段键合金丝的影响已经不可忽略,如图 8 所示。采用金丝匹配电路,由于键合金丝引入的为电感量,采用容性匹配电路,通过 LC 谐

振降低引线电感带来的影响。容性匹配电路可采用枝节线和高低阻抗线来实现,金丝匹配电路匹配后仿真结果如图 9 所示。

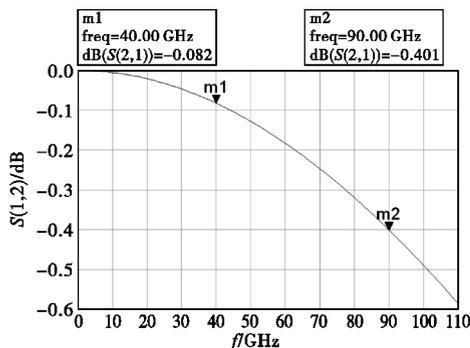


图 8 键和金丝传输损耗仿真结果

Fig. 8 The bonding wire transmission loss simulation result

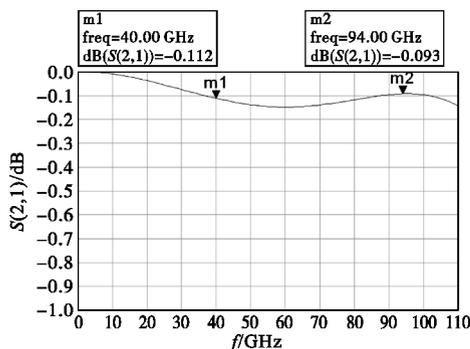


图 9 金丝匹配后仿真数据

Fig. 9 The matched bonding wire transmission loss simulation result

4 测试结果

W 频段 FMCW 收发组件最终实物图如图 10 所示,其外形尺寸为 100 mm×80 mm×25 mm。采用功率计、噪声系数分析仪、频谱分析仪及其扩频设备对收发前端的主要技术指标进行了测试,其主要测试结果为:工作频率为 W 频段;发射功率大于 360 mW;发射带宽大于 1 GHz;接收噪声系数小于 5 dB;接收增益大于 14 dB;接收带宽大于 1 GHz;发射杂散抑制大于 60 dBc。

功率合成电路无源测试时其合成效率为 87%,发射支路采用 4 个功率放大器单片合成输出,功率放大器单片输出功率约为 110 mW,计算功率合成效率约为 82%。合成效率降低的原因是 4 个功率放大器生产批次不一致,其中一只功率放大器漏极电流偏大,导致 4 路相位不一致,降低了合成效率。低噪声放大器噪声系数典型值 4.5 dB,考虑波导探

测针电路等其他的传输损耗,收发前端的噪声系数的理论值与测试结果比较吻合。W 频段收发前端已经交付用户使用,并完成了机场异物探测雷达的地面演示验证试验。

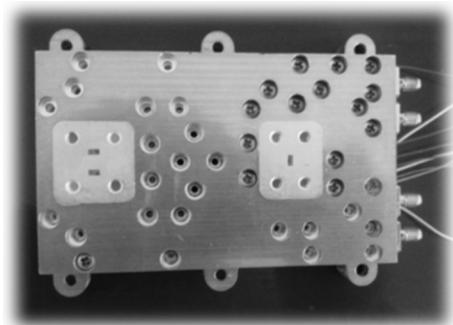


图 10 W 频段 FMCW 收发前端实物图

Fig. 10 The physical picture of W-band FMCW transceiver front-end

5 结论

本文提出了波导合成器的集中参数电路建模方式,极大增加了波导合成器仿真优化的灵活性。通过仿真优化设计,实现了 W 频段波导功率合成电路的高容差设计与开发。改进了 W 频段微带带通滤波器的电路设计加工手段,提高了 W 频段收发组件集成度。针对高频段芯片组装工艺的影响,优化设计了金丝匹配电路,最终实现了收发组件的低噪声接收。W 频段功率合成电路的传输损耗为 0.6 dB,导致其损耗偏大的原因是微带线的传输损耗较大,并且软基片的电路加工工艺公差较大。可采用石英基材替换软基片,以提高电路的加工精度,降低微带线的传输损耗。

参考文献:

- [1] Lo D C W, Chang K W, Lin R, et al. A single-chip W-band transceiver with front-end switching receiver for FMCW radar applications [C]//Proceedings of 1995 IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium. Orlando:IEEE, 1995:225-228.
- [2] Goshi D S, Liu Y, Mai K, et al. W-Band BPSK and QPSK Transceivers With Costas-Loop Carrier Recovery in 65-nm CMOS Technology [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2011, 46(12):3033-3046.
- [3] Sarabandi K, Lee J, Rangwala M. Design of FMCW millimeter-wave radar for helicopter assisted landing [C]//Proceedings of 2007 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona:IEEE, 2007:4183-4186.

- [4] Goshi D S, Liu Y, Mai K, et al. A W-band Interferometric Real-beam Scanning FMCW imaging radar [C] // Proceedings of 2011 IEEE MTT-S International Symposium. Torrance: IEEE, 2011: 1-4.
- [5] 史源, 陈春红, 邓小东, 等. W 频段单刀双掷开关的设计与仿真[J]. 微波学报, 2012(S1): 187-195.
SHI Yuan, CHEN Chun-hong, DENG Xiao-dong, et al. The design and simulation of W-band SPDT[J]. Journal of Microwaves, 2012(S1): 187-195. (in Chinese)
- [6] 赵伟. W 频段单平衡混频器的设计[J]. 微波学报, 2010(S1): 329-332.
ZHAO Wei. The design of W-band single balanced mixer [J]. Journal of Microwaves, 2010(S1): 329-332. (in Chinese)
- [7] 晏志祥. W 频段高效率二倍频器研究[J]. 微波学报, 2010(S1): 321-324.
YAN Zhi-xiang. The research of W-band efficient multiplier[J]. Journal of Microwaves, 2010(S1): 321-324. (in Chinese)
- [8] Sharp E D. An Exact calculation for a T-Junction of Rectangular Waveguides Having Arbitrary Cross Sections [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1967, 15(2): 112-116.
- [9] CHEN Zhen-hua, XU Jin-ping. W-band sharp-rejection bandpass filter with cavities[J]. Journal of Southeast University 2013, 29(1): 12-15.

作者简介:



裴乃昌(1979—), 男, 辽宁法库人, 2005 年于电子科技大学获硕士学位, 现为工程师, 主要从事毫米波电路设计与开发。

PEI Nai-chang was born in Faku, Liaoning Province, in 1979. He received the M. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2005. He is now an engineer.

His research concerns design and development of millimeter-wave circuits.

Email: peinch@163.com