

## Ultra Wideband Cryogenic Receiver Down-Converter Moudule Design

LIN Lingling<sup>1,2\*</sup>, HE Chuan<sup>1,2</sup>, WANG Zili<sup>1,2</sup>, WANG Shengwang<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Guangchang<sup>1,2</sup>, LU Qinlong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Superconducting & Electronic Technologies, China Electronics Technology Group Corporation, Hefei Anhui 230043, China;  
2. The 16th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei Anhui 230043, China)

**Abstract:** Radio telescopes are the main equipment for astronomical observations, in which Cryogenic receiver of the receiving system determines the performance of the radio telescope. As the core module of the receiving system, it requires frequency conversion component with higher performance. A combined frequency conversion scheme is proposed to convert wideband signals to narrowband signals to meet the needs of the system to receive signals of different working bandwidths. This component takes 2 channels of 2 GHz ~ 14 GHz dual-polarized radio frequency signals, achieves frequency shift through combined frequency conversion and output intermediate frequency signals for subsequent data acquisition unit measurement. Each channel can take radio frequency with different bandwidth, which is independent. The frequency conversion channel adopts a dual-channel design. Each RF input signal is converted to an intermediate frequency signal with a switchable bandwidth, which is 70 MHz ~ 1 000 MHz or 500 MHz ~ 1 000 MHz. Through scheme selection, circuit optimization, and simulation calculation, the component is designed and its performance meets the claim.

**Key words:** radio telescope; updown converter; ultra wideband; image rejection

EEACC: 7210 doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2022.03.009

## 超宽带下变频组件设计

刘玲玲<sup>1,2\*</sup>, 何川<sup>1,2</sup>, 王自力<sup>1,2</sup>, 王生旺<sup>1,2</sup>, 张广场<sup>1,2</sup>, 陆勤龙<sup>1,2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司超导电子技术重点实验室, 安徽 合肥 230043;  
2. 中国电子科技集团第十六研究所, 安徽 合肥 230043)

**摘要:** 射电望远镜是天文观测的主要设备, 其中接收设备即低温接收机决定了天文观测系统性能。目前射电望远镜的宽带需求越来越高, 这对接收机变频性能的要求也越来越高。提出了一种组合变频方案, 实现宽带信号能够变频到窄带信号, 以满足系统接收不同工作带宽信号的需求。本组件将 2 路 2 GHz ~ 14 GHz 双极化射频信号经组合变频实现频率搬迁到中频, 供后续的数字终端处理, 并且每路都可以采用不同带宽的射频频率, 具有独立性。变频通道双通道输出频率可在 70 MHz ~ 1 000 MHz 或者 500 MHz ~ 1 000 MHz 之间切换。通过方案分析, 电路优化设计, 以及仿真计算实现了该组件, 且其性能指标与预期相符。

**关键词:** 射电望远镜; 上下变频; 超宽带; 镜频抑制

中图分类号: TN773

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2022)03-0557-05

随着我国天文观测在太阳物理学、脉冲星体等工程应用中的需求不断增加, 宽带低噪声接收系统<sup>[1-2]</sup>逐渐在应用中成为主流设备。超宽带接收机能够快速有效地识别射电源等目标发出的微弱信号。接收系统首先将主、副反射面汇聚来的探测器

或射电源信号进行极低噪声放大、滤波、变频以及增益控制等处理, 并通过变频通道把射频信号变为中频信号后送入数据终端, 做后续处理, 因此变频组件在整个接收系统中是核心模块。变频通道的工作频率覆盖几百 MHz 到 14 GHz, 工作带宽达到 GHz 量

级,同时具有高隔离度、高屏蔽性能。

常规的超宽带下变频组件<sup>[3-4]</sup>采用开关滤波器组,如图 1 所示。

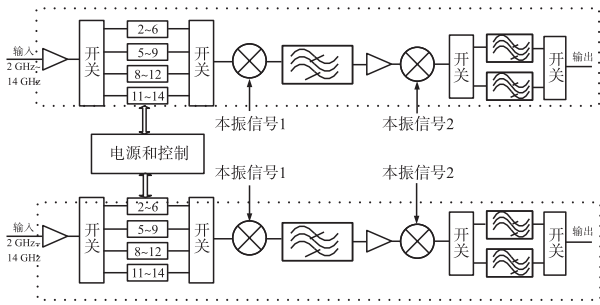


图 1 传统宽频下变频方案

传统宽带变频将射频通道划分成几段,在混频之前增加多组前置滤波器。这种方案体积占比高,控制电路复杂,对组件的电磁屏蔽和隔离度设计增加难度,从而给宽带超低噪声前端带来干扰。本项目研究了一种组合的变频方案<sup>[5]</sup>,避免了开关滤波器组设计的弊端,采用先上变频将宽带信号搬移到窄带 K 波段,再下变频到中频。从方案设计、电路设计和屏蔽设计等几个方面超宽带下变频组件的实现。

## 1 方案概述

根据射电望远镜系统应用要求,宽带变频组件采用直接变频方案,实现宽带信号的快速传输接收,控制和通信逻辑简单,满足观测快捷需求。为了实现宽带信号镜像抑制指标<sup>[6-7]</sup>,没有采用体积大、控制逻辑复杂的开关滤波器组,而是设计先将宽带信号上变频,将频率变到 K 波段,本振设置为 23 GHz~35 GHz,变频后输出频率为 20 GHz~21 GHz,再将 20 GHz~21 GHz 下变频到中频,工作原理<sup>[8-9]</sup>如图 2 所示。

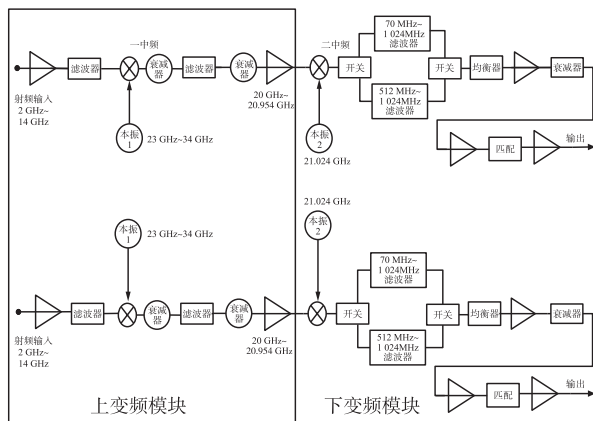


图 2 下变频工作原理

该变频组件主要包括微波变频通道、中频通道和电源单元。变频单元采用二次变频模式,变频后

通过滤波器抑制本振泄露信号及带外的交调分量。系统包括 2 通道,每个通道原理结构一样。本组件将输入信号进行两次变频,得到最终的中频信号输出。为降低系统噪声系数,提高其小信号检测能力(灵敏度指标),提高镜像抑制能力,在混频之前加一级带通滤波器。最后中频输出提供开关滤波器组工作方式,提供 2 种频带的选择。

### 1.1 变频组件主要技术指标

输入输出路数:2 路,增益:≥30 dB;带内增益波动:≤±2 dB;通道隔离度:≥60 dB;输出 1 dB 压缩点:≥15 dBm;镜频抑制:≥20 dB(70 MHz~1 000 MHz)/≥70 dB(500 MHz~1 000 MHz);噪声系数:≤6 dB。

### 1.2 主要技术指标分析

噪声系数和增益:系统的噪声温度主要取决于前端无源器件的插损和有源器件的噪声和增益,在整个系统链路中插损  $L$  的计算公式:

$$L(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_i}{P_o} \right) \quad (1)$$

增益表达式:

$$G_A = \frac{1}{L} = \frac{P_o}{P_i} \quad (2)$$

以上式中  $P_o$  为输出信号功率,  $P_i$  为输入信号功率。

由以上公式计算出无源器件的增益:

$$G_A = \frac{1}{10^{\frac{L(\text{dB})}{10}}} \quad (3)$$

级联系统的噪声系数表达式为:

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2}{G_{A1}} + \frac{NF_3}{G_{A1}G_{A2}} + \dots \quad (4)$$

总增益为各部分增益的叠加:

$$G(\text{dB}) = G_{A1} + G_{A2} + G_{A3} + \dots \quad (5)$$

根据图 2 方案,组件的噪声系数计算结果为:

$NF = 4.3 \text{ dB}$ , 增益  $G = 38 \text{ dB}$ , 满足设计要求。

镜频抑制:根据镜频、中频以及本振的关系<sup>[10-11]</sup>可知,2 GHz~14 GHz 的镜频信号,必然在带内,直接变频无法滤除。本方案的两次变频,每次变频的带宽输出为窄带,通过器件电路设计和镜频滤波器来实现镜频抑制。输入频率为宽带信号上变频将频率变到 Ka 波段,本振设置为 23 GHz~34 GHz,1 变频后输出频率为 20 GHz~21 GHz。再与 2 本振混频,变频至 70 MHz~1 000 MHz。第一次变频输入信号与镜频信号的关系见表 1。

可以看出离输入信号最近的镜像信号为 44 GHz,因此通过截止频率为 16 GHz 低通滤波器,在 44 GHz 抑制大于 40 dB,再加上放大器电路设计在高频的衰减特性,能够实现 70 dB 的镜频抑制指标。

表 1 镜频频率对应表

输入信号/GHz	本振信号/GHz	镜频信号/GHz
2	23	44
3	24	45
4	25	46
5	26	47
6	27	48
7	28	49
8	29	50
9	30	51
10	31	52
11	32	53
12	33	54
13	34	55
14	35	56

二次变频镜频频率最近带外 140 MHz 处,设计高 Q 值的腔体滤波器可以实现。滤波器仿真如图 3 所示。

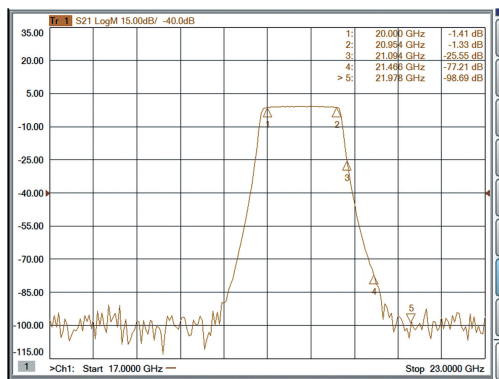


图 3 镜频抑制滤波器性能图

**隔离度:**组件两个通道同时工作,通道隔离度要求高,隔离度的实现主要考虑信号空间辐射和电源线传导等。针对空间辐射屏蔽,由于组件工作频率高达 35 GHz,波长短,信号屏蔽难,为此我们设计金属结构时,采用密封焊接,防止射频信号泄露。在电源设计上,外加电源首先经过高频扼流电感和大容量陶瓷电容滤波后,再进行二次稳压。稳压后再提供给各个单元电路使用。对有隔离要求的电路,其电源均严格独立分开,避免引入串扰。根据工程经验,这种设计隔离度可以做到 70 dB 以上。

1.3 宽带毫米波变频通道设计

组件工作频带宽,同时两次变频,功能复杂,为了实现增益指标,会采用多级电路级联实现,因此链路的增益波动设计<sup>[12-13]</sup>是本组件设计的难点。首先对毫米波变频通道宽带电路仿真,保证宽带信号能够传输良好并且线性度好。然后增加宽带信号增益均衡设计,补偿器件增益波动带来的影响。再次选择合适器件及电路,保证宽带信号变频在射频和中频响应平坦。最后是级联电路的匹配设计,减少

电路因驻波失配引起的增益波动。

电路利用单片、微带线、波导等多种形式混合集成的方式,组合采用金丝互联实现信号传输过渡。随着频率的升高,键合线对微波电路的影响越来越明显,有时成为主要因素。决定键合线微波特性的主要参数有键合线长度、幅度、间距和根数。本组件经过仿真设计,选择三根金丝实现宽带信号传输,微带线同时设计匹配。

根据图 4 金丝互联结构设计和仿真图 5 表明设计的电路 2 GHz~14 GHz 宽带信号具有很好的回波损耗,传输特性良好。这可以避免宽带信号传输过程中因金丝过渡产生的驻波失配,造成增益起伏恶化。

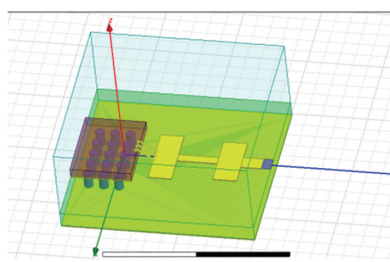


图 4 金丝键合传输电路结构

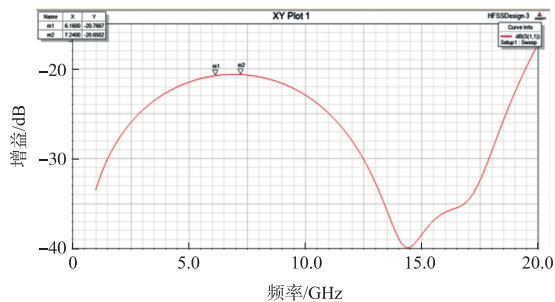


图 5 金丝键合传输电路仿真结果

如前所述,产品工作频率高,增益及隔离度指标要求较大,在盒体内部易形成信号串扰等,必须从结构上进行分腔屏蔽盒设计,下面具体介绍屏蔽盒的设计。

本产品采用微带电路的形式实现,微带电路是一半开放的传输线,电路能量将通过微带线向空中辐射,如果输出信号反馈到输入端,易形成信号串扰。屏蔽盒体的设计主要从避免其谐振频率落在带内和高增益处,对信号传输为截止模式。同时对敏感器件采取局部保护措施,如图 6 所示,通过添加屏蔽罩或屏蔽盒体对敏感器件进行二次信号保护,可以对信号辐射的路径进行隔断。

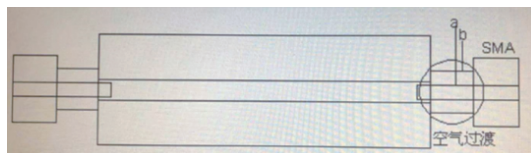


图 6 匹配过渡电路仿真模型

屏蔽盒的高度一般为第一层介质厚度 15~20 倍或以上,在屏蔽腔面积一定时,要提高屏蔽腔的最低谐振频率,需增加长宽比,避免正方形的腔体。根据组件的工作频率范围,采用介质板厚度为 0.254 mm 的 5880 板材,设计宽度 5 mm,高度 3 mm 的屏蔽盒内腔尺寸。

通道接口传输我们采用 3.5 连接器,金属导体直径为 0.3 mm,在高频频段连接器和微带过渡我们通阻抗计算公式(6),计算匹配一段空气腔体尺寸,ε,空气介电常数,b 为空气腔直径,a 为金属导体直径。结合三维计算软件,仿真腔体的谐振频率,优化空气腔尺寸。通过公式计算和仿真,腔体的谐振频率在 40 GHz 以上,满足我们使用要求。空气匹配的传输特性如图 7 所示,电路的回波损耗可达到-25 dB,信号传输特性较好。

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_\gamma}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (6)$$

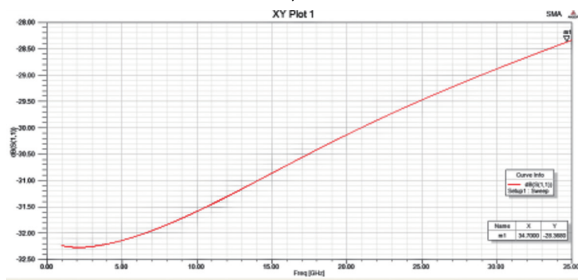


图 7 匹配过渡电路仿真结果

### 1.4 中频通道设计

中频通道设计主要考虑混频器产生的交调、本振泄露的抑制,同时要满足系统增益和输出 1 dB 压缩点技术指标。根据前面的原理,中频采用开关滤波器组-均衡-放大-衰减-放大的方案。由于两次变频本振频率距离中频输出较远,中频的滤波电路主要滤除低频电源干扰以及民用通信信号的抑制。设计采用 LC 带通滤波器实现。系统增益宽带平坦,我们增加数控衰减器来控制增益大小。在中频我们设计具有驻波好、体积小的 LC 集成化均衡器来补偿带内增益器起伏,均衡器原理如图 8 所示,该形式均衡量灵活可调,单级均衡量可达 1 dB~3 dB。

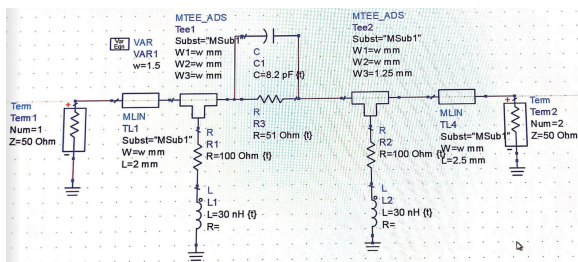


图 8 可调均衡器原理图

## 2 测试结果和分析

组件采用安捷伦噪声系数分析仪 N8975A 和噪声源 N4002A 测试下变频噪声系数。设置下变频模式,频率 2 GHz~14 GHz,可变本振,输出中频 500 MHz。通过改变输入本振频率,测试组件的噪声系数。如图 9 所示,组件的噪声系数最大为 4.9 dB。

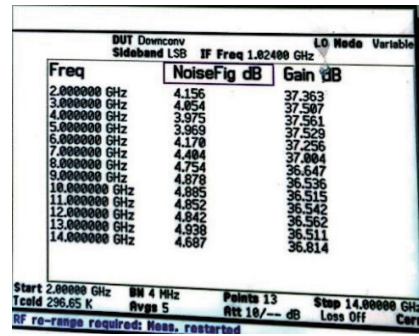


图 9 噪声系数测试结果

平坦度测试组件采用安捷伦标量网络分析仪 8757D。通过改变输入本振频率,测试组件的中频输出增益和平坦度。如图 10 所示,组件在 13 GHz~14 GHz 的输出平坦度在±0.95 dB。

从表 2 可以看出,组件的指标都优于设计指标,尤其是接收机系统的隔离度测试为 80 dB、平坦度±1.2 dB,使得组件的性能更加优越。

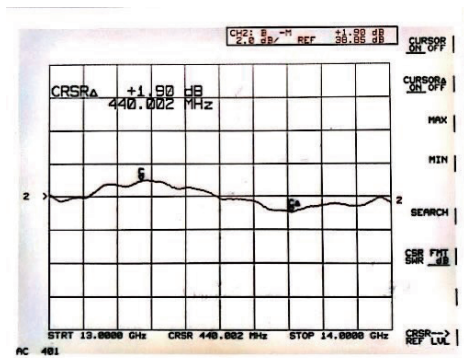


图 10 增益平坦度测试结果

表 2 组件测试数据

参数名称	测试结果
增益/dB	38
带内增益波动/dB	±1.2
通道隔离度/dB	80
输出 1 dB 压缩点/dBm	19
镜频抑制/dB	21/80
噪声系数/dB	4.9

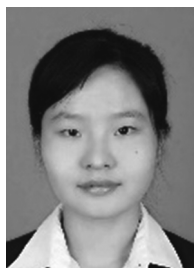
## 3 结论

本文讨论了一款宽频带下变频组件的研制过程,

采用一种组合变频方案,实现宽带信号直接变频的镜频抑制指标;采用金丝互联补偿、均衡以及级间匹配等高频段增益补偿技术,实现组件较好的带内平坦度。产品具有高隔离度,平坦度好的特点,满足射电接收机的使用要求,在天文观测,测控领域具有很大的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 李镇,杨燕,吴国中,等. 2 GHz~18 GHz 超宽带小型化下变频通道设计[J]. 微波学报,2020,36(4):78-81.
- [2] 桂盛,王勇. 一种小型化超宽带变频组件的设计与实现[J]. 舰船电子对抗,2020,43(2):116-120.
- [3] 刘博文,梁剑锋,崔平. 一种宽带 Ka 频段上变频模块的设计与实现[J]. 无线电工程,2019,49(1):72-75.
- [4] 陈国维. 超宽带上下变频组件的研制[D]. 成都:电子科技大学,2018.
- [5] 朱翰韬. 35 GHz 二次变频接收机前端研究与设计[D]. 成都:电子科技大学,2018.
- [6] 庞玉会. 一种 X 波段小型化上下变频组件的研制[J]. 现代电子技术,2012,35(23):101-104.
- [7] Chen A Y, Baeyens Y, Chen Y, et al. An 80 GHz High Gain Double-Balanced Active Up-Conversion Mixer Using 0.18  $\mu\text{m}$  SiGe BiCMOS Technology[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2011,21(6):326-328.
- [8] Seo J, Kim J, Sun H, et al. A Low-Power and High-Gain Mixer for UWB Systems[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2008,18(12):803-805.
- [9] 冯若晔,张广场. 某型射频接收机高增益下变频组件研制[J]. 低温与超导,2014,42(3):84-85.
- [10] Ludwig R, Bretchko P. 射频电路设计[M]. 王子宇,张肇仪,徐承和,等译. 北京:电子工业出版社,2010:31-33.
- [11] Pardo D, Grajal J, Pérez-Moreno C G, et al. An Assessment of Available Models for the Design of Schottky-Based Multipliers up to THz Frequencies[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology,2014,4(2):277-287.
- [12] Grajal J, Krozer V, González E, et al. Modeling and Design Aspects of Millimeter-Wave and Submillimeter-Wave Schottky Diode Varactor Frequency Multipliers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2000,48(4):700-711.
- [13] 鞠英,王正伟,陈熙,等. 一种基于 SiGe 工艺的多功能下变频芯片的设计与实现[J]. 微波学报,2017(2):59-63.



刘玲玲(1988—),女,中国电子科技集团第十六研究所工程师,硕士,研究领域为微波及低温电子技术应用,519499708@qq.com。