

高温超导微波器件在移动通信中的应用^{*}

何 豫 生[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘 要 高温超导微波器件在移动通信基站的应用,蕴涵了巨大商机.由高温超导滤波器、低噪声前置放大器以及微型制冷机组组成的高温超导移动通信基站接收机前端子系统,将给移动通信基站的性能带来极大的提高.目前,全球已出现一批专业化商业公司.美国已有近 2000 套高温超导子系统产品在基站做商业运行;欧洲和日本也已完成样机研制.中国科学院物理研究所在 2001 年初完成了我国第一台高温超导移动通信基站原理性样机.

关键词 高温超导,微波器件,移动通信基站

APPLICATION OF HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING MICROWAVE DEVICES IN MOBILE COMMUNICATIONS

HE Yu-Sheng

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The rapid growth of the mobile communication industry has created a significant opportunity for high temperature superconducting (HTS) technology. The HTS base station subsystems composed of filters, low noise amplifiers and cryocoolers have superior characteristics and will bring dramatic improvements for mobile communications. A number of specialized companies have chosen to tie their fates to the development of HTS subsystems in commercial mobile communications. Nearly 2000 HTS subsystem products are currently deployed in the US. Subsystem prototypes in Europe and Japan have also been completed. The first demonstration of an HTS subsystem for mobile communications in China was made by the Institute of Physics, CAS, in early 2001.

Key words high temperature superconductor, microwave device, mobile communications

高温超导体的发现,是 20 世纪基础研究的一个极为重要的成果.近 10 年来,人们对高温超导电性的研究取得了长足的进步.与此同时,一批性能卓越的高温超导微波无源器件也相继诞生了.在这一背景下,与高温超导微波器件实用化、产业化相关的研究与开发已被提到议事日程上.这其中,以高温超导移动通信基站子系统的研究与开发工作呼声最高,技术也相对成熟.在美国,超导移动通信基站子系统产品已完成了通信网试验,有关产品已小批量的投入市场.超导子系统在试验过程中展现的优异的性能受到广泛的关注,引发了商家的投资热情.

下列数字:1996 年,全球移动通信用户不足 1.5 亿户.1998 年发展到 2.83 亿户.仅过两年,到 1999 年底达到 4 亿户.到 2000 年底已达到 5 亿户.几乎是每 2—3 年翻一番.国际电信联盟乐观地估计,到 2010 年全球移动电话用户将达到 22 亿,其中,亚太地区估计为 11 亿户,与此相伴的还有一个不断扩大着的全球市场.

我国的移动通信业始于 1987 年,随即以年增长率 200% 的速度急速发展起来.到 1998 年底,我国的移动电话用户达到 2386 万户,居世界第三.1999 年底,用户突破 4300 万户.这个数字已占全球用户总

1 飞速成长的移动通信产业

移动通信产业是当今发展最快的行业,有人甚至用“爆炸”、“疯狂”等字眼来形容其发展速度.请看

^{*} 中国科学院知识创新工程(Ⅱ期)重要方向(批准号:KJCX2-SW-W01)/北京市科委基金(批准号:H01041005011)资助项目
2001-10-19 收到初稿,2001-11-26 修回

[†] 通讯联系人.E-mail:yshe@cl.cryo.ac.cn

数的 10%，但从全国人口总数来看，移动电话的普及率只达到 3.3%。这说明，移动电话在中国的发展潜力还很大。果然，半年以后全国用户总数达到 6000 万户，仅次于美国当年的 8600 万户，居世界第二位。2001 年 8 月，据信息产业部公布的数据，全国用户总数已达到 1.206 亿户，超过美国的 1.201 亿户，一跃为世界第一。

从技术的角度来看，移动通信业的发展也是惊人的。商用移动通信技术起始于 20 世纪 80 年代初。自那时起到今天，商用移动通信技术已经历了两代 (generation) 技术的变化，目前正向第三代技术过渡。

最早的商用移动通信系统采用了模拟通信技术，称为第一代 (1G)。在 1G 系统中采用频分多址技术 (FDMA)。第二代 (2G) 移动通信系统是在数字信号处理技术和相应的集成电路的基础上发展起来的。在这一系统中，除开基站前端的射频部分，其余的功能技术模块都是由数字处理单元和器件来实现的，因此也叫数字移动通信系统。这一系统一直沿用至今。在 2G 系统中，分别采用时分多址 (TDMA) 技术和窄带码分多址 (窄带 CDMA) 技术。

20 世纪 90 年代中以来，国内外关于第三代移动通信系统的研究和讨论逐渐形成了这一研究领域中的热点。由国际电信联盟提出的第三代移动通信标准即国际移动通信 2000 (international mobile telecommunications 2000, IMT-2000)，其目的是统一全球的使用频率，统一标准，实现全球漫游和提供多业务服务。通俗地说，3G 系统将是一个覆盖全球的通信网；它使用共同的频段和统一的标准；它不仅传播语音，还将实现数据、声音和多媒体业务在快速移动的环境中传播。在 3G 系统中将采用先进的宽带 CDMA 技术。由于经济利益和技术优势等因素的影响，国际电信联盟在 2000 年最后确定 3G 中五大标准并存，其中包括中国提交的 TD-SCDMA。据有关部门预测，从 2004 年到 2010 年是 3G 的高速成长期，届时 3G 将实现全球覆盖，全面达到 IMT-2000 的各项指标。自古以来人们憧憬的能在任何地方随意进行通信、交流信息的理想从此将成为现实。

移动通信业的蓬勃发展为各大公司带来了惊人的利润，但同时也带来了更加严重的信号干扰、频率资源紧张、系统容量不足、数据传输速率受限制等诸多难题，移动通信的商家竞争也会越来越激烈。高温超导移动通信子系统正是在这一背景下应运而生，它以独具的优异性能可以有效地抑制干扰、扩大基站覆盖面积、增加容量和降低功率损耗。尽管这一高

科技项目还处在发展之中，但已经受到日益增多的关注和期待。

2 高温超导移动通信基站子系统

目前所说的高温超导移动通信基站子系统是指由高温超导滤波器、低噪声放大器和微型制冷机组成的系统。这一子系统通常放在天线塔上，置于天线与移动通信基站接收机之间，直接处理由天线接收到的微波信号。

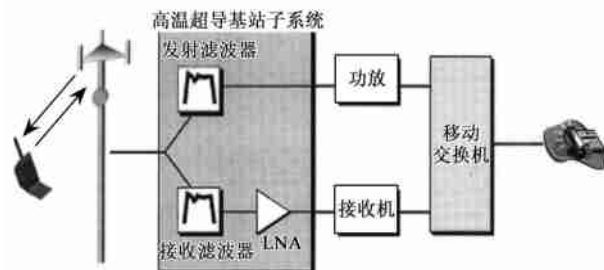


图 1 高温超导移动通信基站子系统示意图 (引自文献 [1])

图 1 显示，从天线接收到的射频载波信号，通过高温超导带通滤波器 (filter) 排除了邻频干扰信号，再由低噪声放大器 (LNA) 放大，放大后的信号经接收机单元还原成声音，然后将声音送到电话用户 [1]。在常规基站中，滤波器通常主要是用金属 (例如铜) 加工制造的，由于金属的微波表面电阻相对较大，金属平面滤波器通常做到七八阶，损耗就已经相当高了，性能自然不理想。表现为通带内微波损耗高，即插入损耗大；对通带以外的邻频干扰抑制能力差，即带外衰减小；通带边缘变化平缓，即矩形度不好。与常规金属相比较，在移动通信频段 (1-2GHz) 内，高温超导薄膜的微波表面电阻可以要小千百倍 (见图 2) [2]，可以做成高达 30 多阶的滤波器。高温超导滤波器的优点是插入损耗小，带外衰减大，矩形度好。图 3 是美国公司研制的“Brick Wall”超导滤波器特性与常规滤波器特性的比较 [3]。图中实线代表超导滤波器的特性，虚线是常规滤波器的特性，二者的差异一目了然。图中含有阴影的矩形代表邻频干扰信号，由于超导滤波器带外衰减很大，干扰信号将被滤除。

我们已经讨论了高温超导滤波器的种种优越性能，那么高温超导移动通信基站子系统对整个移动通信系统会作出怎样的贡献呢？有关专家和用户都一致认为高温超导子系统的优越性是鲜明的，这一子系统给移动通信系统带来的好处可以归纳为以下

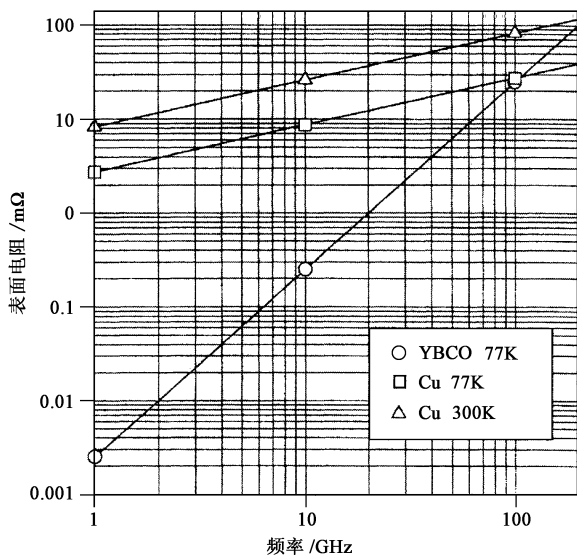


图2 高温超导薄膜与铜的微波表面电阻在300K和77K时的频率特性(引自文献[2])

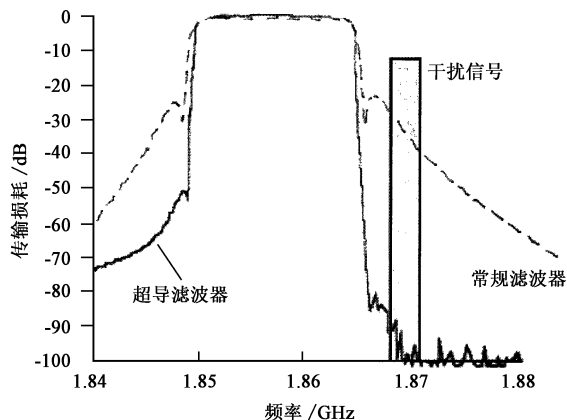


图3 美国公司研制的“Brick Wall”超导滤波器特性(引自文献[3])

几方面:

(1) 提高了基站接收机的抗干扰能力

对移动通信工程来说,抗干扰能力是最重要的技术性能之一,这是因为无线通信与有线通信相比较本来就易于受到其他信号的干扰.干扰来源于各种频率与之相近的电磁波;干扰也来自移动电话自身,主要是用户过多,在同一城市建有许多不同种类的无线通信网,存在多种不同数据传输协议等等.这种种干扰的恶果导致基站覆盖面积减小,网络容量下降,语音质量下降,干扰严重时甚至使移动通信网陷于瘫痪.对第三代数字移动通信,各种干扰将带来更严重的影响,这是因为3G高速宽带数据传输更易被干扰所破坏,例如图像数据传送能够承受的误

码率至少应比语音传送小4个数量级.

我们在前面已经指出滤波器在基站接收机前端的重要作用,并指出超导滤波器与常规滤波器相比具有陡峭的边带和极大的带外抑制(可达到80dB的衰减),这些特点大大提高了接收基站对干扰信号的抑制能力.此外,高温超导振荡器的相位噪声很小,例如由笔者所在研究组完成的一种C波段超导振荡器,相位噪声达到 -134dBc/Hz .用这类振荡器产生的本地振荡将是异常稳定的,从而进一步提高了移动通信基站抵抗强干扰的能力.这后一项措施已列入下阶段的高温超导移动通信基站子系统的研究课题中.

1999年12月,美日几家公司联合进行了3G网络野外试验,证明高温超导子系统能够非常显著地降低各种邻频干扰现象.在2000年,美国一家公司的野外试验结果也证实了上面的分析.当强干扰使第二代CDMA系统的98%的容量和覆盖区域处于瘫痪时,换用高温超导子系统可使通信100%的恢复正常^[3].

(2) 可以充分利用频率资源,扩大基站的容量

无线电频谱在当今已成为宝贵的资源,这是因为无线电波已成为信息传递的重要手段.不仅通信、广播、电视需要使用一定频率并占有一定的频率宽度来传播信息,同时海、陆、空的交通部门,石油、外贸、国防、外交等部门,也都需要供各自使用的频段.当前,大量的电台使用的频率都集中在2GHz以下,由于用户太多,太集中,相互间的干扰是不可避免的.例如,将划给IMT-2000的频段已被使用了几十年,不仅许多部门的微波通信使用这一频率段,国防部门的某些雷达、导航、定位系统也都在这一频段工作.在实现3G通信之前,这些业务部门都要改到其他频段去工作,这不仅需要时日,还需要付出大量的财政代价.

尽管频率资源如此紧张,但是使用传统滤波器的移动电话基站仍然存在浪费频率资源的现象,这是由于传统滤波器的过渡带平缓,为了避免相邻信号的干扰,不得不在两个相邻信号频带之间预留相当宽度的过渡频带.无疑地,预留的过渡频带越宽,可供使用的信号频带就越窄.而超导滤波器的优点正在于其过渡带极陡,这使预留频带的宽度减到最小,从而可以最大限度地利用频率资源(见图4).

有消息说,日本的第二代移动电话对第三代移动通信标准所指定的频带将会产生非常强烈的干扰.为此,日本的有关部门准备在3G网络使用的频

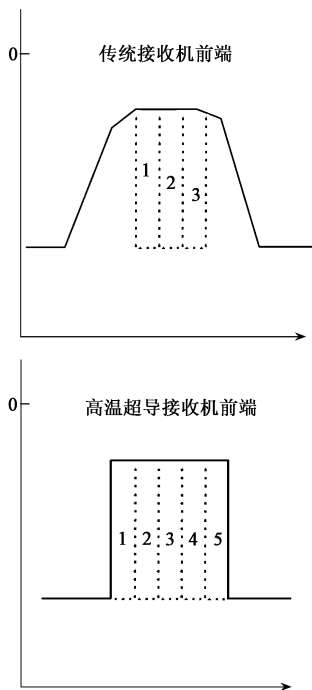


图4 利用超导滤波器可以节省频率资源,提高容量
(引自文献[3])

段中划出 15MHz 的带宽作为过渡带.如果设想在 3G 网络中采用高温超导子系统,就有可能使这 15MHz 的频段得到充分的利用.按目前通信频率市场的行情,这相当于节省了近十亿美元.

不仅如此,美国一些公司的产品在通信网的实际运行结果表明,高温超导子系统还可以提高基站的容量.例如,美国一公司曾在市区进行过超导移动通信基站子系统通信网运行实验,结果证明,对 TD-MA(2G)技术系统,可以在通话高峰期间使基站的容量提高 80%^[3].对 CDMA 系统而言,由于其容量与抗干扰能力相关,基站容量的提高就更加明显了.

(3) 扩大基站的覆盖面积

对于接收机来说,应当尽量减少输入信号的损耗,以便提高基站系统的灵敏度.这将意味着加大了基站的覆盖面积.高温超导子系统正是通过以下三方面的改善来实现这一目的.首先,超导滤波器的带内插损很小,一般在 0.3dB 左右;而常规滤波器的插损在 2dB, 3dB, 甚至更高,二者相差 10 倍.其次,与滤波器相连的放大器,在超导子系统中是放在同一低温环境中的,放大器由于在低温工作,可以大大降低自身的噪声.最后,传统接收机前端一般都放在基站的机柜内,经较长的电缆与天线相连.而高温超导子系统由于体积与重量减少了许多,完全可以放在天线塔上,直接与天线相连,避免了电缆造成的损

耗,从而提高了系统的灵敏度.

图 5 展示了美国 ILSC 公司制造的超导移动电话基站子系统^[1].该子系统的体积为 1.6ft³ (1ft ≈ 30cm),高度与手机的长度相仿.据介绍,单人即可将其安装在天线塔上.ILSC 公司宣称,它生产的高温超导子系统可以使噪声降低 5dB,网络覆盖面增大 40%,高峰期通话量增长 30%.美国 ILSC 公司估计,由于超导子系统使基站灵敏度提高,覆盖面积增大,在偏远地区使用该产品可使基站数目减少一半^[1].



图5 美国 ILSC 公司制造的超导移动电话基站子系统
(引自文献[1])

(4) 改善通话质量,提高数据传输速度

由于抗干扰能力差,信噪比不够理想,常规移动通信网中常常出现掉话、语音质量差的现象,使用户感到很不方便.这一矛盾在 3G 移动通信网络中将会变得更加突出,因为 3G 需要传送图像等业务,由于传送信息量大,3G 要求提高数据传输速度,至少要达到 384kbit/s,最终要达到 2Mbit/s.这对传统设备确实是一个难题.

高温超导基站子系统由于抗干扰能力强,信噪比高,能够保障数据高速传播.可以想见在 3G 网络中这些优点对保证语音和图像的传送质量是多么重要.

图 6 是美国 Conductus 公司研制的“Clear site™”高温超导子系统在野外工作的试验曲线,该试验目的是检验高温超导子系统的抗干扰能力.纵轴 SINAD 表示信号强度(signal intensity)、噪声(noise)和畸变(distortion)的综合指数,横轴为时间.试验一开始显示了用常规系统接收到的模拟信号,其噪声幅度是很大的.约 2.5min 后用高温超导“Clear site™”系统切入,信号质量得到了明显的改善.又经过约 10min,超导系统关闭,换用常规系统,信号又恢复如初^[3].

(5) 超导基站子系统带来了绿色的通信网络

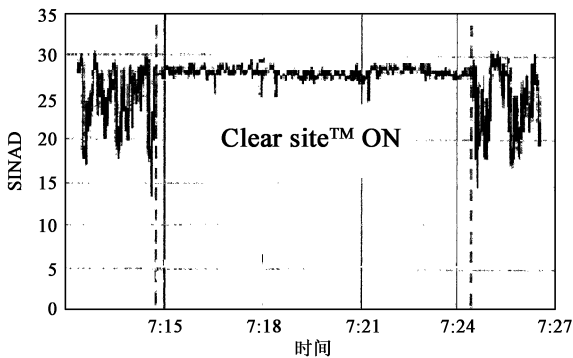


图6 美国 Conductus 公司高温超导基站系统改善通信信号质量试验测量曲线(引自文献[3])

微波对人的生理会造成伤害,这已是不争的事实,在现代社会中由于电视、各种通讯设备、雷达、导航都使用一定频率的微波,已造成了环境的电磁污染.当手机的使用者将手机天线贴近头部工作时,微波带来的危害更不能忽略,所以移动电话的使用者既是它的受益者也是受害者.减少手机危害的有效办法就是减小基站和手机的发射功率.这种无危害的手机就是绿色手机.由于超导基站子系统可以提高系统的灵敏度,提高系统的信噪比,因此,使用超导基站子系统的移动通信网在保持原有通信效果的前提下,可以减少基站和手机的辐射功率,同时基站自身的耗能也减少了.所以高温超导材料可以造就绿色的环境和绿色的手机.

3 国外研究开发进展简介

3.1 美国

美国是最早意识到高温超导微波器件在移动通信领域中具有发展前景的国家.早在 20 世纪 80 年代末,就先后成立了许多专业公司,推动高温超导微波器件的应用.一个最生动的例子是 Conductus 公司.该公司是世界最有名的生产超导量子干涉仪(SQUID)的专业公司.面对移动通信迅猛发展的背景,该公司断然终止 SQUID 的所有研究工作,集中全部力量转入到高温超导移动通信子系统的研究开发工作上来,终于抓到了新的商机.

1995 年 2 月,在美国新奥尔良举办的蜂网通信会议上,有四家公司展示了他们研制的超导滤波器.利用已掌握的制备大面积超导薄膜的优势,有些公司研制的超导平面滤波器甚至可以做到 19 级.这四家公司中的三家成功上市,现在已发展成了世界上最有实力的超导微波技术专业公司,他们是 STI(Su-

perconductor Technologies Inc.), ILSC (Illinois Superconductor Corp.) 和 Conductus Inc.

1998 年起,上述公司的高温超导子系统产品开始逐步定型并上市销售,最初的订单很少,一年只售出几十台作试运行实验.由于试运行的效果很好,销售状况为之一变. STI 公司为此启动了超导子系统生产流水线(见图 7).该生产流水线包括制膜、滤波器制作、制冷机及低温电路的生产等等^[4].表 1 列出了该公司近年销售状况,年增长率在 50% 左右.预期 2001 年增长有可能大于 200%.目前该公司超导子系统产品销售量约占全球的一半左右.

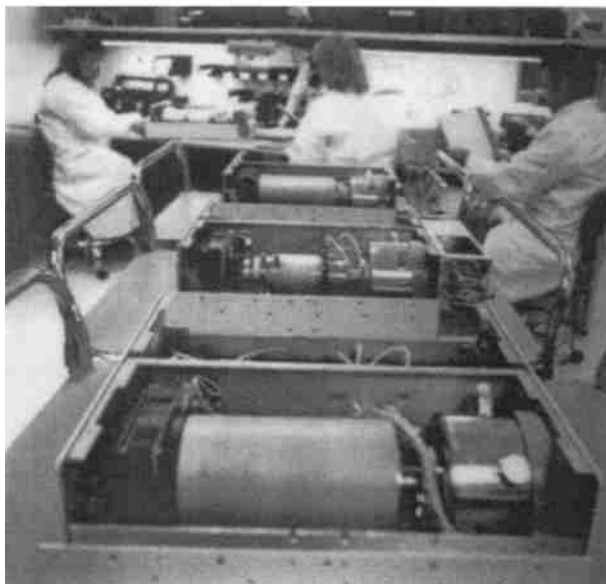


图7 美国 STI 公司的超导子系统生产流水线(引自文献[4])

到 2000 年,上述公司大体都完成了野外实验工作,有的公司还公布了部分实验结果.例如对城市中的 TDMA 移动通信系统实验表明,超导子系统使高峰期内基站容量增加 80%;在强射频干扰 CDMA 移动通信系统时,超导子系统仍能大幅度地增加基站覆盖面积;证明了超导滤波器可使系统的选择性提高 30 倍. Conductus 公司在 2000 年 6 月与日本 KDD 和 HITACHI 公司合作,完成了超导子系统对 3G 移动通信系统的实验,证明可以在覆盖面积、容量、减少 Bit 错误率、抗干扰能力等方面,显著改善 3G 系统原有的性能^[1,3,4].

表 1 STI 公司高温超导基站子系统年销售情况

年、月	1998	1999	2000.9	2001.9
售台数/年	83	123	188	>600(预计)
总计	83	206	394	>1000(预计)

上述试验的成功,在美国激起了一个投资高温超导基站子系统的热潮.在众多新、老公司中,杜邦(Du Pont)公司脱颖而出,凭借他们以往在超导薄膜、微波设计方面的优势和雄厚的资金,投入上亿美元,研制高温超导体商用样机.他们独辟蹊径,一改超导器件越做越大的情况,推出一种超小型基站子系统,其制冷机只有可口可乐易拉罐大小,十分引人注目,成为继三家上市公司之后的美国第四家著名超导体系统研制公司.

3.2 欧洲

欧洲的一些发达国家几乎与美国同时开展高温超导微波器件研究,但很长一段时间里都处在学术探索阶段.1996年,由于受到美国开发高温超导体系统市场的影响,同时也由于移动通信展现出了巨大经济效益,欧盟提出了以SUCOM命名的高温超导移动通信系统研究计划.加入这一计划的部门有:两所大学[英国伯明翰大学和德国乌伯托(Wuppertal)大学];三个研究所(英国的GEC-Marconi的两个研究中心和法国的Thomson CSF中心实验室);四家商业公司(包括一家制冷机制造公司和三家移动通信公司).SUCOM明确提出以欧洲第三代移动通信系统(采用UMTS技术)作为应用背景,以研制新型高温超导移动通信子系统为目标的全盘计划.整个计划分为三个阶段:第一阶段的任务是研制基站接收机前端子系统,提高基站接收机的灵敏度和选择性;第二阶段的重点将向下变频延伸,拟采用高温超导混频器和超导低相噪声振荡器,以进一步提高系统的抗干扰能力;第三阶段的目标是将高温超导器件推广到整个收发机系统,特别是发射机系统,力求在保持同样覆盖面积情况下,将功率损耗减小一个数量级.

该计划的第一阶段任务已经完成.研制成的子系统集成了6个高温超导带通预选滤波器,6个低噪声放大器和3个双工器.子系统的工作频率为1770—1785MHz.图8是该子系统使用的斯特林制冷机^[5],位于左侧的柱体是一台小型斯特林制冷机主体,总体积是 $\phi 150 \times 290$ mm,内置上述微波器件.右侧的柱体是制冷机的压缩机,总体积是 $\phi 115 \times 290$ mm.当输入功率为200W,环境温度为 $-40^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$ 时,系统可以提供的工作温度是60K,制冷功率3W.连续无故障工作寿命可达到3年以上^[6].采用高温超导双工器是SUCOM计划的一个特色,图9是双工器的结构图形,它由带阻滤波器和级联耦合器组成,性能远优于用常规材料制成的平面双工器^[6].



图8 欧洲SUCOM计划研制成的超导移动基站子系统斯特林制冷机,左侧圆柱体是制冷机主体,内装超导微波器件和放大器,右侧圆柱体为压缩机(引自文献[5])

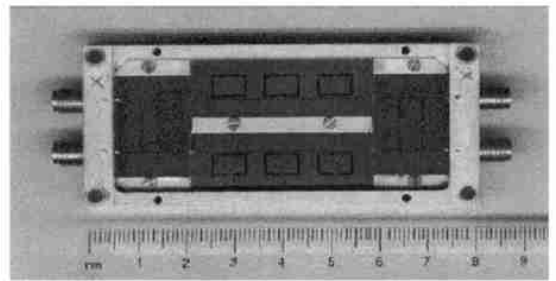
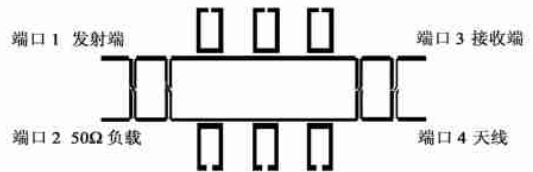


图9 欧洲SUCOM计划研制成的高温超导双工器的原理图和实物照片(引自文献[6])

值得注意的动向是欧洲为了面向市场,开始对科研体制做了改革.原来参加SUCOM计划的成员国单位及公司,近年来又分别组成两个新的公司.一个是CryoSystems公司,是以英国伯明翰大学和原通用电气(GE)公司一些成员为主组建而成,成立于1999年,目前有10位雇员.另一个是以德国乌伯托大学为主的Cryoelectra公司,公司有23位雇员.不久前他们发表了一个由17阶谐振器组成的高温超导滤波器,据称带边陡度达到85dB/MHz(见图10)^[7],引起了广泛关注.

3.3 日本

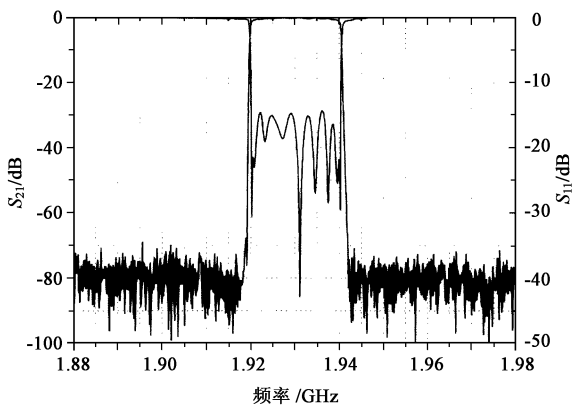


图 10 德国 Cryoelectra 公司制作的高温超导滤波器特性曲线 (引自文献[7])

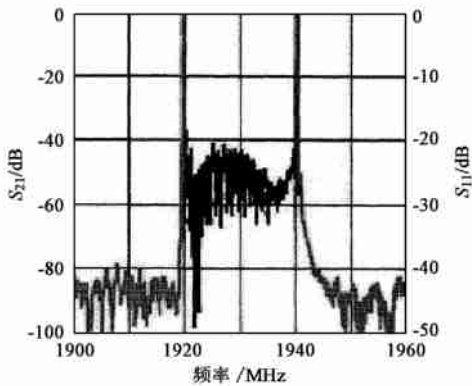
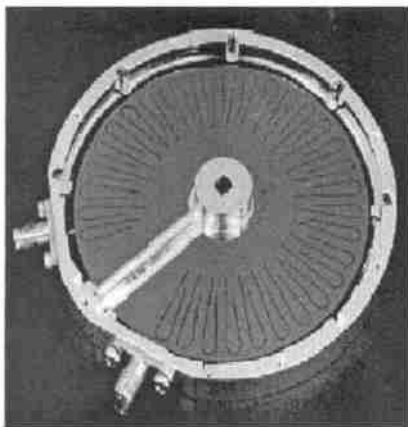


图 11 日本 Cryodevice 公司研制的超导滤波器及其特性曲线(引自文献[8])

日本是一个很重视应用研究的国家. 早在 1994 年 3 月, 日本邮政省就出面组织, 由日本基础技术研究促进中心和两家私营公司 (DENSO, ALPS) 共同投资, 成立了移动通信先进技术研究 (AMTEL), 专门进行高温超导子系统的研究. 希望通过引入高温超导器件, 改善基站对信号的选择性, 提高频率资源的使用率, 改善信号传输质量, 以适应第三代移动通信

技术要求. 为此, 他们从 1994 年到 2000 年总共投入资金 28.6 亿日元, 取得了不俗的成绩. 1999 年 4 月, 研究所又成功地实现了转制, 由 DENSO 和 ALPS 两家公司出资 3 亿日元, 原班人马组成了一个新的商业公司 (Cryodevice Inc.), 为高温超导移动通信子系统的商业运作与开发注入了新的活力. 图 11 是该公司研制的一种 32 阶高温超导滤波器和其特性曲线^[8]. 该所的另一项有特色的成果是研制一种绝热电缆, 解决了子系统内低损耗传送微波信号与良好绝热性能要求的矛盾. 与美国、欧洲不同, 日本的子系统使用小型脉冲管制冷机. 该脉冲管制冷机在输入功率 140W 时, 在 70K 下制冷量达 3W, 据称寿命为 5 万小时, 显示出优异的性能 (见图 12).

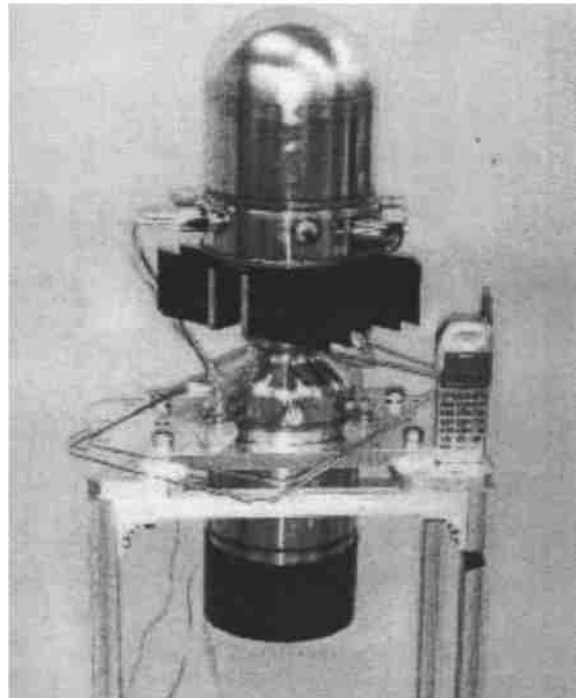


图 12 日本研制的使用小型脉冲管制冷机的超导子系统

表 2 国际知名超导微波技术专业公司概况

公司名称	国家	始建时间	雇员*	产品型号	销售总额*
STI	美国	1987 年	150 人	SuperFilter [®]	400 台
ILSC	美国	1989 年	40 人	ATP TM Classic	300 台
Conductus	美国	1987 年	100 人	ClearSite [®]	100 台
Du Pont	美国	—	30 人	样机	—
Cryoelectra	德国	1999 年	23 人	样机	—
Cryodevice	日本	1999 年	22 人	样机	—
CryoSystems	英国	1999 年	10 人	样机	—

* 统计数据截止至 2000 年 9 月, 据 2001 年 9 月估计, 全美国超导移动通信子系统销售总量达到 2000 台左右.

表 2 列出了国际知名高温超导微波技术专业公司概况^[9]. 目前, 一批大公司 (如日本 NEC、东芝、

Matsuhita、韩国 LG 公司等)也看好超导移动通信市场,纷纷投资开展相关研究或组建新的超导公司.我国台湾地区也有一些研究机构或商业公司在进行这方面的研究与开发.特别需要指出的是,很多公司已把目光投向中国市场,意欲在这个世界最大、发展最快的移动通信市场上一展鸿图.

4 抓住发展我国超导移动通信事业的机遇

我国已发育成世界上最大的移动电信市场,但是国产移动电信设备的生产技术长期处于落后状态.至 1997 年底,国内共有移动通信设备制造厂约 50 家,其中合资企业约 15 家,这些厂家全部以组装进口器件为主.1998 年底,我国首套 M30-G 数字蜂窝交换系统通过了部级生产定型鉴定.2000 年底,我国自主研制的移动通信基站群组投入事业运行.这些成就为改变我国移动通信基站设备长期依赖进口的局面创造了一个良好的开端.然而,当前国内移动通信基站的市场依然是国外大公司的天下.相比之下,高温超导移动通信子系统虽属高技术,但却是一种处在成长阶段的技术.国外的超导公司或者在忙于打开本国市场,或者还处在研究开发阶段.中国的电信市场虽大,这些公司还没有顾得上占有它.此时也正是发展中国自己的超导移动通信子系统的大好商机,我们应当及时抓住它.

我国的高温超导研究工作是与先进工业国同时起步的,一些早期研究成果还曾处在国际先进行列之中.近几年来,由于经费支持不足和认识不统一,国内的超导微波应用研究与国外开始呈现差距.但只要条件有所改善,靠自身努力是可以迎头赶上的.以笔者所在的中国科学院物理研究所低温电子学教研组为例,早在 1996 年我们就开展了超导微波子系统的研究,曾成功地进行了高温超导微波器件和脉冲管制冷机相互耦合的实验.有关成果曾多次在有关超导国际会议上报告^[10].此后,我们又开展了雷达接收机前端宽带超导滤波器的研究.2000 年 8 月,我们研制成功高温超导低相噪声振荡器,其相位噪声达到国际最好水平^[11].振荡器是雷达和各种通信设备(包括移动电话基站)的关键部件.衡量振荡器质量优劣的主要指标之一是它的相位噪声.经国家计量部门检测,我们所研制的高温超导低相噪声振荡器,振荡频率为 5.624GHz,在偏离中心频率 10kHz 处,相位噪声为 -134dBc/Hz.而文献报道的世界最好的数据是在 -125dBc/Hz 到 -135dBc/Hz.研

究组通过与英国伯明翰大学的国际合作,于 2000 年研制成功我国第一个用于移动通信基站的超导滤波器,2001 年又研制成功我国第一台高温超导移动通信基站子系统原理性样机.该样机是以我国目前普遍使用的 GSM 1800 移动通信系统为应用背景,由一个高温超导滤波器、一个低噪声放大器 and 一台微型脉冲管制冷机(由中国科学院理化技术研究所低温中心研制)组成.图 13 给出了我国第一个用于移动通信基站的超导滤波器和第一台高温超导移动通信子系统原理性样机的特性曲线.2001 年 6 月,我们在大阪召开的第八届超导电子学国际会议上报告了相关实验研究成果,受到与会者的关注^[12].在这次会议上,以高温超导移动通信为主题的报告共有四个,分别为德国的 Cryoelectra 公司、美国的 STI 公司、日本的 Cryodevice 公司和中国科学院物理研究所.这表明,在这一领域我们仍有自己的特色,我们与世界先进水平的差距并不太远.

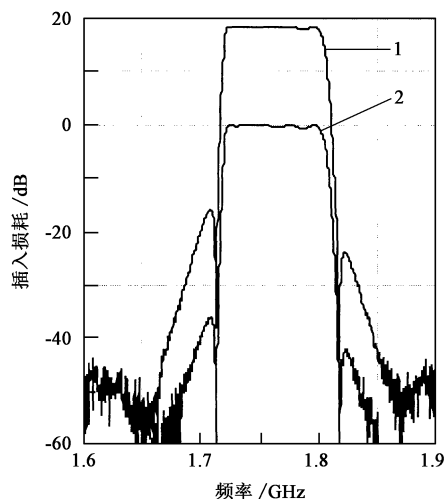


图 13

(1. 我国首台高温超导移动通信基站子系统原理性样机的频率响应曲线;2. 其中的高温超导滤波器的频率响应曲线)

从 20 世纪 80 年代中期高温超导体的发现起,到 90 年代中期高温超导微波子系统样机的出现,再到高温超导移动通信基站子系统商业产品进入市场,这一个历史过程使我们清楚地看到了基础研究的成果是怎样一步步转化为高技术,又怎样一步步发展成为商业产品,最终进入市场的生动情景.我国在高温超导基础研究方面曾经一度走在世界前列,如果不重视基础研究成果向高技术的转化,不重视高技术向产业化发展,到头来不仅技术上不去,市场仍归别人所有.今天中国的经济在高速发展,中国的

科学技术研究必须跟上去。就高温超导移动通信基站子系统而言,只要我们认真组织力量,加大研究开发的投入,改变科研体制,面向国内外市场,我们完全有可能跟上先进国家步伐,抓住高温超导科学技术发展带来的商机,在高温超导微波子系统产业化方面作出成绩。

参 考 文 献

- [1] <http://www.ILSC.com>, 或 <http://www.isconintl.com>
- [2] Inam A, Wu X D *et al.* SPIE, 1989, 87, 2; Appl. Phys. Lett., 1990, 56, 1178
- [3] <http://www.conductus.com>
- [4] <http://www.suptech.com>: STI Annual Report (1999)
- [5] Greed R B, Voyce D C, Jedanzik D *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 1999, 9, 4002
- [6] Hong J S, Lancaster M J, Greed R B *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 1999, 9, 3893
- [7] Chaloupka H J. 8th International Superconductive Electronics Conference Extended Abstracts, 2001, 6
- [8] Genichi Tsuzuki, Masanobu Suzuki, Nobuyoshi Sakakibara. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 2000, 48, 2519
- [9] Willemssen B A. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2001, 11, 60

- [10] Li H, Zhou Y, He Y S *et al.* Physica C, 1997, 282-287, 2527; IEEE Trans. Appl. Supercond., 1999, 9, 3569
- [11] 黎红, 龚忠麟, 何豫生等. 科学通报, 2001, 46, 2016 [Li H, Gong Z L, He Y S *et al.* Chinese Science Bulletin, 2001, 46, 2016 (in Chinese)]
- [12] Li H, He Y S, He A S *et al.* 8th International Superconductive Electronics Conference Extended Abstracts, 2001, 89



作者简介

何豫生, 男, 1969 年北京大学物理系本科毕业, 1984 年获英国 Sussex 大学博士学位, 现任中国科学院物理所研究员, 博士生导师。

20 世纪 80 年代以来曾从事窄禁带半导体电子结构、高温超导体晶格不稳定性、高温超导体波函数对称性和顺磁迈斯纳效应等研究, 并开展了有关高温超导天线、滤波器等微波器件和微波子系统的研制工作, 先后在 Nature, Phys. Rev., IEEE 等刊物发表论文 130 多篇。

·物理新闻·

噪声与冰河时代的周期(Random Noise and An Ice-Age Roller Coaster)

在一定条件下, 无规噪声如同静电力一样可以获得周期性放大, 而放大后的信号能对其周围环境产生一系列的影响, 这种现象称为随机共振(stochastic resonance, 简称为 SR)。科学家们在多种混沌激光器和人体的反馈系统中观察到这种现象。

在 1982 年, 大气科学家们想利用“随机共振”来解释冰河时代气候中偶然性事件的生成, 这类偶然性事件能促使气候形成一种规则的重复性行为, 其周期约为十万年。后来有一些证据并不支持这个想法。

最近德国 Potsdam 研究所的 A. Ganopolski 和 S. Rahmstorf 教授在一个“气候急剧滞止研究(climate impact research)”的项目中发现随机共振是可以触发 D/O(dansgaard-oeschreer)偶然性事件的, 所谓的 D/O 事件是指发生在最近一次冰河期内的突然和奇迹性的气候转变, 它发生和延续的时间距今约为十二万年到一万年之间。事件开始时, 北大西洋地区在十年内气温突然升高 10°C 以上, 而时间延续了约一个世纪。通常 D/O 事件发生的时间间隔约为 1500 年, 但有时它的节拍会发生错乱, 常常会奇怪地延后 3000 年或 4500 年左右。从这点出发, 科学家们认为这可能是由于太阳强度的涨落而引发的一种周期效应。他们利用全球气候计算模型进行模拟计算后发现, 在冰河时代北大西洋地区的潮流存在着两种状态, 一种是水温只加热到中纬度的海湾河流处, 而另一种状态可以将水温的加热延伸到更北的区域; 而潮流经常会在这两种状态中不断地来回跳动。科学家们相信这类气候交替转换的振动会对 D/O 偶然事件的 1500 年循环周期发生影响, 这种振动的产生来源于周围环境噪声的放大效应, 也就是随机共振效应的结果。所谓的环境噪声一般包含该地区每年不确定的降雨量和流入北欧海域的冰雪融水量等。

至今为止, 有关冰河时代规则周期形成的正确原因还不是很清楚, 但以随机共振理论为基础的一些推论将有助于对 D/O 偶然性事件发生规律的了解, 如果这种机理能得到确认, 那么, 人类将对冰河时代气候的反常行为有更深入的认识, 要知道过去的十万年是我们人类文明得到繁荣发展的光辉时期。

(云中客摘自 Phys. Rev. Lett., 21 January 2002)