超导滤波器在射电天文 RFI 中的应用

王生旺[1,2+],王贤华[1,2],刘　洋[1,2],何　川[1,2],丁晓杰[1,2]

1.中国电子科技集团公司第十六研究所,合肥 230043;

2.中国电子科技集团公司超导电子技术重点实验室,合肥 230043

收稿日期:2018-08-28;接收日期:2018-12-29

【摘要】 针对射电天文测站急需解决通信频率对制冷接收机严重干扰的问题,本论文研制了一款 S 波段的高温超导滤波器,并将其应用在射电望远镜中,对通讯干扰频率的抑制作用进行了验证,表明在对原接收机性能指标不影响的情况下,对测站干扰点最强的 2.143 GHz 以下频段抑制度达到了 114 dB,取得了很好的应用效果.

关键词: 超导滤波器,射电天文,干扰

PACS: 7460,7490,0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.01.005

Application of Superconducting Filter in Radio Astronomy RFI

WANG Shengwang[1,2+], WANG Xianhua[1,2], LIU Yang[1,2], HE Chuan[1,2], DING Xiaojie[1,2]

1. *The16th Institute of CETC, Hefei* 230043, *China*;

2. *CETC Key laboratory of superconducting & electronictechnologies, Hefei* 230043, *China*

Received date: 2018-08-28; accepted date: 2018-12-29

【Abstract】 In order to solve the serious problem ofradio astronomy cryogenic receiverbeing interfered by communication frequencies, a type of S-Band superconducting filter is researched in this paper, and is applied to the radio telescope, and the effect of RFI is verified. It is indicated that rejectionhas achieved 114 dB at the frequencies below 2.143 GHz, meanwhile the cryogenic receiver performance has not deteriorated.

Keywords: superconducting filter, radio astronomy, RFI

PACS: 7460,7490,0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.01.005

† wsw1605@163.com

1 引　　言

射电天文学对射电望远镜的灵敏度提出了非常高的要求，一方面不断增大接收天线的口径，另一方面致力于降低接收机系统的噪声引入.射电天体辐射信号到达地球时已经非常微弱，在如图 1 所示的超外差电路形式中，要实现接收机系统的超低噪声温度，降低射频放大器的噪声是首要的.由于常温射频放大器自身电子运动产生的热噪声，其噪声指标难以满足极高灵敏度的应用场合.数据显示在 20 K（－253 ℃）环境温度下射频放大器的等效噪声温度只有常温的十分之一，通过制冷射频放大器的手段，可以极为有效地降低接收机引入的噪声.

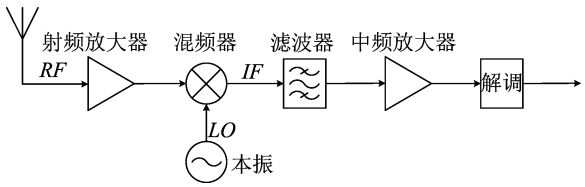

图 1　典型单变频超外差接收机框图

Fig.1　Blockdiagram of typical super heterodyne receiver

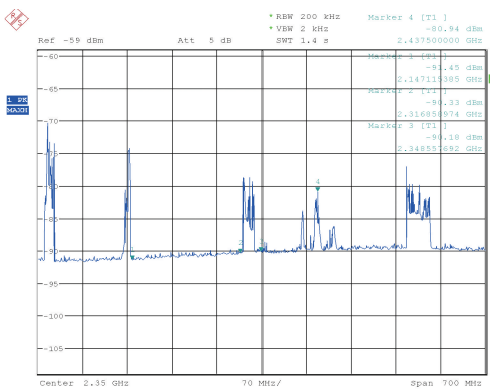

图 2　RF 放大器之前信号测试图

Fig.2　Measurement curve before RF amplifier

随着通信领域的高速发展，移动信号对测站射电望远镜 S 波段的干扰越来越严重，图 2 为射频放大器之前的信号频谱图，看出 2.018 GHz、2.143 GHz、2.330 GHz，2.437 GHz 和 2.595 GHz 五个频带出现了干扰，尤其是两个低端频带幅度明显；在试验中，我们在制冷接收机的中频信号输出口进行了测试，如图 3，看出接收机系统对 2.018 GHz 以下信号有着很好地抑制，但是对邻近 2.143 GHz 几乎没有抑制，随着天线方位和俯仰的变化发现会超出更多，最高超出通带信号 45 dB 以上，导致交调干扰、放大器饱和等问题的出现，已经严重影响到接收机的灵敏度要求和后级信号处理设备的工作，故急需找到一种工程的解决措施.

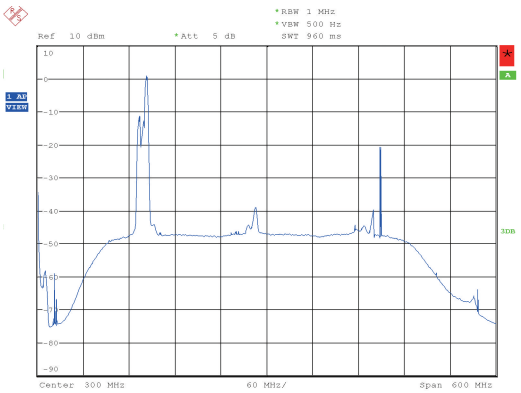

图 3　中频输出信号测试图

Fig.3　IF signal measurement curve

2 技术要求

测站使用的 S 波段制冷接收机，被冷部件如极化器、射频放大器和过渡波导等工作在 15 K 温度平台，超导滤波器工作的温度条件已经具备，而且经测量，杜瓦内部尺寸有一定的余量，故如图 4 所示，计划在极化网络之后左、右旋同时加装高温超导滤波器，并将安装冷板进行简单改造.

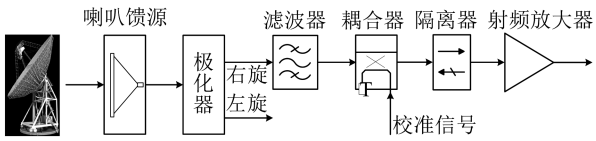

图 4　加入超导滤波器方案框图

Fig.4　The block diagram of involvingin HTS filter

按照测站对工作频段、2.143 GHz 处抑制度、保证设备正常工作的要求，分解提出超导滤波器的指标需求如下：

工作频率：2.18 GHz－2.42 GHz

阻带抑制：≥110 dB@2.143 GHz，≥100 dB@2.48 GHz

插入损耗：≤－0.15 dB

驻波比：≤1.3

工作温度：15 K 温区

3 超导滤波器研制

3.1 基片介电常数确定

高温超导薄膜滤波器基片的介质特性，尤其介电常数是决定电路特性阻抗和信号相速度的重要因素，本滤波器基于成熟的 YBCO 高温超导薄膜，选用氧化镁(MgO)基片作为电路衬底，15 K 温度时基片的介点常数值是准确设计滤波器的输入，故采用了如图 5 所示的环形谐振器测量方法，在环的两对称端通过小缝隙耦合到输入、输出微带线，从而构成串联谐振结构.用网络分析仪扫频测出其谐振特性，如谐振频率和品质因数，进而计算出基片的介电常数 εr 和损耗角正切 tan δ.

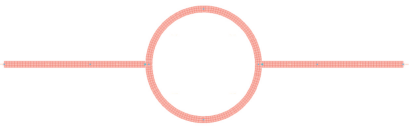

图 5 基片低温介电常数测量电路图

Fig.5 Low temperature dielectric constant measurement circuit

在实际试验中，将扫频测试的谐振曲线和 ADS 软件仿真曲线进行了拟合，可以快速准确地得出当前所用批次 MgO 基片在 15 K 时的介点常数为 9.667.

3.2 滤波器设计

依据指标需求，确定选用契比雪夫函数设计，在给定通带波纹和阻带特定频率上的衰减后，滤波器的阶数 n 由下面公式求出近似值：

$$a = 10\frac{L_{As}}{20} = 10\frac{115}{20} = 105.75$$

$$\varepsilon = \left(10\frac{L_{Ar}}{10} - 1\right)\frac{1}{2} = (100.01 - 1)\frac{1}{2} = 0.1526$$

$$\Omega_1 = \tan\theta_1 = \tan\frac{\pi\omega_1}{2\omega_0} = \tan\frac{2.17\pi}{2\times 2.3} = 11.2337$$

$$\Omega_a = \tan\frac{\pi f_a}{2f_0} = \tan\frac{2.143\pi}{2\times 2.3} = 9.29051$$

$$n \geqslant \frac{\ln\left(\frac{2a}{\varepsilon}\right)}{\cosh - 1\left(\frac{\Omega_1}{\Omega_a}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{2 * 105.75}{0.1526}\right)}{\cosh - 1\left(\frac{11.2337}{9.29051}\right)} = 23.96$$

考虑到计算的近似性，保证带外抑制指标有一定的冗余，实际取了 $n=27$，由此计算谐振器间的耦合系数、输入输出外部 Q 值，通过电磁仿真软件，建立在 MgO 基片上的滤波器模型和仿真曲线如图 6 和 7 所示.

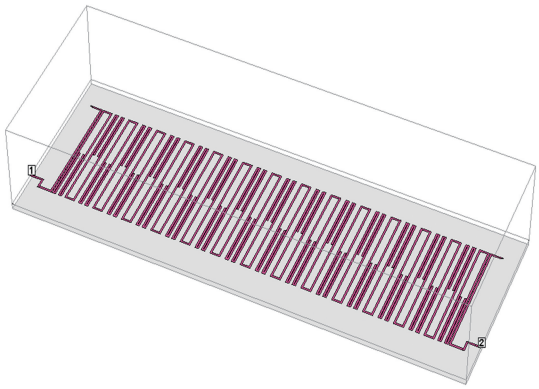

图 6 超导滤波器设计模型

Fig.6 The design model of HTS filter

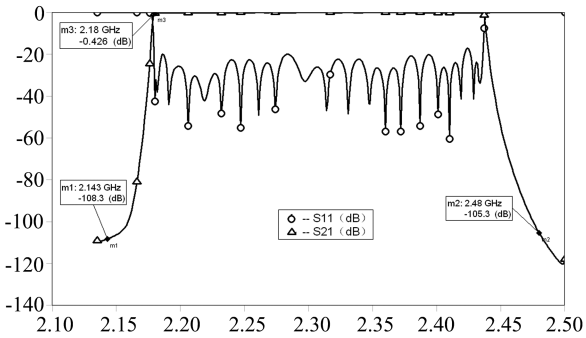

图 7 超导滤波器 S11 和 S21 仿真曲线

Fig.7 The filter simulation curves of S11 and S21

3.3 测试及应用

最终封装的超导滤波器如图 8 所示，SMA 接口，提供冷板安装孔位，在低温测试平台中对滤波器指标进行了测试，如图 9 所示在 2.143 GHz 处抑制度达到了 114 dB，满足实际使用的需要.

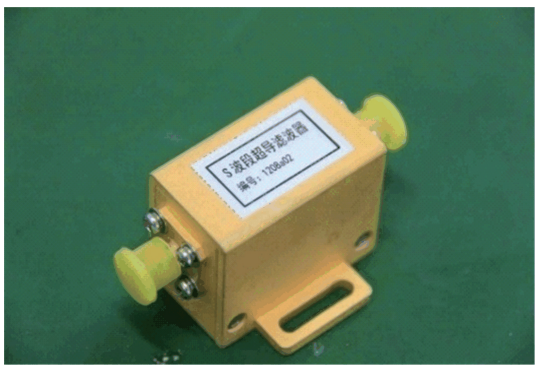

图 8 超导滤波器实物照片

Fig.8 Physical photo of HTS filter

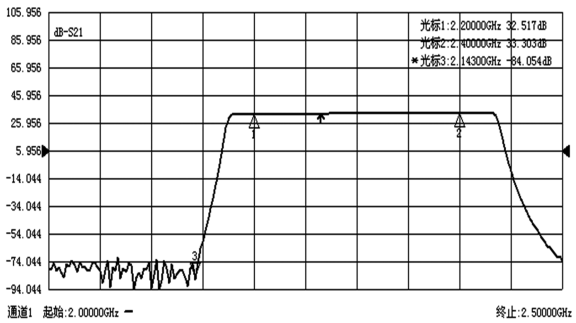

图 9　超导滤波器测试曲线

Fig.9　HTS filter test curve

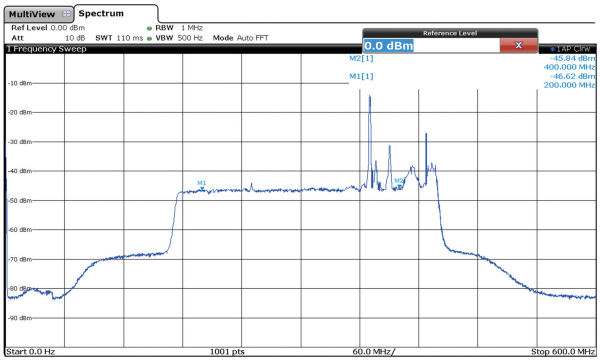

图 10　超导滤波器在测站上的应用效果

Fig.10　The effect of HTS filter at the observation station

随后，将滤波器安装在测站使用的制冷接收机中进行了验证，如图 10 所示，为加装超导滤波器后的制冷接收机中频输出口测试曲线（本振为 2 GHz），针对原来 2.143 GHz 附近的干扰信号的滤除非常干净，接收机在各个方位角及仰角情况下正常工作.

4　结　　语

通讯频率的不断拓展，对极高灵敏度射电天文观测造成了严重的干扰，本论文研制的 S 波段高温超导滤波器以其异常优异的性能、与制冷接收机一体集成的优势，在该领域体现了明显的改善效果，已经应用在测站的观测中；同时针对干扰更多更强的低频频率，如 L 波段和 P 波段，我们已同步开展了相关研究.

参　考　文　献

[1] 何川，王生旺，李斌，低温物理学报，**2**(2014)，3.

[2] 王贤华，张士刚，吴志华，低温与超导，**2**(2015)，88.

[3] 清华大学编写组，微带电路[M]. 北京：人民邮电出版社，(1976).

[4] 彭沛夫，微波技术与实验[M]. 北京：清华大学出版社，(2007).

[5] Delayen，J.R，and C.L.Bohn，*Phys. Rev. B*，**40**(1989)，5151.