

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.05.007

一种 Ka 频段单通道调制器的设计与实现

刘红杰, 窦 骄, 石 雷, 王雪宾

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘 要:随着航天事业的不断发展, 卫星平台及有效载荷的轻量化、小型化是未来航天系统的发展趋势。单通道单脉冲跟踪系统在航天器中有着广泛的应用, 而单通道调制器是单通道单脉冲跟踪系统的重要组成部分。为顺应星载自跟踪系统轻量化、小型化发展趋势, 根据工程化要求, 采用多芯片微组装技术, 通过合理的系统分析和仿真设计, 在厚度为 0.254 mm、相对介电常数为 2.2 的 ROGERS 5880 介质基板上设计实现了一种 Ka 频段单通道调制器。该调制器实现了小型化和集成化, 采用 BJ260 波导作为输入, 其和通道增益大于 30 dB, 噪声系数优于 2.5 dB, 载波抑制大于 50 dB, 调制抑制大于 30 dB, 经过地面各项试验及在轨飞行验证, 其各项指标满足要求。

关键词:微组装; Ka 频段; 单通道调制器; 小型化

中图分类号: V443; TN76

文献标志码: A

文章编号: 1674-7135(2022)05-0056-07

Design and implementation of a Ka band single channel modulator

LIU Hongjie, DOU Jiao, SHI Lei, WANG Xuebin

(DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: With the development of space industry, the lightweight and miniaturization of satellite platform and payload is the development trend of space system in the future. Single channel monopulse tracking system is widely used in spacecraft, and single channel modulator is an important part of single channel monopulse tracking system. In order to comply with the development trend of lightweight and miniaturization of spaceborne self-tracking system, according to the engineering requirements, a Ka band single channel modulator is designed and implemented on ROGERS 5880 dielectric substrate with thickness of 0.254 mm and relative dielectric constant of 2.2 through reasonable system analysis and simulation design based on multi-chip microassembly technology. The modulator realizes miniaturization and integration, BJ260 waveguide is used as the input, and its sum channel gain is greater than 30 dB, the noise coefficient is better than 2.5 dB, the carrier suppression is greater than 50 dB, the modulation suppression is greater than 30 dB. After various ground tests and in-orbit flight, it has been verified that its indicators meet the requirements.

Key words: microassembly; Ka band; single channel modulator; miniaturization

0 引言

单通道单脉冲跟踪系统具有系统复杂程度小, 通道占有少的优势, 现有星载天线跟踪系统多采用

单通道单脉冲跟踪体制^[1]。单通道调制器是单通道单脉冲跟踪系统的重要组成部分, 其主要功能是利用低频调制信号对多模馈源生成的差信号进行相位调制, 再与和信号进行合成, 从而形成包含天

收稿日期: 2022-03-10; 修回日期: 2022-05-05

基金项目: 军科院天基应急搜救设计项目 (编号: 2021KCYWXGK4046)

引用格式: 刘红杰, 窦骄, 石雷, 等. 一种 Ka 频段单通道调制器的设计与实现[J]. 空间电子技术, 2022, 19(5): 56-62. LIU H J, DOU J, SHI L, et al. Design and implementation of a Ka band single channel modulator[J]. Space Electronic Technology, 2022, 19(5): 56-62.

线指向误差信息的单通道调幅信号^[2]。

微组装技术是新一代电子组装技术,它使用高密度多层电路基板,采用微焊接、引线键合等工艺将多个半导体裸芯片装贴在电路基板上,实现物理和电气连接。微组装技术是实现电子设备小型化、高性能、高可靠性的关键技术之一,在军民领域均有广泛应用^[3-4]。

本文采用多芯片微组装技术设计实现了一种 Ka 频段单通道调制器,具有高集成度、小型化、噪声系数低、载波抑制好、调制抑制高等特点。

1 Ka 频段单通道调制器设计

1.1 设计指标

Ka 频段单通道调制器的设计指标如表 1 所列。

1.2 设计方案

Ka 频段单通道调制器应具有如下功能:

- 1) 对来自天线多模馈源的 Ka 频段和、差信号进行低噪声放大、滤波,以满足系统的 G/T 值要求;
- 2) 对差信号进行相位调制;
- 3) 对和、差信号进行合路下变频到 S 频段;
- 4) 对 X 频段本振信号以及 S 频段中频输出信

号进行滤波处理;

5) 对输入的 +5 V/-5 V 电源进行滤波、分压,以满足不同微波裸芯片的供电需求。

单通道调制器主要包括电源及开关驱动、射频电路和结构壳体三部分。射频电路分为和支路通道、差支路通道、和差支路合路下变频三部分。射频电路原理框图如图 1 所示。

表 1 Ka 频段单通道调制器设计指标要求
Tab. 1 Design requirement of Ka band single channel modulator

参数名称	指标要求
工作频率/GHz	23. XX $\pm$ 0.02
和通道增益/dB	≥ 30 dB
和、差通道增益差/dB	3 ± 1 dB
和通道噪声系数/dB	≤ 2.5 dB
差通道噪声系数/dB	≤ 7 dB
载波抑制	≥ 50 dB
调制抑制	≥ 30 dB
体积/mm ³	77 mm $\times$ 43 mm $\times$ 21 mm
重量/kg	≤ 0.2 kg

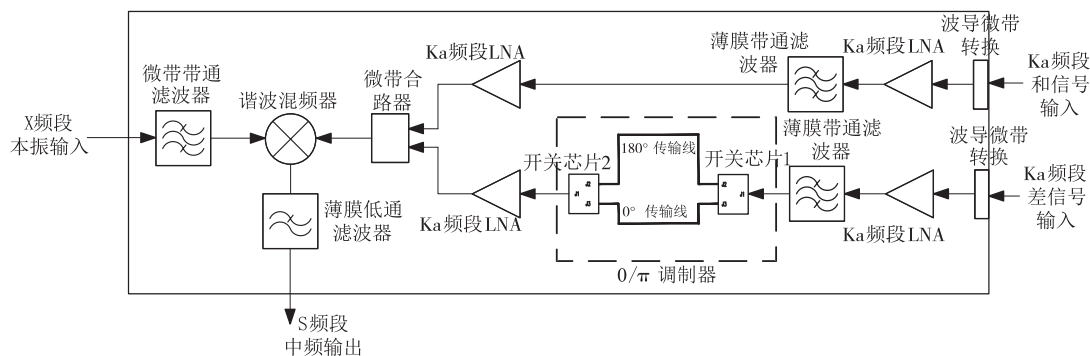


图 1 射频电路原理框图

Fig. 1 The schematic of RF circuit

对和通道的链路增益和噪声系数进行了预算,结果如表 2 所列,由计算结果可知和支路的增益为 31.8 dB,噪声系数为 1.93 dB。

Ka 频段和、差信号通过波导微带转换进入单通道调制器。对单通道调制器设计指标进行分析,并查阅大量现有的低噪声放大器裸芯片技术手册,和、差支路均采用两级低噪声放大器单片,可以满足增益、噪声系数等指标要求。所选低噪放芯片型号为 WFD190240-L16,其主要电性能指标如表 3 所列。和通道支路完成和路信号放大、滤波;差通道支路完成差路信号放大、滤波、0/π 调制;然后和、差两路信号合路后通过谐波混频器下变频到 S 频段。

电源及开关驱动部分将 +5 V/-5 V 直流输入电压经过分压、滤波处理后提供给通道内各有源芯片使用。开关驱动器将输入的低频调制信号转换为满足 0/π 调制器要求的驱动信号。

宇航用混合集成电路尤其是微波组件,主要采用金属管壳进行气密性封装,密封保护功能对于宇航用高可靠混合集成电路产品尤为重要,可保证产品在地面试验、发射、空间运行等各种复杂环境中免受外部腐蚀性气体的侵蚀,同时能够耐受冲击振动和空间辐照^[5-7]。结构设计采用铝镀金工艺,该工艺为成熟工艺,满足微组装粘接要求和有源芯片散热要求;密封采用激光封焊技术,封焊过程中在

壳体内部填充惰性气体氮气,封焊完成后氮气被封存在结构壳体内部,对微波裸芯片起到保护作用。

表 2 和通道链路计算

Tab.2 The link calculation of sum channel

序号	器件	Gain /dB	NF /dB	P_{1dB} /dBm	输入信号功率 -40 dBm 时链路增益 计算 (dBm)
1	波导微带转换	-0.3	0.3	/	-40.3
2	Ka 频率低噪放芯片	24	1.6	6 (输出)	-16.3
3	Ka 频段带通滤波器	-3.5	3.5	/	-19.8
4	Ka 频率低噪放芯片	24	1.6	6 (输出)	4.2
5	Ka 频率合路器	-3.5	3.5	/	0.7
6	谐波混频器芯片	-8	8	3 (输入)	-7.3
7	微带低通滤波器	-0.9	0.9	/	-8.2
$G_{\Sigma} = NF_{\Sigma} =$ 31.8 1.93					

表 3 Ka 频段低噪放芯片电特性参数

Tab.3 Ka band LNA chip electrical characteristic parameter

序号	参数名称	测试 条件	数值			单位
			最小值	典型值	最大值	
1	增益		23	24	/	dB
2	平坦度		/	± 0.5	± 0.75	dB
3	噪声系数		/	1.6	1.8	dB
4	输入驻波	$V_d = 4V$;	/	1.3	1.7	/
5	输出驻波	Freq: 19 ~ 24GHz	/	1.3	1.7	/
6	输出 1 dB 压缩点功率		0	3	/	dBm
7	工作电流		/	24	30	mA

2 功能电路仿真与设计

2.1 波导微带转换结构设计

Ka 频段和、差信号采用 BJ260 波导作为输入接口,为了实现波导到微带电路的转换,设计波导微带密封转换结构^[8-9],将天线传来的和、差信号由矩形波导的 TE_{10} 模转换为微带线的准 TEM 模。完成波导与微带电路间的转换至关重要,常见的波导-微带过渡技术主要有三种:脊波导形式过渡、探针形式过渡、以及对脊鳍线过渡^[10-12]。本文波导微带

转换结构采用微带平面与波导 E 面平行的设计方法^[13],微带与波导 E 面间采用同轴探针连接,同轴探针选用射频玻璃绝缘子,绝缘子一侧插入 BJ260 波导腔体宽边中心位置,实现波导与探针耦合,另一侧焊接在微带线上。其仿真模型和仿真结果见图 2、图 3 所示。

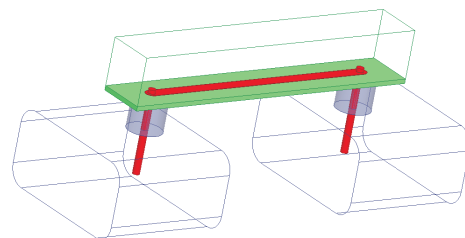


图 2 波导微带转换三维模型

Fig.2 The 3D model of waveguide microstrip conversion

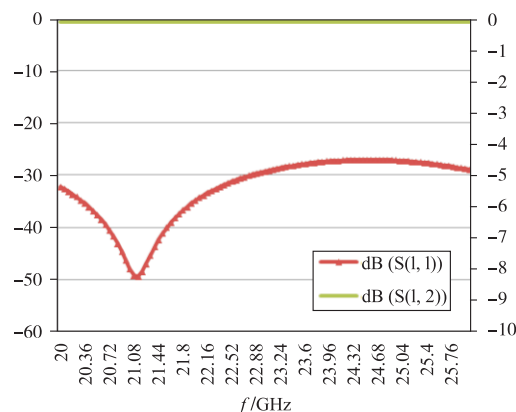


图 3 波导微带转换三维仿真结果

Fig.3 The 3D simulation results of waveguide microstrip conversion

2.2 薄膜滤波器设计与实现

微带滤波器是收发前端的重要部件,其作用是滤除镜像频率和信道中的各种谐波,其性能的优劣对前端影响很大。波导滤波器的优点是带内插损小、带外抑制度高、矩形系数好,其缺点是体积大,质量重,不能与微带电路进行集成。微带滤波器在 Ka 频段对加工精度要求高,而软基板加工工艺和线条精度很难满足实际要求,因此 Ka 频段微带滤波器实际测试结果很难达到仿真设计值,插入损耗、带内平坦度和带外抑制度等指标均难满足系统要求^[14-15]。为了解决微带滤波器电路加工精度问题,本文采用具有更高精度的薄膜工艺来研制微带滤波器。

如图 1 中单通道调制器需要两款薄膜滤波器,一款是 Ka 频段带通滤波器,用以滤除镜像频率和带外干扰;另一款是 S 频段低通滤波器,用以滤除下变频后的各种谐波,得到纯净的中频信号。系统通常对

毫米波前端体积和重量有较高的要求,为了实现薄膜滤波器的小型化^[16],采用了即烧三氧化铝基片,其介电常数为 9.7,较高的介电常数使得滤波器的尺寸更小。Ka 频段带通滤波器采用平行耦合式结构,其阶数为 5 阶;S 频段低通滤波器采用高低阻抗结构;为统一两款滤波器尺寸,节约制版费用,尺寸统一为 9.9 mm × 2.8 mm × 0.254 mm 两款滤波器的仿真模型和仿真结果分别如图 4 至图 7 所示。

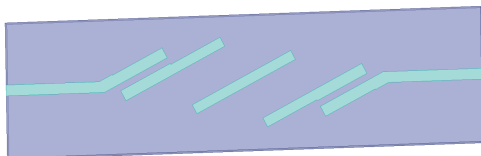


图 4 Ka 频段带通滤波器三维模型

Fig. 4 The 3D model of Ka band bandpass filter

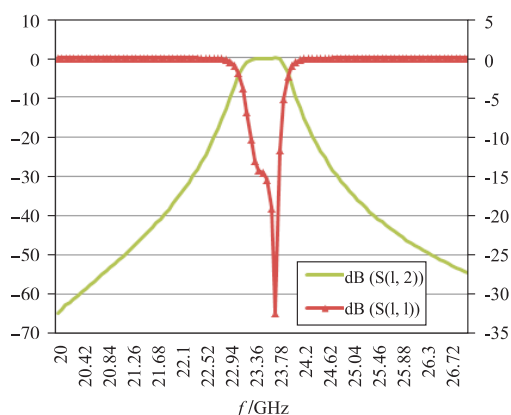


图 5 Ka 频段带通滤波器三维仿真结果

Fig. 5 The 3D simulation results of Ka band bandpass filter

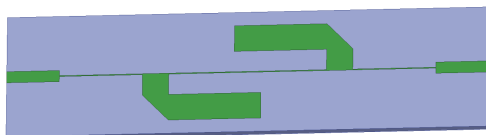


图 6 S 频段低通滤波器三维模型

Fig. 6 The 3D model of S band bandpass filter

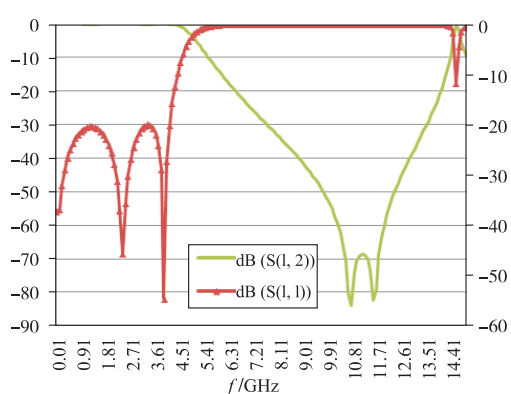


图 7 S 频段低通滤波器三维仿真结果

Fig. 7 The 3D simulation results of S band bandpass filter

依据仿真优化后的模型投产了滤波器样片,装配后进行实际测试,装配后实物图及实测结果如图 8 至图 11 所示。

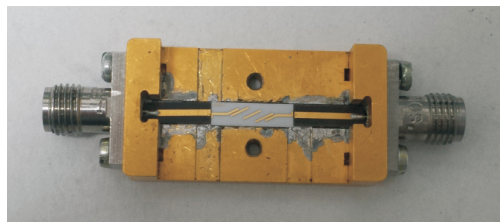


图 8 Ka 频段带通滤波器实物图

Fig. 8 The Ka band bandpass filter



图 9 Ka 频段带通滤波器实测值

Fig. 9 The measured value of Ka band bandpass filter

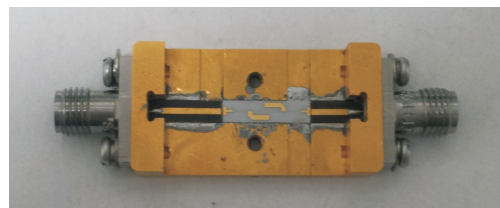


图 10 S 频段低通滤波器实物

Fig. 10 The S band lowpass filter



图 11 S 频段低通滤波器实测值

Fig. 11 The measured value of S band lowpass filter

实测结果表明:Ka 频段带通滤波器带内插损小于 3.5 dB,带内驻波优于 1.5,在 25. XX GHz ± 0.4 GHz 频段的抑制优于 47 dB,满足实际使用需求。S 频段低通

滤波器在 DC-2.42 GHz 内的插损小于 1 dB,驻波优于 1.1,对本振 10.XX GHz 的抑制优于 80 dB,满足实际使用需求。

2.3 $0/\pi$ 调制器设计

$0/\pi$ 调制器将 Ka 频段差信号在两段电长度相差 180° 的微带线上交替传输,实现差信号的相位调制。它由一对微波单刀双掷开关芯片、基准态微带传输线、移相态微带传输线以及开关芯片偏置电路组成,其电路原理图如图 12 所示。基准态微带传输线与移相态微带传输线相位差为 180° 。 V_{cc} 和 V_{ee} 为等幅反向的低频调制信号, S1 和 S2 切换频率由低频调制信号频率决定。 $0/\pi$ 调制器正常工作时, V_{cc} 为负, V_{ee} 为正时,开关 S1、S2 选通上支路,信号从 180° 微带传输线通过;反之, V_{cc} 为正, V_{ee} 为负时,开关 S1、S2 选通下支路,信号从 0° 微带传输线通过。两路信号产生调制相位差,达到 $0/\pi$ 二相调制。

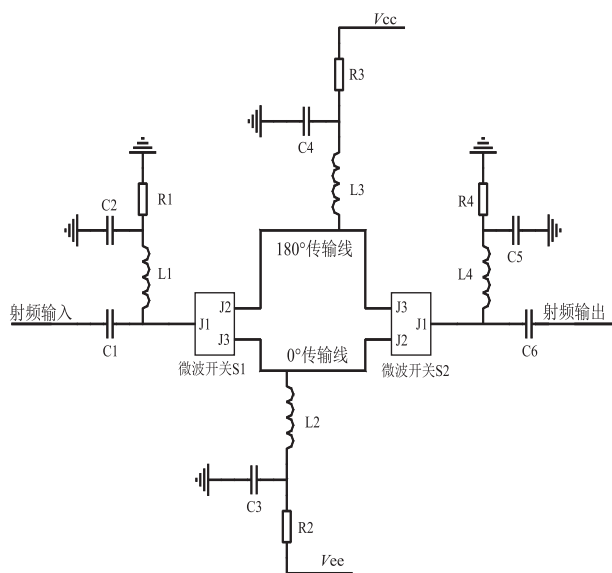


图 12 $0/\pi$ 调制器原理图

Fig. 12 The schematic diagram of $0/\pi$ modulator

2.4 Ka 频段合路器与本振滤波器设计

如图 1 所示,单通道调制器需要本振滤波器及 Ka 频段合路器。由于本振频率为 X 频段且为单频点工作,因而可以采用 ROGERS 5880 软基板制作,而不需要采用薄膜工艺。发卡型微波滤波器具有物理尺寸小、结构紧凑、更容易集成、性能优良等特点^[17-20],因而本振滤波器选择发卡型微带滤波器,其阶数为 3 阶,其仿真模型和仿真结果如图 13、图 14 所示。Ka 频段合路器采用经典的威尔金森合路器形式,其仿真模型和仿真结果如图 15、图 16 所示。

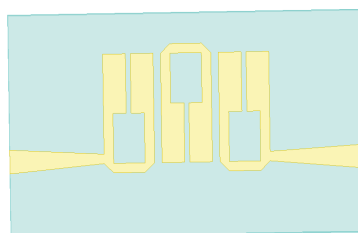


图 13 本振滤波器三维模型

Fig. 13 The 3D model of local oscillator filter

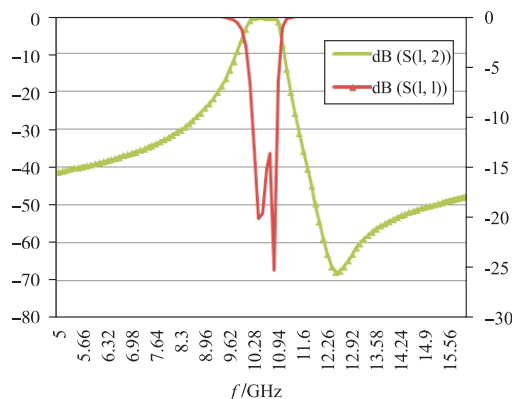


图 14 本振滤波器三维仿真结果

Fig. 14 The 3D simulation results of local oscillator filter

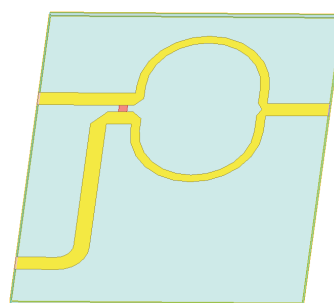


图 15 Ka 频段合路器三维模型

Fig. 15 The 3D model of Ka band combiner

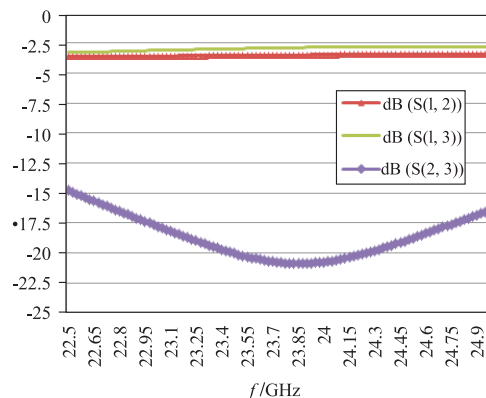


图 16 Ka 频段合路器三维仿真结果

Fig. 16 The 3D simulation results of Ka band combiner

2.5 有源芯片选型

根据表 1 技术指标要求,结合现有成熟货架产

品手册数据,经过几次指标迭代分析计算,最终选定有源芯片型号。谐波混频器芯片电特性参数如表 4 所列。

表 4 谐波混频器芯片电特性参数

Tab.4 Harmonic mixer chip electrical characteristic parameter

No.	Parameter	IF = 1 GHz LO = 0 dBm & Vdd = 4 V			Units
		Min.	Typ.	Max.	
1	Frequency Range. RF	24-32			GHz
2	Frequency Range. LO	12-16			GHz
3	Frequency Range. IF	DC-6			GHz
4	Conversion Loss	/	10	13	dB
5	Noise Figure(SSB)	/	10	13	dB
6	2LO to RF Isolation	29	35	/	dB
7	2LO to IF Isolation	32	40	/	dB
8	IP3 (Input)	5	13	/	dBm
9	1dB Gain Compression	3	6	/	dBm
10	Supply Current(Idd)	/	28	50	mA

3 单通道调制器测试

为了实现单通道调制器的集成化和小型化,采用了正、反两面布局的方式进行设计。将射频电路布置在结构件的正面,将电源及调制电路布置在结构件的背面。整个单通道调制器的尺寸为 77 mm × 43 mm × 20.2 mm,如图 17 所示,重量仅为 160 g。

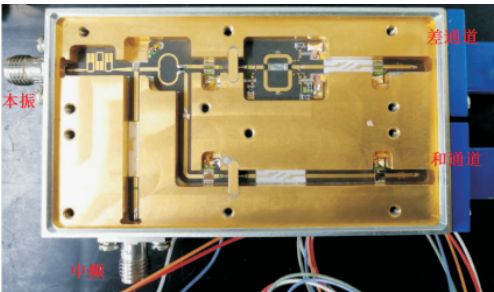


图 17 单通道调制器实物图

Fig.17 The single channel modulator

测试表明(图 18 - 图 21),单通道调制器在要求的工作频率范围内和通道增益为 30.97 dB,噪声系数为 1.94 dB,实测结果与链路计算结果吻合;差通道增益为 27.45 dB,差通道的噪声系数为 6.57 dB;和差通道增益差为 3.52 dB;载波抑制为 52.7 dB,调制抑制为 37.6 dB;各项指标满足设计要求。

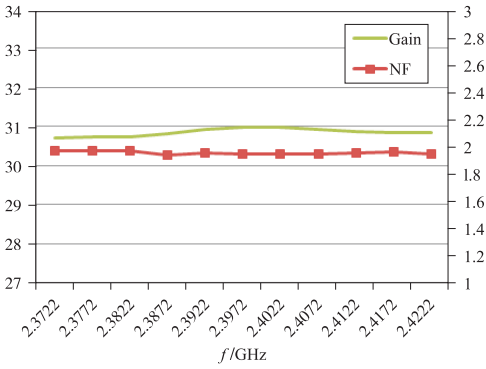


图 18 和通道增益及噪声系数测试值

Fig.18 The measured value of sum channel gain and noise figure

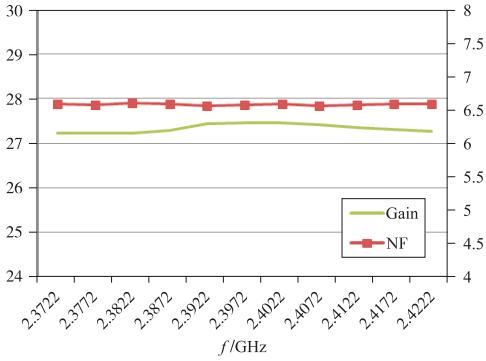


图 19 差通道增益及噪声系数测试值

Fig.19 The measured value of difference channel gain and noise figure

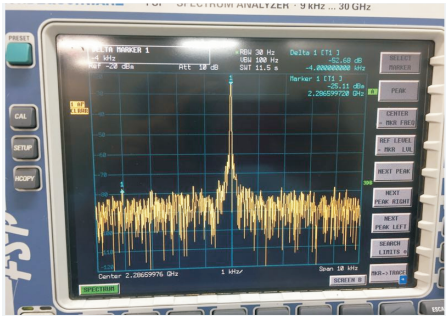


图 20 载波抑制测试值

Fig.20 The measured value of carrier suppression

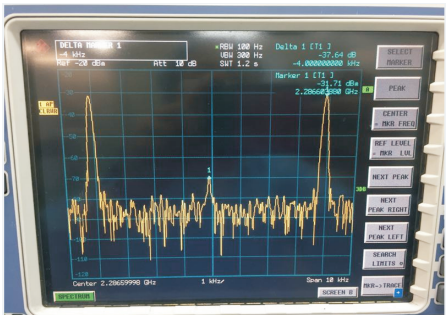


图 21 调制抑制测试值

Fig.21 The measured value of modulation suppression

4 结论

卫星平台及有效载荷的轻量化、小型化、集成化是未来航天系统的发展趋势。为顺应星载自跟踪系统轻量化、小型化发展趋势,本文采用多芯片微组装技术,通过合理的系统分析和仿真设计,在厚度为 0.254 mm、相对介电常数为 2.2 的 ROGERS 5880 介质基板以及相对介电常数为 9.7 的 Al_2O_3 介质基板上设计实现了一种 Ka 频段单通道调制器。该调制器实现了小型化和集成化,采用 BJ260 波导作为输入,其和通道增益为 31 dB,噪声系数为 1.94 dB,和、差通道增益差满足 3 ± 1 dB,载波抑制为 52.7 dB,调制抑制为 37.6 dB,经过地面各项试验及在轨飞行验证其各项指标满足要求,适应工程化应用。

参考文献:

- [1] 郭高龙. 一种小型化 Ka 频段跟踪接收机的研究[D]. 成都:电子科技大学,2019.
- [2] 高玉龙,陈明章. 单通道调制器噪声特性分析[J]. 空间电子技术,2012,9(3):52-54.
- [3] 侯相召. 微组装工艺研究[D]. 南京:东南大学,2019.
- [4] 梁佩,魏斌,黄益军. GaAs 功率芯片微组装关键技术研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2021,39(2):68-71.
- [5] 孙鹏,张婷,张亚楠. 高硅铝合金激光封焊与焊接接头的工艺研究[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(S1):44-49.
- [6] 熊安平. 激光封焊弹载高密度 T/R 组件的工艺参数与优化[J]. 应用激光,2021,41(2):344-349.
- [7] 陈治宇,陈香锦,杨晨,等. 铝合金激光封焊缺陷的分析[J]. 焊接技术,2021,50(4):74-76+106.
- [8] 宋志东,张国强,崔敏. 一种 Ka 波段宽带波导-微带转换器的研制[J]. 火控雷达技术,2014,43(4):74-77.
- [9] 邓向科,张文政,李正纲. 一种星载 V 频段接收机的设计[J]. 空间电子技术,2021,18(5):113-118.
- [10] 王梓睿. 微波波导-微带转换与滤波天线的设计[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
- [11] 单伟,包超,高志宇,等. W 波段波导-微带对脊鳍线过渡结构设计[J]. 科技视界,2021(12):137-138.
- [12] 任宇辉,王夫蔚,李珂,等. 一种 X 波段磁场耦合式波导-微带转换结构[J]. 微波学报,2019,35(2):64-68.
- [13] XU Z B, XU J, CUI Y J, et al. E-plane probe microstrip to waveguide transition with fin-line back-short structure for millimetre-wave application[J]. Electronics Letters, 2017, 53(23):1532-1534.
- [14] 成彦. Ka 频段薄膜滤波器设计[J]. 电讯技术,2012,52(7):1164-1168.
- [15] 刘鑫尧. 空腔型薄膜体声波谐振器(FBAR)滤波器研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- [16] ABASI H, HAZERI A R. Compact microstrip dual-narrow-band bandpass filter with wider rejection band[J]. Electromagnetics, 2018, 38(6):390-401.
- [17] 杨光耀. 发卡型微带带通滤波器的设计及其小型化的研究[D]. 南京:南京邮电大学,2016.
- [18] 陈厚含. 高性能微带带通滤波器的研究与设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
- [19] 郑海宇,朱伟光,张志涛,等. 一种宽阻带微带发夹带通滤波器的设计[J]. 北京邮电大学学报,2021,44(1):92-96.
- [20] 陈雄,张鹏,王玲. 一种小型化双层拓扑的低通 LC 滤波器[J]. 空间电子技术,2021,18(4):68-72.

作者简介:刘红杰(1985—),河北邢台人,工程师,硕士研究生。主要研究方向为航天器测控技术及微波电路设计。

E-mail:dkliuhj_04@163.com