

超导滤波器、超导卫星接收机和超导气象 雷达的研究进展*

何艾生 黎红 张雪强 李春光 何豫生[†]

(中国科学院物理研究所超导国家重点实验室 北京凝聚态物理国家实验室 北京 100080)

摘要 近年来,国际上高温超导微波器件的应用取得了重大突破,国内的高温超导微波应用也取得了重要进展.文章回顾了中国科学院物理研究所在探索具有高性能的高温超导滤波器以及同一芯片上不同类型超导滤波器的集成等方面的一些进展,其中部分滤波器分别在相对带宽(优于0.25%),返回损耗(优于-22.5dB),带边陡度(例如大于140dB/MHz),指定频段的抑制(超过110dB)等方面显示了优异的性能.对于在国内进行的首次高温超导滤波器空间环境模拟试验、首次使用高温超导滤波器子系统的卫星接收机前端地面试验和首次使用高温超导微波子系统的氣象雷达的现场试验,文章也做了介绍.

关键词 高温超导,微波滤波器,卫星应用,雷达应用

Recent Developments of high temperature superconducting microwave filters, satellite – to ground receivers and meteorological radar

HE Ai-Sheng LI Hong ZHANG Xue-Qiang LI Chun-Guang HE Yu-Sheng[†]

(National Laboratory for Superconductivity, Institute of Physics & Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Progress in the application of high temperature superconducting (HTS) microwave devices and sub-systems have been achieved worldwide as well as in China. Recent developments in high performance HTS filters at the Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences will be reviewed; among these filters some showed excellent specifications in, for example, fractional bandwidth (narrower than 0.25%), return loss (less than -22.5dB), skirt slope (greater than 140 dB/MHz), and out-of-band rejection within a certain frequency band (deeper than 110dB). Mechanical qualification tests for satellite applications of HTS filters, satellite-to-ground microwave receivers with a HTS front end, and field tracking of meteorological radar with a HTS subsystem will also be described, all the first of their kind in China.

Keywords high temperature superconductivity, microwave filter, satellite application, radar application

1 历史和现状

超导电性的发现,是20世纪基础研究的最重要的成果之一.长期以来,人们一直努力推动超导电性的应用.在20世纪80年代末,人们就了解到高温超导薄膜的微波损耗极小,用这种材料有可能做出性能优异的微波无源器件.这样在20世纪90年代前

后各种高温超导无源器件应运而生,其中高温超导滤波器以其独具的价值显示了强大的生命力.

微波滤波器是微波工程中的一种重要的器件.

* 中国科学院知识创新工程(KJ951-A1-01)北京市科委重大项目(H010410050111)、国家高技术发展研究计划(2002AA306181)、国家自然科学基金(10474127)资助项目
2006-02-14收到初稿,2006-03-24修回

[†] 通讯联系人. Email: yshe@aphy.iphy.ac.cn

各种滤波器从本质上讲都是频率选择器件,即在要求的频率范围内,它能使微波信号尽量无损地通过,这一段频率范围叫通带;对其他频率范围的信号则尽量抑制,通常谓之阻带。从已经研制成功的结果来看,高温超导滤波器与常规(例如,铜材料)滤波器相比较,具有五大优势:其一,通带损耗很小;其二,阻带抑制很大;其三,边带陡峭,或者说过渡带很窄;其四,可以制成极窄带滤波器,例如常规滤波器的相对带宽做到2%就已十分吃力,而超导滤波器的相对带宽可以达到0.2%以下;其五,自身的体积小、重量轻。由于具有上述优势,美、日、欧等先进工业国家都投入研究力量,积极开展各种超导滤波器的研究工作,经过十多年的时间,已经取得了长足的进步,部分项目已经进入实用阶段。

高温超导滤波器的设计大多继承了传统的平面微带滤波器的理论和方法,研究者一开始就意识到,通过增加谐振器的个数,超导滤波器的性能和技术指标就有可能全面胜出各种金属滤波器(包括三维滤波器)。1995年,美国的Zhang等人研制成19阶切比雪夫(Chebyshev)高温超导滤波器^[1]。2001年,日本的Ueno等研制成32阶切比雪夫滤波器^[2],堪称高温超导切比雪夫滤波器的代表作,其性能远非常规金属滤波器可比。

1998年,英国的洪嘉生和Lancaster首先把准椭圆函数用于超导滤波器的设计^[3],这种设计的特征是在通带附近设置一对或多对零点,这样就可以用较少的谐振单元获得十分陡峭的边带。2003年,日本Tsuzuki等利用准椭圆函数理论制作了具有5对零点的超导滤波器^[4],作为极窄带滤波器,其各项指标都达到了崭新的高度。至此,准椭圆函数滤波器已成为一类常见的超导滤波器形式。

在超导滤波器不断向应用发展的过程中,人们很自然地想到将超导滤波器放在小型机械制冷机内,用这种简便、快捷的方法确保超导器件正常工作必需的低温环境。人们还想到,如果把前置放大器也集成在制冷机内,由于工作在低温,放大器的噪声系数将大幅度地降低,就可以在提高系统抗干扰能力的同时,提高其接收灵敏度。这样就诞生了超导微波接收机前端子系统,简称超导子系统。该子系统一般放置在各种微波接收机的前端。

高温超导滤波器和子系统一出现,立即引起空间技术部门的关注。1988年(发现YBCO液氮温度高温超导体的第二年),美国以海军牵头提出了高温超导空间实验计划。该计划共分3个阶段,每阶段

都有色彩鲜明的内容和任务,计划的英文缩写是NRL HTSSE。1989年,第一阶段计划(HTSSE-1)启动,该计划的重点是检验简单超导器件是否能够经受航天飞行考验。1992年,全部18种超导器件(每种器件提供5个相同的样件)均通过了航天飞行的地面模拟试验。1993年,各超导器件按计划装入卫星,不料由于卫星未能按计划入轨,使搭载流产。但是,HTSSE-1的前期工作是成功的,高温超导器件的可靠性,对航天飞行恶劣环境的承受能力(力学、热真空以及辐照等)和小批量产品的一致性等均得到了检验,第一阶段的目标都已全部实现。因此,按计划进入了第二阶段(事实上,早在1992年就启动了HTSSE-2计划)。该阶段的重点是检验复杂的超导器件和子系统的空间性能。1999年2月,载有8个超导器件和子系统的卫星升空。2000年9月,这些超导器件和子系统在空间经受了一年半的考验后,美国海军实验室著文对试验做出了总结并得到4点结论:首先,高温超导器件和子系统在地面存放7年后,又经过18个月的空间试验未见任何性能退化迹象,表现了极高的可靠性;其次,高温超导器件和子系统完全可以经受火箭发射和空间飞行的考验;第三,与半导体器件相比,高温超导器件和子系统的抗辐照能力要高出几个量级;最后,试验成功证明了高温超导器件和机械制冷机完全可以在系统水平上进行集成,在卫星上完成通信和遥测任务。HTSSE-3计划的重点是试验完整的高温超导卫星通信系统和遥感侦测系统。试验结果未见进一步的报道。应当指出,HTSSE计划由单一器件开始,进而发展到子系统,最后实现整机应用的这种循序渐进,系统深入的试验方法和各个阶段的实验结论对世界各国的高温超导微波应用研究,无疑具有极为重要的牵引和示范作用。

进入21世纪后,美国宇航局(NASA)列出了作为实现21世纪战略目标的关键技术,共9大类13项,其中以高温超导滤波器和低噪声放大器为核心的“低温接收机前端”也被列入其中,用于空间数据传输(见图1)。

高温超导滤波器和子系统在雷达和制导技术中也同样发挥了重要作用。20世纪90年代,美国加州的超导技术公司(STI)曾研制一种高温超导滤波器库,该滤波器库由32个超导带阻滤波器组成,所控制的频带从8.5GHz到10.5GHz。这套系统是作为雷达抗干扰的重要部件,可以根据电子对抗瞬息万变的实际情况,用光纤和光学开关控制滤波器的通

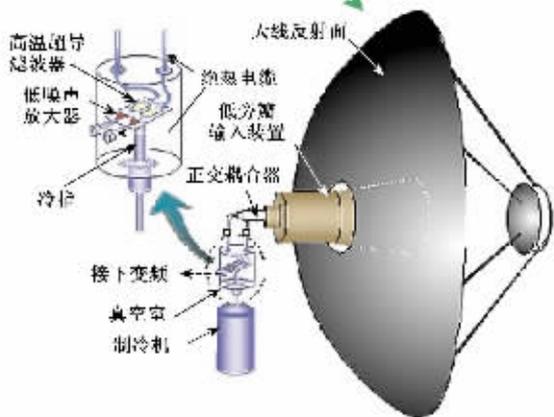
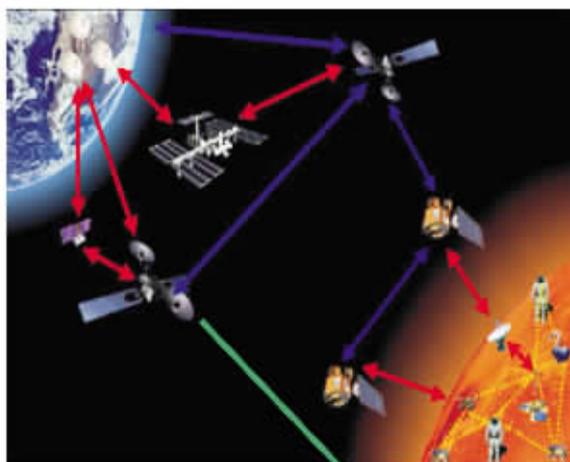


图1 美国宇航局(NASA)21世纪空间数据传输计划示意(上图)及其中的以高温超导滤波器和低噪声放大器为核心的“低温接收机前端”(下图)

断,实现阻带快捷跳变,在机载预警雷达中发挥了十分重要的作用.美国喷气推进实验室制作的含有超导子系统的下变频接收机,工作频率7.5GHz,带宽300MHz,噪声系数只有0.7dB,尺寸为 $17 \times 8 \times 2.5\text{cm}^3$,据报道,该装置显著地提高了巡航导弹制导系统的性能.

利用高温超导子系统提高卫星和雷达微波接收机的性能,其军事和经济价值是毋庸置疑的.在这一研究的基础上,衍生出了另一个纯粹的民用技术,即高温超导移动通信基站前端子系统,该系统在20世纪末诞生,目前在美国已有一定批量的商业产品.笔者曾有专文论及^[5],此处不再赘述.

2 我国高温超导滤波器研究已接近国际先进水平

高温超导窄带滤波器的设计是基于现代窄带滤波器理论的基础之上,借助于仿真软件和高速计算

机实现的.这一方法自2000年前后引入到国内,不久便产生了首批具有很强应用背景的成果.据文献报道,2002年,中国科学院物理研究所设计制作了准椭圆函数滤波器和GSM1800移动通信基站子系统原理样机,该滤波器选用开路折线微带谐振器,相对带宽1.2%,共8极,一对零点^[6].同年,清华大学物理系以移动通信为应用背景设计了14极切比雪夫滤波器,中心频率为1745.8MHz,相对带宽4%,带内插损0.2dB,带外抑制-60dB.后来,他们又设计了20极切比雪夫滤波器,将带边陡度提高到18dB/MHz^[7],带外抑制达到-80dB.也在这一年,电子科技大学研制了X波段带通滤波器,中心频率9.48GHz,相对带宽1.1%,带外抑制45dB^[8].其后,中国科学院物理研究所利用一种创新的折线谐振器和独特的滤波器结构,制作了24极切比雪夫滤波器^[9].该滤波器也以GSM1800移动通信基站为背景,通带矩形度达到1.08,带外抑制优于-90dB,使国内的切比雪夫超导滤波器达到一个新的水平.这一时期的成功是可喜的,滤波器带内、外插损和相对带宽等指标已接近或达到国外文献公布的水平.

没有创新就没有发展.实际应用背景往往对滤波器的某些参数提出极高的特殊要求,而高温超导滤波器只有充分显示出远高于常规器件的综合优势,才能在激烈的竞争中,走出实验室,真正实现应用.比如,某型号卫星微波接收机上已经使用了当前性能最好的常规滤波器,如果要代以超导滤波器,除要求极小的插入损耗和很高带边陡度外,根据卫星自身的特点,还要求超导滤波器必须具有极好的阻抗匹配(返回损耗优于-20dB)和对特定频带的极高的抑制能力(优于-100dB).这样高的性能,即使是单项指标,对于高温超导滤波器来说,也是极大的挑战.实际上,迄今为止国外也只有个别达到上述单项指标的报道,尚未见到同时满足上述两项要求的高温超导滤波器.针对这种情况,中国科学院物理研究所提出了一种带通与带阻滤波器集成一体的创新方案,在同一块 $45 \times 20\text{mm}^2$ 的高温超导芯片上,制作了一个中心频率和带宽可调的新型带阻滤波器和一个与之匹配的性能优异的带通滤波器.该滤波器组的主要性能指标达到国际先进水平,例如,带内最差插损-0.093dB(是相应常规器件的1/6),带边陡度优于12dB/MHz(是相应常规器件的6—7倍),特别是首次在单一芯片高温超导滤波器(组)上同时实现了通带内的低返回损耗(优于-22.5dB)和指定频段的高抑制特性(超过-110dB).中国科

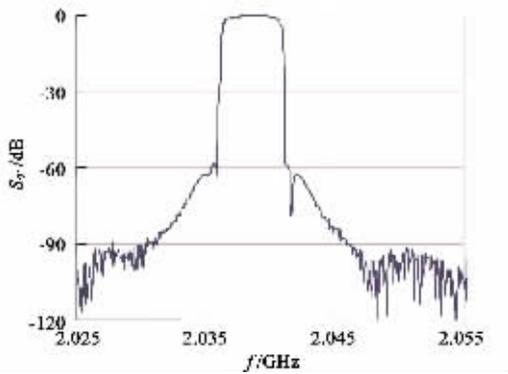


图2 中国科学院物理研究所研制的用于第三代的高温超导滤波器的传输特性测量曲线

学院文献情报中心在 2005 年 11 月 24 日的查新检索报告中指出：“检出文献中，反射（返回）损耗好于 22.5dB 的高温超导滤波器有 2 例报道，但未见有带外抑制好于 110dB 的高温超导滤波器的报道”，而将这些指标集于一身的超导器件：“在国内外也未见报道”¹⁾。

表 1 英国研制的超导极窄带滤波器和中国科学院物理研究所研制的超导极窄带滤波器的对比

主要指标	中国科学院物理研究所 实测结果(66K)	国外实测结果(65K)
中心频率/GHz	2038.5	1973
1dB 带宽/MHz	4.4	5.0
相对带宽	0.22%	0.25%
插入损耗/dB	-0.67	-0.54
返回损耗/dB	< -15	< -16
带边陡度/(dB/MHz)	低端 :140 高端 220	低端 :65 高端 :62
带外抑制/dB	>60($f_0 \pm 2.7\text{MHz}$) >90($f_0 \pm 7.5\text{MHz}$)	>46($f_0 \pm 5\text{MHz}$) >60($f_0 \pm 9\text{MHz}$)

随着通信事业的发展，频带资源的价格日益昂贵（据说在美国已达到每 MHz 数亿美元量级）。第三代移动通信提出了对 5 MHz 带宽（相对带宽 0.25%）极窄带滤波器的需求。带宽如此窄的滤波器，不仅常规材料根本无法实现，而且在 2GHz 频段，超导材料也无成功的先例。设计和制作的困难在于非相邻谐振器之间存在的寄生耦合往往使滤波器的传输曲线畸变。面对这一难得的机遇和挑战，英国学者首先在 2003 年实现突破，中国科学院物理研究所也在其后不久获得了成功。图 2 是该滤波器的相

应测量曲线，表 1 中列出了有关的微波性能指标，这些数据表明，中国科学院物理研究所研制的高温超导滤波器的部分指标已经接近、达到甚至超过了国外同类型超导滤波器。

3 高温超导卫星接收机前端在我国首次进行了地面试验

我国老一代著名科学家对高温超导微波器件应用研究十分关切。早在 20 世纪 90 年代，国家高技术研究发展计划项目建议人之一，我国空间电子学创始人陈芳允院士就曾多次指出我国应当尽早开展高温超导卫星接收机的研究。在根据航天部门提出的指标完成了集成一体的超导滤波器组的设计后，我们于 2005 年分别使用南开大学和中国科学院物理研究所研制的直径 2in ($1\text{in} = 2.54\text{cm}$) 铌系超导薄膜 (TBCCO) 制作成功上述集成滤波器组，这是第一次使用国产铌系高温超导薄膜制作成功实用微波器件。别具特色的是 TBCCO 滤波器在 93K 下所达到的指标与 YBCO 滤波器 77K 下的各项指标十分接近，甚至当温度上升至 103K 时，TBCCO 滤波器的传输特性和反射特性曲线仍能保持形状基本不变。令人振奋的是，这一温度已十分接近空间环境（背日照）温度，如能进一步提高，就有可能在空间不使用机械制冷而实现超导器件正常工作。这正是超导工作者梦寐以求的愿望。

作为航天飞行器件，超导滤波器无例外地要进行空间环境模拟试验，以证明器件达到航天飞行的要求。空间环境模拟试验一般包括三大部分：一是模拟空间的温度和真空环境；二是模拟航天飞行（特别是火箭发射中）受到的振动、冲击和加速度；三是模拟空间的辐照。由于此前美国的 HTSSE 等实验已经证明了高温超导材料具有非常强的抗辐照能力，而且中国科学院物理研究所研制的高温超导滤波器在实际工作中多次反复经历的真空和温度环境也远远超过了相应环境模拟试验的要求，因此航天部门决定重点进行航天飞行力学环境模拟试验，检验物理研究所制作的高温超导滤波器的材料、设计、加工、装配工艺等能否经受火箭发射和空间飞行的考验。

航天飞行力学环境模拟试验中的第一项是在电

1) 见 中国科学院文献情报中心编写的《科技查新报告：高温超导滤波器的研究以及应用示范》[编号为 2005-244(2005.11.24)]。

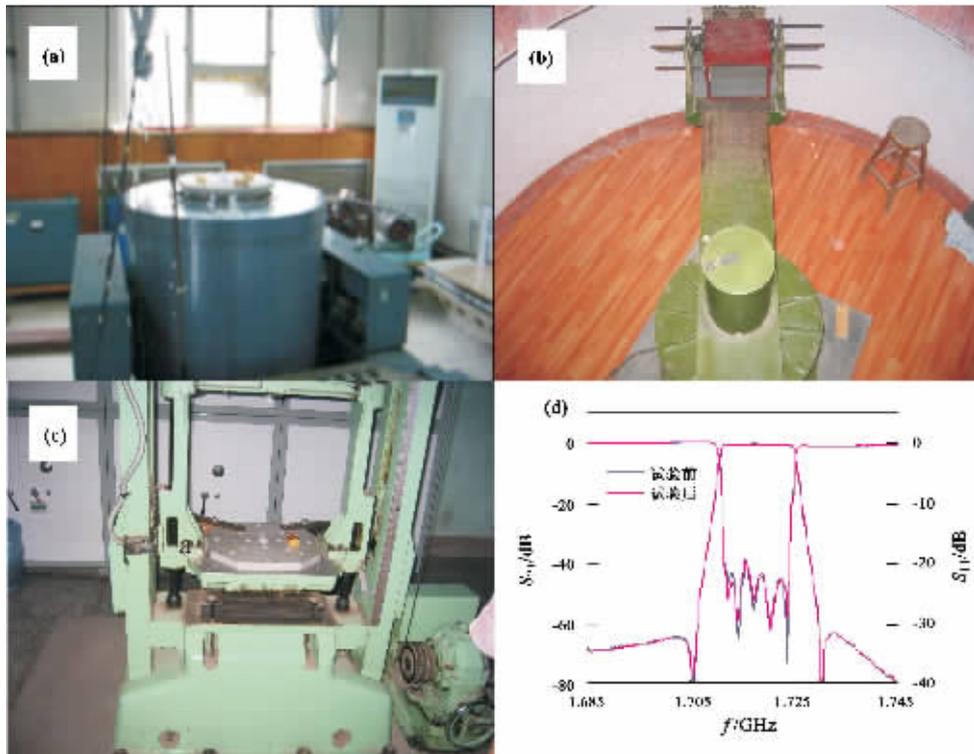


图3 高温超导滤波器的空间力学环境模拟试验照片和测量曲线 (a)振动试验 (b)离心试验 (c)冲击试验 ; (d)试验前后测量曲线的对比

磁振动台上接受振动试验[图3(a)].振动分别沿 x 、 y 、 z 三个方向进行,在每一方向上滤波器首先要经受不同频率的正弦振动,然后还要经受破坏力极强的随机振动.试验器件受到的最大加速度达到 $20g$ (g 为重力加速度).

试验的第二项是离心(加速度)试验.受试的超导滤波器放在离心试验机内高速旋转,加速度方向沿卫星 x 轴方向,保持时间 2min ,加速度达到 $9g$ [图3(b)],模拟卫星在火箭发射和空间飞行时经受的加速度.

试验的第三项是冲击试验.将超导滤波器安装在试验架上,然后自一定高度自由下落并与试验台相撞击,冲击谱为半正弦波,波形宽度 $6\text{--}10\text{ms}$,加速度幅值 $50g$.冲击沿安装面三个正交轴方向,每个方向至少一次.图3(c)是超导滤波器接受冲击试验的情景.滤波器安放在垂直方向的试验架上.

为了确定每种力学试验的影响,在每做一次试验的前后都要用网络分析仪对超导滤波器进行 S 参数测量,仔细从中找到试验前后微波特性的差异.经过连续几天的紧张工作,航天部门得出结论:中国科学院物理研究所送检的三个高温超导滤波器“试验前后的传输曲线(S_{21})和反射曲线(S_{11} 、 S_{22})的形状未见明显变化,曲线的中心频率和带宽无变化”.结

论最后指出“力学试验结果表明,中国科学院物理研究所研制的高温超导滤波器能够经受航天飞行力学试验的检验.证明高温超导滤波器的材料、机械设计、加工和装配工艺均达到了航天飞行力学性能要求”.

为了验证高温超导卫星接收机的优异性能,航天部门进行了高温超导体系统与某型号卫星接收机样机的联机对比地面试验.方法是将卫星用常规金属滤波器和高温超导体系统分别接入卫星接收机的前端,然后利用噪声测量仪依次测量各联机系统的噪声谱.试验结果以确凿的数据表明,使用高温超导滤波器子系统可以大幅度地降低卫星接收机的噪声,显著提高卫星接收机的灵敏度和抗干扰能力.由航天部门负责专家签署的测试报告指出:“高温超导滤波器联机系统的噪声温度仅为金属滤波器联机系统的 27% ”;“采用高温超导技术可以明显减小接收系统的噪声.这一事实对卫星通信系统有着重要意义”;“对卫星上来说,可以提高有效功率资源的利用,对地面来说,能减小地面设备的发射功率,特别是对地面移动式用户机的应用,发射功率的减少能减轻设备的体积和重量”.报告郑重提出:“建议进行卫星搭载试验”.

超导滤波器顺利通过了空间环境模拟试验和超导微波子系统与卫星微波接收机联机试验的成功是

我国高温超导滤波器研究工作的重要成果,表明我国的超导滤波器研究已经完成了各项地面准备工作,具备了卫星搭载试验的条件.它使我国超导滤波器朝空间通信、卫星导航等应用迈出了关键性的一步.

4 高温超导微波子系统与气象雷达的联机试验

气象雷达近年来得到较快的发展,已经成为一个雷达系列.气象雷达测量的参数可分为三类:一类是目标特性参数,观察者据此可以判断天气目标是雨或者是雪等;一类是目标位置参数,通过天线的方向和接收到的反射回波的时间间隔,确定天气目标与雷达间的距离、方位等;还有一类是目标相对雷达运动的速度参数,雷达测速是依据多普勒效应,从回波频率的变化计算气象目标的运动方向和速度.将后面2个参数结合起来,就可以测定天气目标(例如,气流)在空间的速度分布,得出天气目标的廓线图.风温廓线雷达就是利用这一原理实时测绘距地面不同高度的大气的温度、气流运动方向与速度的完整图谱.图4是雷达接收机的原理框图,其中用点线框出的部分是雷达接收机的微波电路部分,称为接收机前端.接收机前端对雷达的性能有很大影响,一方面,雷达接收机的噪声主要取决于天线至低噪声放大器之间所有器件的损耗和噪声系数的总和;另一方面,雷达接收机的抗干扰能力取决于接收机前端对电磁波频率的选择能力.由于气象雷达的回波频率变化范围小,所以要求滤波器的通带很窄,而这种极窄带滤波器用常规金属材料往往是无法实

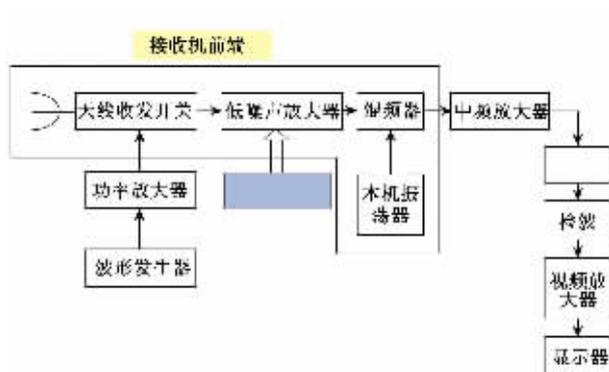


图4 高温超导子系统与风温廓线雷达联机对比试验方框图

现的,所以在实际雷达中(见图4),未设前端滤波器,而将滤波器放在中频放大之后.针对这样的情况,中国科学院物理研究所提出以极窄带超导滤波器、低噪声放大器和制冷机组成的超导微波子系统(图4中加有浅灰底色方框部分)替代雷达前端中的低噪声放大器,来提高雷达的抗干扰能力和灵敏度.

2005年2月,上述高温超导微波子系统与我国研制的新型风温廓线雷达进行了首次联机试验.图5的左边是风温廓线雷达的天线,右侧显示超导子系统通过电缆与雷达接收机前端相连接.实测结果表明,使用超导子系统后,雷达的灵敏度提高了2.4倍(3.8 dB).抗干扰能力因为增设了超导滤波器的缘故,提高幅度达到7万倍以上(48.4 dB).

同年6月,高温超导子系统与风温廓线雷达完成了第二次联机试验.此次试验重点在于当干扰存在时比较常规雷达系统和超导雷达系统的实际测风能力.图6显示的是由雷达测量得到的实时风廓线谱,其中横轴为时间(从上午10时24分开始,每6



图5 高温超导子系统与风温廓线雷达联机试验现场(左图为雷达天线,右图为雷达接收机和高温超导子系统)

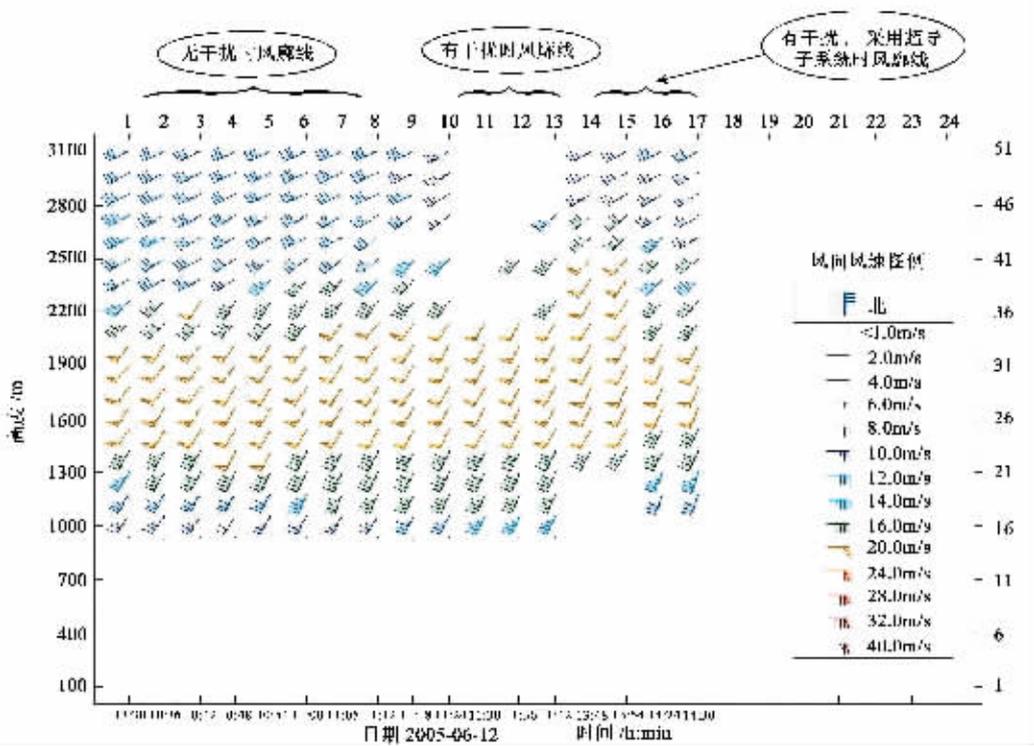


图6 风温廓线雷达完成的风廓线测量图,图中显示在有干扰时常规系统无法给出2000m以上高空的风廓线,而高温超导子系统仍能保证测量正常进行

分钟给出一次连续实时测量后的平均值),纵轴为测量点上空高度(单位:m),箭头形图标表示对应时间测量得到的相应高度的风向与风速。其中箭头指示方向(按照上北,下南,左西,右东的规定),箭羽颜色和根数表示风力(参见图例)。如图6所示,联机测试分成3个阶段:第一阶段是未加干扰,一切正常;第二阶段加入一定干扰信号,由于2000m以上高空回波较弱,雷达无法做出判断,导致有效探测高度大幅度降低;第三阶段加入超导滤波器,测风能力又得到恢复,全然看不出干扰的影响。上述试验说明,含有高温超导微波子系统的雷达前端比较常规雷达前端确实具有明显的优势,可以极为有效地增强风温廓线雷达系统的抗干扰能力。对于工作在城市周边,电磁环境较为恶劣的各种气象雷达,具有特别重要的意义。

超导气象雷达试验获得成功,不仅在我国而且在国际范围内也属首次。由于气象雷达关系到国计民生和国防建设事业,因此受到日益广泛的重视,例如2005年10月在神州飞船的回收场首次部署了风温廓线雷达,为飞船的成功回收提供了技术保障。我国计划近期在全国部署一批气象雷达,首先要在一两年内完成北京的气象雷达监测网,确保首都的安全和2008年奥运会的成功。这次现场试验的成功,为利用超导

技术进一步提高气象雷达的性能,为高温超导技术走向应用,为国家经济建设和社会发展服务提供了又一个极好的契机。2005年9月,我们应邀在第10届国际超导电子学讨论会上报告了上述成果,受到极大关注,国际同行普遍认为中国科学院物理研究所的工作为高温超导子系统的应用开辟了一个新方向。

致谢 本工作使用了物理所郑东宁研究组,南开大学闫少林研究组研制的高温超导薄膜,特此致谢。

参考文献

- [1] Zhang D W, Liang G L, Shi C F *et al.* IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1995, 5(11): 405
- [2] Ueno Y, Okazaki M, Sakakibara N *et al.* ISEC01, June 2001, 83
- [3] Hong J S, Lancaster M J, Greed R B *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 1999, 9: 3893
- [4] Tsuzuki G, Ye S, Berkowitz S. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2003, 13(2): 261
- [5] 何豫生. 物理, 2002, 31(4): 205 [He Y S. Wuli (Physics), 2002, 31(4): 205 (in Chinese)]
- [6] 何豫生, 黎红等. 中国科学 E 辑, 2002, 32(4): 479 [He Y S, Li H *et al.* Science in China, Series E, 2002, 32(4): 479 (in Chinese)]
- [7] 刘邦长, 曹必松等. 低温物理学报, 2002, 24: 310 [Liu B C, Cao B S *et al.* Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2002, 24: 310 (in Chinese)]
- [8] 羊恺, 王平等. 宇航学报, 2002, 23: 91 [Yang K, Wang P *et al.* Journal of Astronautics, 2002, 23: 91 (in Chinese)]
- [9] Zhang X Q, Meng Q D *et al.* to appear in Superconducting Science and Technology, 2006, 19