

HT_cSQUID 低频通信接收机和穿墙通信接收实验*

郑鹏 刘政豪 魏玉科 张辰 张炎 王越 马平†

(北京大学应用超导研究中心, 北京大学介观物理和人工微结构国家重点实验室, 北京大学物理学院, 北京 100871)

(2014年4月18日收到; 2014年5月14日收到修改稿)

试验了一种能够在含水的岩层、土壤甚至海水中建立起无线通信的系统和方法. 该系统的关键部件, 高灵敏接收前端和接收机使用的是商品级高温超导量子干涉仪 (high critical temperature superconducting quantum interference device, HT_cSQUID) 磁强计和商用高速、高精度数据采集处理系统. 目前在从 30 Hz 到 100 kHz 频段内, 商品级 HT_cSQUID 磁强计可以提供优于 100 fT/Hz^{1/2} 的内秉磁场噪声谱密度, 同时商用数据采集处理系统可通过软件实现对传输信息的调制、采集、解调和分析. 利用低频电磁波在导电介质中有较大穿透深度以及 HT_cSQUID 磁强计低频磁场灵敏度高、体积小特点, 对于一种能在地下 (岩石和土壤) 和海水 (海水) 环境中使用的可移动式低频无线电通讯系统实现的可行性, 进行了初步讨论. 使用面积等于 1 m² 的方形线圈作为测试信号的辐射体 (发射天线), 将 SQUID 磁强计的传感器封闭在一个能对超低频测试信号提供较大衰减的电磁屏蔽体中, 成功地接收到了发射线圈辐射的 99 Hz 调幅信号. 因此证明, 采用 HT_cSQUID 技术, 可以在地面与数百米深的地下建立起有实用价值的无线电通信.

关键词: HT_cSQUID 磁强计, 低频电磁波, 低频无线电通讯

PACS: 85.25.Dq, 41.20.Jb, 07.57.Kp

DOI: 10.7498/aps.63.198501

1 引言

电子管、晶体管、超大规模集成电路技术的发明, 使得借助自由空间电磁波传播特性建立起来的无线电技术 (通信和测控) 成为现代社会的基本组成部分. 今天, 无线电电子学在科研、商业、军事和个人生活中都有着广泛的应用. 其物理基础是电磁波极高的传播速度, 及其在大气介质中的极低传输损耗和不同介质表面的反射、折射和透射能力. 无线电系统中, 不同频率的电磁波有着不同的传输特性, 使得他们有着不同的应用价值. 在无线电频谱低端的电磁波对有耗介质 (岩石、土壤和海水) 有很大的穿透深度, 因此被认为是能够在地下和海水中建立无线通信的电磁媒介. 但是由于低频电磁波的波长很长, 相应的天线效率的低下导致在这些频率上电磁能量的辐射很困难, 加上随频率降低而增加的大气噪声和人为干扰, 以及低频段上灵敏检测元

件和技术的缺乏, 使得本应有许多可能应用的低频电磁波一直没有获得有效开发. 以至于在无线电通信技术高度发达的今天, 人类仍然没能利用低频电磁波在导电介质中有较大穿透深度的特点建立起有效的低频无线电系统.

随着人类社会和文明的进步, 地壳浅层资源被大量开发, 使用低频无线电技术探寻更深层地质矿藏的要求日益迫切. 相应的, 地下、水下和楼宇间的无线电通信也越来越重要. 因为由大气岩石、土壤、海水和钢筋混凝土建筑物构成的信号通路具有远高于大气的电导率, 因此只能使用具有较大穿透深度的低频电磁波来建立无线电通讯. 有鉴于此, 在过去的一二十年间, 低频电磁波的理论和应用研究出现了一些增长, 沉寂了很长一段时间的无线电系统研究和应用开发又重新成为传统无线电技术研究的新热点. 低频电磁波技术的一个重要基础就是高灵敏度检测能力. SQUID 具有极高的灵

* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (批准号: 2011CBA00106) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: maping@pku.edu.cn

敏度和良好的低频工作特性,在无线电频谱低端具有最好的综合性能.因此被认为在无线电频谱低端的开发和应用研究上具有很高的技术价值和发展潜力.

但是,由于传统低温超导材料的极低工作温度要求,真正在无线电通信领域采用SQUID技术的成功应用并不多见.与目前爆发式增长的个人移动通信研究和应用相比,基于SQUID的低频无线电技术的应用开发仍然属于进展缓慢的技术领域.例如从1974年Wolf等^[1]首次提出将低温SQUID磁强计用于水下收信的设想起,直到1977年才由Davis等^[2]在Wolf等的研究基础上开发出一个拖曳式squid低频无线电通信实验样机.

1986年高温超导材料发现后^[3,4],特别是高温超导晶界约瑟夫森结技术的开发成功,不但为超低频/极低频无线电频谱的开发和应用提供了新的可能,并且也使基于HT_cSQUID技术的低频无线电通信系统的研制和通信研究状况得到了极大改变.1997年,Reagor等^[5]开发成功了基于HT_cSQUID磁强计的超导低频接收前端,并且在楼宇环境中实现了载频3 kHz、速率0.1 bps的低误码率通信.2004年,Vasquez等^[6]又开发成功用于地下通信的HT_cSQUID超导低频接收机,并且实现了在100 m岩层距离间语音信号的传输.

由于我国的高温超导研究在国际上的地位和发展优势,我国在上世纪90年代中期就开展了针对HT_cSQUID技术的超低频/极低频无线电技术应用研究^[7].基于HT_cSQUID技术,开发成功的超导地球物理探测系统不仅保持了超导仪器探测精度和分辨率高的优点,还由于液氮温区制冷技术比较容易实现,使得仪器系统能够满足野外应用对仪器的重量和体积上的要求,并且已经在深部矿藏勘探的应用中进行了推广试验.基于HT_cSQUID技术,开发成功的HT_cSQUID心磁图仪不但能像低临界温度SQUID心磁图那样检测出极其微弱的心动磁场,更由于液氮温区制冷技术极大地降低了其运行成本和操作上的困难,使得心磁图检查的花费和运行维护费用容易被患者和医院接受.目前,我国的HT_cSQUID心磁图仪已经在医院中开始了临床应用研究.但在低频无线电通信这个我国急需的技术领域,被认为有重要意义的研究仍然比较少.

由于对灵敏度和可移动性的特殊要求,在低频透地通信、深部地球物理研究、地质勘探、海洋和深

空探测等技术领域中,有实用价值的极低频、超低频无线电系统的建立,其关键技术是天线.由于互易原理,无线电系统的发射天线和接收天线有相同的工作原理和工作状态.但对于工作频率极低的无线电通信系统的设计和实现来说,发射天线和接收天线的设计有着极为不同的要求.低频发射天线的主要设计要求是如何在所需的接收位置产生最大的可能场强,设计追求的是高效率和高增益.而接收端的设计通常以获得最大信噪比为目标.在水下、地下和外太空这些大气噪声和人为电磁干扰可以忽略的特殊接收环境中,接收机的噪声成为影响信噪比的主要因素.因此在这些环境中使用的低频通信系统设计中,更重要的是降低接收机的内秉噪声.

HT_cSQUID磁强计在极低频/超低频段具有很低的本征磁场噪声,所需的支持技术成本低且成熟,因此被认为是一个有发展潜力的新技术.使用高温超导材料和晶界约瑟夫森结技术发展起来的射频HT_cSQUID磁强计能够满足这类应用的基本要求,不但在几十赫兹到几百赫兹的频段内具有优于100 fT/Hz^{1/2}的本征噪声功率谱密度,而且使用液氮作为制冷剂这一特点,则可以满足设备的移动性要求.

本文给出了一种可以用于地下或者穿墙通信的低频移动通信系统.这个低频通信系统的关键部件是国产商用射频HT_cSQUID磁强计和市售高精度数据采集处理系统.系统工作带宽由HT_cSQUID磁强计的频率响应带宽决定.

低频通信实验系统由一个面积等于1 m²的正方形线圈、小型极低频/超低频发射机、XY-2型HT_cSQUID磁强计、NI PXI采集卡和计算机、杜瓦容器、一间由铁板和硅钢片建造的简易磁屏蔽室和套在其内部的简易电屏蔽室、几个高磁导率坡莫合金磁屏蔽筒等部件组成.其中方形线圈是测试信号辐射器,HT_cSQUID磁强计是低频接收系统的接收天线,接收机是NI PXI 24位数据采集系统.将SQUID磁强计的传感器封闭在一个由简易磁屏蔽室、简易电屏蔽室和坡莫合金磁屏蔽筒组成,能对超低频测试信号提供较大衰减的电磁屏蔽体中,成功地接收到2 A左右工作电流的发射线圈给出的99 Hz调幅信号.由于实验使用的工作频率是99 Hz,这个频率的电磁波对电导率在几个西门子量级上的高导海水也有高达几十米的穿透深度.

而对那些电导率较小的岩石和土壤, 电磁波的穿透深度则可高达数千米, 从而证明 HT_cSQUID 技术在低频无线电通信领域中的应用潜力.

2 基于 HT_cSQUID 技术的低频无线通信系统

低频透地无线电通信系统极为特殊的运行环境给这种系统特别是可移动系统的设计和实现造成了很大困难. 由于岩石、土壤和海水对高频电磁波的极大传输衰减, 使得这类系统只能使用穿透深度较大的低频电磁波. 低频电磁波极长的波长不但造成低频天线的效率极低, 也给可移动性的实现造成很大困难. 同时, 在信息传输通道高衰减、高噪声的限制下, 设计要求使用小型接收天线的条件下, 通信系统设计还要保证接收天线效率和接收机的灵敏度. HT_cSQUID 磁强计的 SQUID 探头具有很小的几何尺寸, 在几十赫兹到几十千赫兹频带内具有 100 fT/Hz^{1/2} 量级的磁场噪声谱密度. 是目前同时满足上述条件的唯一技术.

2.1 低频无线电波在固体和液体介质中的传输特性

导电介质中的无线电技术主要受限于电磁波在介质中的穿透能力. 表征这个能力的物理量是穿

透深度 δ . 穿透深度具有长度量纲, 等于介质中传播的无线电波幅度衰减到初始值的 $1/e$ 倍时的传播距离

$$\delta = 1/\sqrt{\pi\mu_0 f\sigma}, \quad (1)$$

式中 σ 是介质的电导率, μ_0 是真空的磁导率, f 是以赫兹为单位的频率. 含有水分和导电矿物质的土壤、岩石具有极为不同的电导率. 大地介质中, 电导率会对其中传输的电磁波造成极大的能量衰减, 在岩层中影响电导率的因素包括含水量、温度、及矿物组成成分等. 由于大多数土壤和岩石都不包含铁磁性物质, 因此计算中可以使用真空中磁导率

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}. \quad (2)$$

因此穿透深度与频率和介质电导率乘积的平方成反比. 电磁波的频率越低, 传导介质的电导率越低, 其穿透深度就越大. 例如对于 3 Hz 至 30 kHz 频段内的电磁波, 其穿透深度 δ 视传导介质的电导率 σ 的不同, 可以在几米到几十千米甚至上百千米之间变化. 无线电频谱低端的电磁波对于地壳表层物质 (土壤、岩石和海水) 具有较大的穿透深度. 这个结果的实际重要性在于, 可以在不同介质中建立起合适的无线电信息传输通道. 实际上正是这个较大的穿透深度构成了许多低频无线电应用的物理基础. 表 1 给出了几个典型地表物质的穿透深度.

表 1 不同频率电磁波在不同导电介质中的穿透深度 (单位: km)

不同介质的电导率 $\sigma/(s/m)$	电磁波频率 f/Hz						
	300	200	100	75	45	30	3
(岩石) 2×10^{-4}	2.06	2.52	3.56	4.11	5.31	6.50	20.55
(沙地) 1×10^{-3}	0.92	1.13	1.59	1.84	2.37	2.91	9.19
(土壤) 2×10^{-3}	0.65	0.80	1.13	1.30	1.68	2.05	6.50

可以看到, 频率低于几百赫兹的电磁波在岩层中的穿透深度可达上千米, 在沙地和土壤中也有几百米至几千米的穿透深度. 另一方面, 根据平面电磁波在导电介质中的传播衰减公式

$$\alpha = 0.0173\sqrt{f \cdot \sigma} \text{ dB/m}, \quad (3)$$

式中 σ 是介质电导率, 单位是 s/m ; f 是频率, 单位是 Hz . 于是对于 $\sigma=2 \times 10^{-3} s/m$ 的土壤:

$$\alpha_{\text{土壤}} = 0.000774\sqrt{f} \text{ dB/m}. \quad (4)$$

表 2 是几个典型频率下平面电磁波在土壤中的衰减率、衰减 30 dB 时的传输深度和传输 1 km 后衰减的倍数.

可以看到, 频率等于 300 Hz 的低频电磁波在土壤中传播衰减达到 30 dB 时的传播距离可以达到 2339 m, 传播 1000 m 只有不到 5 倍的衰减. 因此对于陆地上的多数介质, 都可在此频率下实现较远距离的无线通讯.

表2 不同频率的平面电磁波在土壤中的传输状况 ($\sigma=2 \times 10^{-3} \text{s/m}$)

土壤 $\sigma = 2 \times 10^{-3} \text{ s/m}$	电磁波频率 f/Hz				
	300	100	75	30	3
$\alpha/(\text{dB/m})$	0.0134	0.00774	0.00670	0.00424	0.00134
衰减 30 dB 传输距离/m	2339	3876	4478	7075	22388
行进 1000 m 衰减倍数	4.68	2.44	2.163	1.63	1.167

2.2 噪声和干扰环境

HT_c SQUID 低频通信接收试验需要接收并处理具有一定带宽的微弱信号功率. 通常这个最小可处理信号功率由接收位置的外部噪声和 HT_c SQUID 磁强计的内部噪声电平共同决定, 这个电平也被称之为接收系统的灵敏度. 它是外部噪声的函数.

HT_c SQUID 低频通信系统设计和接收实验需要考虑系统工作和实验的电磁环境, 因为系统和实验场地的电磁环境对仪器的工作性能和实验结果影响很大. 由于目前地球空间电磁环境越来越复杂, 许多生产, 生活和科研活动实际上已经很难回避各种电磁干扰的影响. 例如我们的许多测量就显示, HT_c SQUID 磁强计噪声指标的测定受电磁环境影响很大. 不同测试地点, 或者相同测试地点但不同测试时间的测量结果可以有很大的差异. 原因是不同的测试有着极为不同的电磁环境.

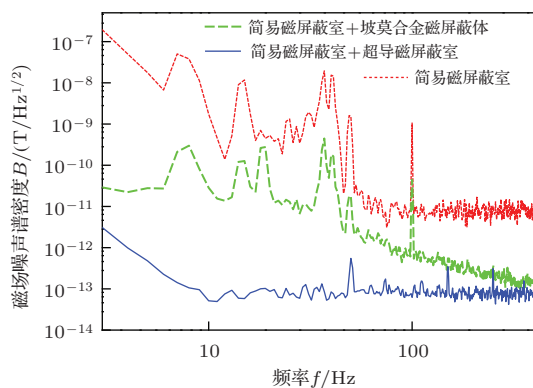


图1 (网刊彩色) 三种不同屏蔽环境下的背景磁场噪声频谱

另一方面, 由于 SQUID 对直流磁场和频率很高的磁场都有敏感响应, 因此基于 HT_c SQUID 磁强计技术的极低频/超低频透地通信系统的设计和实验需要考虑至低频段上(在我国, 至低频段频率的范围是 0.03—3 Hz)的电磁噪声和干扰的影响. 尽管对一些应用而言低频干扰可以忽略, 但在已经建成庞大地铁系统的北京地区, 环境中很强的至低频

干扰磁场是一个必须考虑的重要因素^[8].

图 1 给出了在简易磁屏蔽室、简易磁屏蔽室加坡莫合金磁屏蔽体、简易磁屏蔽室加超导磁屏蔽室三种测量环境下的背景磁场噪声频谱分布. 测量使用的是用于研制低频通信实验系统的商用 XY-2 型 HT_c SQUID 磁强计并且测量时间是在白天. 图中红色曲线的测量环境是简易磁屏蔽室, 绿色曲线的测量环境是简易磁屏蔽室加坡莫合金磁屏蔽筒, 而蓝色曲线的测量环境是简易磁屏蔽室加超导屏蔽筒. 由于超导屏蔽体具有非常高的直流磁场屏蔽能力, 因此蓝色曲线的白噪声基线反映的是这台 SQUID 磁强计的本征噪声特性. 这个磁场噪声指标被作为我们实验系统的主要设计依据. 绿色曲线中 300 Hz 以下随频率逐渐降低的噪声特性反映了简易磁屏蔽室加坡莫合金屏蔽筒内部的噪声背景. 红色曲线高达 200 nT 的至低频磁场噪声来源于简易磁屏蔽室附近的地铁运行漏电流产生的低频磁场. 由于用于这个实验的 SQUID 磁强计具有约等于 $\Phi_0/3$ nT (Φ_0 表示一个磁通量子) 的磁通/磁场转换系数和 100 mV/ Φ_0 的电压/磁通转换系数, 因此面对幅度变化高达 200 nT 的地铁运行磁场, 使置于简易磁屏蔽室中的 SQUID 磁强计在地铁运行的白天会有几伏特的输出摆动. 由于目前我们希望能在实验室环境中开展相关的测试和研究, 因此在白天只能使用简易磁屏蔽室加坡莫合金磁屏蔽体组合形成的实验测试环境. 但由于这种组合的屏蔽体具有较大衰减系数, 白天我们实验室的电磁环境噪声又是如此之大, 以至于为了得到可以确认的测试信号, 在简易磁屏蔽室加坡莫合金磁屏蔽筒组合这样的测试环境中, 发射系统所能提供的最大可能辐射功率并不总能满足实验要求. 因为我们测试环境中不同频率的电磁干扰在一天中的不同时段有很大的变化. 300 Hz 以上, HT_c SQUID 磁强计在白天与夜晚给出的噪声谱密度测量值几乎相同. 但 100 Hz 以下, 在简易磁屏蔽室和简易磁屏蔽室加坡莫合金磁屏蔽筒中测量的噪声不但要比 SQUID 的

本征噪声高好几个数量级, 它们之间也有很大的不同. 因此, 要想在我们实验室的电磁环境中开展基于 HT_cSQUID 磁强计性能技术的低频透地通信实验, 必须避开地铁运行产生的较大低频干扰. 实际上, 我们的通信实验和相关性能测试通常被安排在地铁完全停止运行以后的深夜.

2.3 HT_cSQUID 通信接收实验系统

和所有的无线电通信接收机一样, 基于 SQUID 技术研制的低频无线电通信系统也由天线和接收机这两部分组成. HT_cSQUID 低频通信实验系统中的 SQUID 磁强计置于接收系统前端, 目的是利用 SQUID 磁强计的极高磁场灵敏度优势来提高低频无线电接收系统的灵敏度. 从接收系统的角度看, 在这个实验系统中的 SQUID 磁强计起着接收天线的作用. 图 2 给出了系统的原理框图.

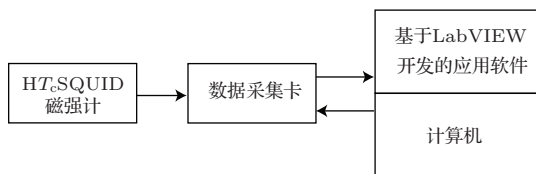


图 2 SQUID 低频通信接收实验样机原理框图

图 2 中的 HT_cSQUID 磁强计是北京西燕超导量子技术公司生产的 XY-1 型射频 HT_cSQUID 磁强计. 典型磁场白噪声的谱密度优于 100 fT/Hz^{1/2}.

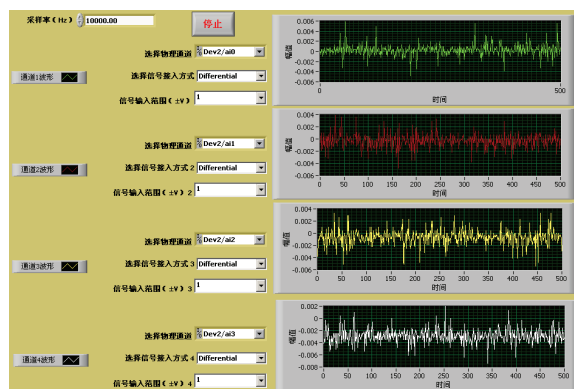


图 3 数据采集系统面板

实验系统的低频接收机采用虚拟仪器技术实现. 所用硬件是普通商用 NI 公司的 PXI-1000B 平台和 NI PXI4462 24 位数据采集卡. 应用软件是 LabVIEW. NI PXI 4462 数据采集卡有 4 个输入端, 24 bit 分辨率. 4 通道同时工作时每个采集通道可以有 204.8 kS/s 的采样率. 输入范围: ± 0.316 V;

±1.00 V; ±3.16 V; ±10 V; ±31.6 V 和 ±42.4 V. 利用 LabVIEW 软件编制的采集系统控制面板示于图 4. 测试实验时, HT_cSQUID 磁强计的输出直接与计算机控制的数据采卡输入端相连, HT_cSQUID 天线给出的模拟信号在这里被转换成数字信号后送入计算机, 再调用计算机中基于 LabVIEW 开发的各种软件完成包括滤波, 波形显示, 频谱分析, 解调等功能.

2.4 信号环境

对于我们的这项工作, 首先需要通过人工方法为基于 HT_cSQUID 技术的低频通信接收实验提供合适的信号环境, 以满足实验和性能测试对信号的要求. 考虑到长波长电磁波接收天线的特点, 同时兼顾接收端的可移动性, 实验频段上辐射电阻小, 辐射效率低的发射天线选择和设计需要我们认真对待.

考虑到 HT_cSQUID 低频通信接收试验场地的限制和未来该系统在透地通信中应用的要求, 我们为实验测试系统配置了一台体积小、重量轻、易于架设和使用的低频测试信号辐射系统. 图 4 给出了由发射机, 方形线圈, 磁屏蔽室、磁屏蔽筒, SQUID 磁强计和数字接收机组成的实验系统方框图.

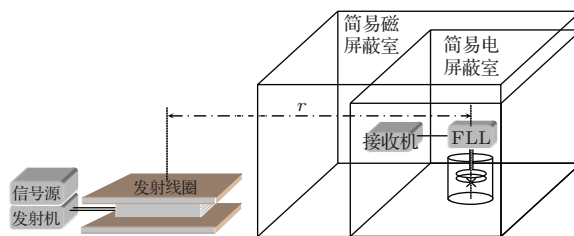


图 4 发射端与接收端示意图

图中的小型超低频发射机是一台蓄电池供电, 24 V 电压下最大可输出 3 A 电流, 36 V 电压下最大输出电流 5 A 的小型 CSAMT 发射机 (发射电流的大小主要受限于天线的铜电阻和线路上的限流电阻). 外接信号源可以发射 0.03 Hz 到 1 MHz 的方波、正弦波和调幅波. 发射天线用直径等于 2 mm 的绝缘铜线绕制在一个木制, 边长等于 1 m 的方形线圈骨架上, 匝数是 27. 实验测试中, 线圈平面与地面平行, 并被放置在磁屏蔽室外的走廊里. 在我们实验室环境限制下, 线圈中心与 SQUID 传感器中心的距离 r 可以在 5 至 50 m 之间变化.

在极低频和超低频段 (3—300 Hz), 因为向地下传播的平面电磁波有长达几百米到几十千米的穿透深度, 为了在实验室营造出—个可以为基于 HT_cSQUID 技术的超低频通信研究和系统性能测试提供具有合适大小的信号环境和比较接近某些真实使用环境的噪声环境, 实验系统采用图 4 所示的配置和安排. 由于 SQUID 传感器本质上具有覆盖直流到甚高频电磁辐射的极宽频率响应并且极端灵敏, 为了避免城市环境中的电磁辐射对 SQUID 正常工作造成干扰, HT_cSQUID 磁强计和高精度数据采集系统组成的低频通信接收机分别用简易磁屏蔽室、简易电屏蔽室和坡莫合金屏蔽筒组成的屏蔽体进行了屏蔽和隔离. 其中, 作为信号能量敏感检测部件 (天线) 的 SQUID 传感器在附近电磁环境干扰较大的白天必须使用包括坡莫合金屏蔽筒在内的复合屏蔽体. SQUID 磁强计的关键部件磁通锁定环路 (flux locked loop, FLL) 则被放置在坡莫合金屏蔽筒的顶部以避免环境噪声通过磁通锁定电路进入到 SQUID 探头和后续电路系统中. 为了避免商用数字式仪器的电磁泄露对非常灵敏的 SQUID 磁强计噪声性能的影响, HT_cSQUID 低频通信实验系统的数字式接收机和计算机则被放置在简易磁屏蔽室和简易电屏蔽室之间的一个很小的空间内.

根据商品 HT_cSQUID 磁强计的噪声指标, 实验测试系统配置了可移动的小型超低频环形天线和发射机的额定输出电流, 通过简易磁屏蔽室、简易电屏蔽室、金属屏蔽筒, 单层或多层 (最多五层) 坡莫合金磁屏蔽筒和超导屏蔽筒的恰当组合, 可以对频率从 30 Hz 至 30 kHz 的测试信号提供多种衰减系数. 因此这个实验测试系统不但可以用于 HT_cSQUID 磁强计噪声性能与环境关系的研究, 还可以在实验室内开展一定深度透地通信模拟实验研究. 值得指出的是, 由于我们实验室周边电磁环境非常复杂, 以至于在简易磁屏蔽室和简易电屏蔽室内这个较大空间中仍然存在幅度很高的干扰和噪声, 如果仅对 SQUID 传感器进行适当的干扰屏蔽, 这个复合磁屏蔽系统还能作为与某些实际噪声环境接近的透地通信实验模拟场地.

3 模拟透地通信实验结果和讨论

在我们建立的模拟透地通信实验系统中对研制的小型、可移动极低频/超低频 HT_cSQUID 透地

通信系统进行了实验测试. 实验目的是通过模拟实验测量验证 HT_cSQUID 技术在超低频透地通信中应用的可能性和优越性. 同时通过测量, 研究低频信号传输距离、环境噪声和干扰对 HT_cSQUID 的微弱信号接收能力和低噪声工作性能影响的原因、方式和途径. 接收深度的确定采用衰减控制方法, 即固定发射电流, 将同一 HT_cSQUID 磁强计置于不同层数的屏蔽体中测量其输出功率的变化.

在模拟极低频/超低频 HT_cSQUID 透地通信实验的测试中, 影响超低频透地通信深度和通信质量的主要因素是相对于测试实验期间的测试信号强度. 由于我们实验室的电磁环境很差, 而 HT_cSQUID 接收机低频响应好、灵敏度高, 但仪器限定的最大输入磁通变化范围只有 $100\Phi_0$, 对应的输入磁感应强度变化范围是 ± 300 nT. 对于这个特定的模拟实验系统, 测试信号强度、实验测试时间和屏蔽系数值的设置将是影响 HT_cSQUID 磁强计技术低频透地通信系统性能的主要因素, 我们实验场地附近地铁运行低频磁场干扰的不可控制性将是影响实验测试的主要问题.

实验测试使用的测试信号是载频 99 Hz, 调制频率 3 Hz, 调制深度 100% 的正弦调幅波. 该调幅波由函数发生器产生. 发射电流等于 2 A, 方形环天线中心与 SQUID 传感器间隔 10 m, 经由低频发射机方形环天线发射并通过屏蔽体的衰减到达 SQUID 传感器的检测平面.

对于理想正方形线圈, 中心轴线上的磁感强度大小为^[9]

$$B = \frac{n\mu_0 I a^2}{2\pi(r^2 + a^2/4)\sqrt{r^2 + a^2/2}}, \quad (5)$$

其中 a 为线圈边长, n 是线圈匝数, I 为电流大小, μ_0 是真空中磁导率, r 是中心轴线上距离正方形线圈中心的距离. 由 (5) 式, 可以得到无电磁屏蔽衰减时 $I = 2$ A, $a = 1$ m, $n = 27$, $r = 10$ m 处的磁感强度大小为 1.075×10^{-8} T.

图 5 是在上述模拟测量系统中, 用同一台 HT_cSQUID 超低频接收机分别在两个不同的测量时间对具有相同频率, 波形和发射电流的同一测试信号进行接收记录的典型结果. 测量环境都是简易磁屏蔽室加一层坡莫合金磁屏蔽筒. 图中蓝色曲线的接收记录时间是白天. 红色曲线的接收记录时间是在半夜 1 点以后. 由于实验室附近地铁运行不可避免地存在很大的漏电流, 因此甚至在一个相对安

静的时段内, 25 s 记录时间中 SQUID 接收机输出也有近 $8\Phi_0$ 的至低频磁通量子波动(该 SQUID 磁强计标定的电压/磁通转换系数约为 $100 \text{ mV}/\Phi_0$).

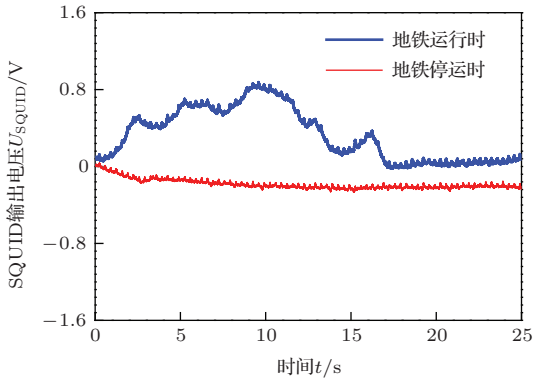


图5 (网刊色彩) 相同测量环境不同时间段对调幅测试信号的测量结果

地铁停运后, HT_cSQUID 超低频接收机记录的时序信号中至低频摆动消失. 事实上, 只要复合屏蔽体外界电磁干扰不大, 特别是在每天地铁停运以后, 这种低频干扰幅度较低情况下, 在长达数十分钟的记录时段内, HT_cSQUID 天线的输出波形都不会出现大的波动. 同一时刻, HT_cSQUID 天线各分量的输出噪声电压波形所具有的基线平直、漂移不大, 尽管在 25 s 的记录时间内仍然存在幅度约为 $3\Phi_0$ 漂移, 但频谱分析的结果表明, 这种频率极低的缓变对那些工作在几十赫兹以上的 SQUID 超低频透地通信系统的噪声性能和工作性能影响很小.

图 6 给出对在不同测量时间记录下的时序测试信号的频谱分析结果. 图 6(a) 是图 5 中红色曲线测试数据对应频谱分析结果, 图 6(b) 是图 5 中蓝色曲线测试数据对应的频谱分析结果. 从图 6(a) 可以看出, 在没有地铁运行磁场影响时, 发射电流等于 2 A, 复合磁屏蔽体对 50 Hz 衰减量约等于 32 dB(40 倍), 方形环天线中心与 SQUID 传感器间隔约 10 m, 在电磁环境比较安静的测试条件下, 用 HT_cSQUID 磁强计作为接收天线的超低频透地通信系统能够对测试信号实现高信噪比的无失真接收. 因此基于 HT_cSQUID 磁强计技术可以在一定的条件下实现很大深度的低频透地无线电通信. 但在白天, 相同测试条件和信号条件下接收信号的频谱则显示出很大的不同. 首先, 与图 6(a) 所示结果相比, 在地铁运行的白天, SQUID 系统输出的白噪声背景有较大抬高, 在 83 Hz 处还出现了一个谱线较宽, 幅度很大的干扰信号. 尽管在相同信号条

件和相同的模拟测试环境中系统输出的测试信号幅度没有可分辨变化, 但调幅波频谱中 108 Hz 的谱线高度明显降低并被埋藏在白噪声背景中, 这就意味着接收波形会出现明显畸变. 因此如果以在 83 Hz 出的这个干扰信号的幅度作为系统工作的噪声门限, 那么不但系统信噪比有很大的降低, 接收信号的波形还会出现很大的畸变, 即 HT_cSQUID 接收天线的工作性能受到环境干扰很大影响. 因此, 在环境干扰很大的时段, 特别是当接收机所处空间存在时间变化率较大的干扰磁场时, SQUID 天线输出波形上将出现一些很难处理, 可能增加通信系统误码率的较大畸变.

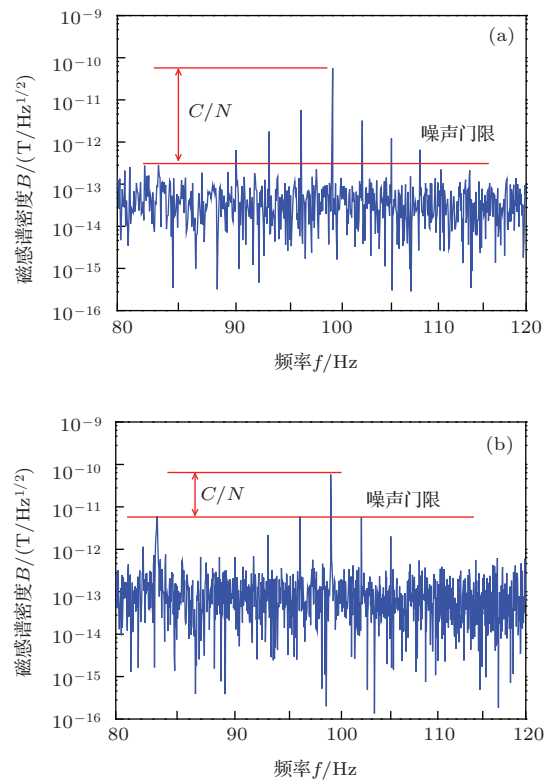
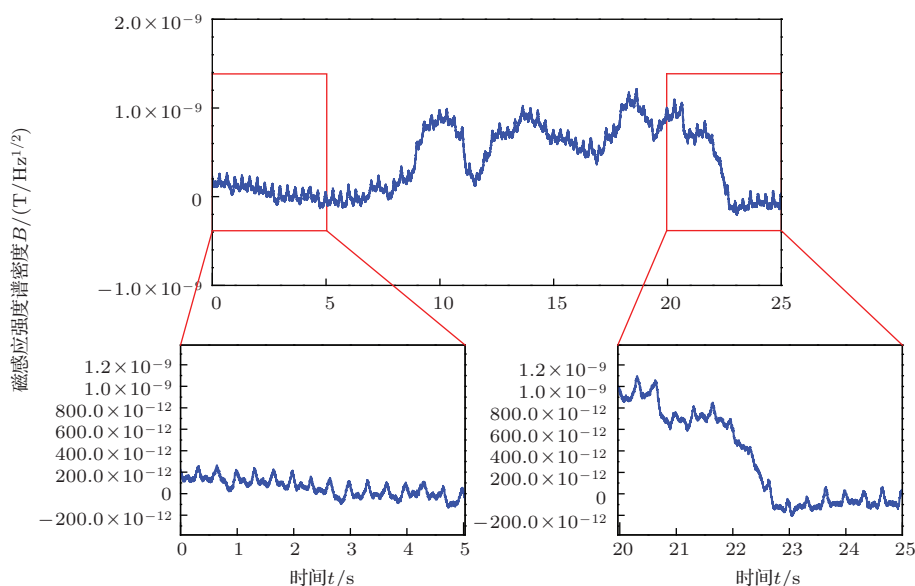


图6 99 Hz 载频、调制频率 3 Hz、调制深度等于 1 的测试信号频谱 (a) 地铁停止运行后频谱;(b) 地铁运行时频谱图

例如由图 7 我们可以看到, 由 SQUID 接收机记录的测试信号的波形随基线起伏的影响很大. 在 0 到 5 s 的时段内基线仅变化了 200 pT, 测试信号波形没有可以分辨的变化. 但在 20 至 25 s 的时段内, 记录曲线的基线在不到 2 s 的时间内 (22 到 22.7 s) 变化约 900 pT. 尽管这个约等于 1.3 nT/s 摆率并不足以导致我们的 SQUID 接收机失锁, 但却对信号波形产生了很大影响. 从信息传输的角度看, 这种波形上的失真显然会增加接收信号的处理负担.

图7 高噪声背景下HT_cSQUID接收机记录下的测试信号时序图

4 结 论

根据实验室现有的条件和设备,设计了包含由小型低频发射机和小型环天线组成的发射系统,复合电磁屏蔽体形成的高衰减测试信道,商品HT_cSQUID磁强计和商品高速数据采集器等部件,并且搭建完成了一套低频无线电模拟透地/穿墙通信系统.利用这套实验系统,可以分别在不同电磁干扰条件下开展透地和穿墙无线电通信的模拟实验.在模拟信道衰减量高达数十分贝和收发间距10 m的条件下,使用幅度等于10 nT的测试信号,无畸变地接收到了几十到几百皮特量级的微弱调幅磁场的高质量信号.

国内以HT_cSQUID作为低频信号接收机的实验比较少,对比国外Reagor等^[5]和Vasquez等^[6]的工作,本文中信号的载波频率在超低频段(99 Hz),而上述文献的信号载频在3到4 kHz.对于一般的环境而言,背景噪声随着频率增大而减小.但是对于透地/穿墙信道而言,信号又随着频率的增大而迅速衰减.因此要获得较高的信噪比,使得信号在某种媒质中穿透要求的距离后,而不至淹没在背景噪声中,那么工作频率的选择,就显得十分重要.本文的工作提供了在更低频段进行透地通信的可行性的证明,因此,也为在不同媒质中、不同要求的传播距离下,确定最佳的载波频率提供了一些

思路.

该实验系统的成功设计和这个初步的实验结果对基于HT_cSQUID技术的极低频应用的相关理论研究和核心技术突破具有一定的参考价值.

参考文献

- [1] Wolf S A, Davis J R, Nisenoff M 1974 *IEEE Trans. Commun.* **22** 549
- [2] Davis J R, Dinger R J, Goldstein J A 1977 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **25** 223
- [3] Bednorz J G, Müller K A 1986 *Z. Phys. B Condensed Matter* **64** 189
- [4] Zhao Z X, Chen L Q, Yang Q S, Huang Y Z, Chen G H, Tang R M, Liu G R, Cui C G, Chen L, Wang L Z, Guo S Q, Li S L, Bi J Q 1987 *Chin. Sci. Bull.* **32** 412 (in Chinese) [赵忠贤, 陈立泉, 杨乾声, 黄玉珍, 陈庚华, 唐汝明, 刘贵荣, 崔长庚, 陈烈, 王连忠, 郭树权, 李山林, 毕建清 1987 科学通报 **32** 412]
- [5] Reagor D, Fan Y, Mombourquette C, Jia Q, Stolarczyk L 1997 *IEEE Trans. Appl. Superconduct.* **7** 3845
- [6] Vasquez J, Rodriguez V, Reagor D 2004 *IEEE Trans. Appl. Superconduct.* **14** 46
- [7] Zhang M J, Lang P L, Peng Z H, Chen Y F, Chen K, Zheng D N 2006 *Chin. Phys.* **15** 1903
- [8] Gu H F, Cai W Y, Wei Y K, Liu Z H, Wang Q, Wang Y, Dai Y D, Ma P 2012 *Chin. Phys. B* **21** 040702
- [9] Zhao K H, Chen X M 2003 *Electromagnetism* (Beijing: Higher Education Press) p355 (in Chinese) [赵凯华, 陈熙谋 2003 电磁学 (北京: 高等教育出版社) 第355页]

HT_cSQUID low frequency receiver and through-wall receiving experiments*

Zheng Peng Liu Zheng-Hao Wei Yu-Ke Zhang Chen Zhang Yan Wang Yue Ma Ping[†]

(Applied Superconductivity Research Center of Peking University; State Key Laboratory for Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, Peking University; Department of Physics, Beijing 100871, China)

(Received 18 April 2014; revised manuscript received 14 May 2014)

Abstract

System and methods for wireless communication that could go through hydrous rocks, seawater, and even soil are investigated. The key components of the system are the high sensitive receivers of commercial High T_c SQUID and high-speed signal acquisition and processing systems. Within the frequency band of 30 Hz to 100 kHz, the intrinsic noise spectral density of commercial HT_cSQUID could be as good as 100 fT/Hz^{1/2}, so that with commercial software, signals could be accurately modulated, collected, demodulated and processed. In the low frequency end, with the features of long penetration depth of electromagnetic wave and high sensitive, small size of HT_cSQUID magnetometer, the feasibility of the implementation of portable low-frequency wireless communication system which could be used both under ground and water is discussed preliminarily. Using a 1 m² square coil as test signal transmitting antenna, with the HT_cSQUID magnetometer receiving sensor placed in an electromagnetic shielding cavity which could provide considerable electromagnetic attenuation, the 99 Hz AM signal emitted by the transmitting antenna is successfully collected. The result proves that with the technology of HT_cSQUID, practical wireless communications can be realized between the earth's surface and a depth of hundreds of meters underground.

Keywords: HT_cSQUID magnetometer, low frequency electromagnetic wave, low frequency radio communication

PACS: 85.25.Dq, 41.20.Jb, 07.57.Kp

DOI: [10.7498/aps.63.198501](https://doi.org/10.7498/aps.63.198501)

* Project supported by the National Basic Research Program of China(Grant No.2011CBA00106).

[†] Corresponding author. E-mail: maping@pku.edu.cn