

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.05.014

一种应用于低频电磁波通信的快响应原子磁强计

蒋双辉^{1,2}, 祝孝杰^{1,2}, 田 原¹, 顾思洪¹, 张 奕¹, 陈杰华^{1,3}

- (1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院波谱与原子分子物理国家重点实验室, 武汉 430071;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 武汉量子技术研究院, 武汉 430206)

摘 要:相较于传统线圈,原子磁强计作为低频电磁波通信信号磁传感接收器具有体积小、灵敏度高的优势。基于射频-光双共振原理实现原子的宏观极化和相干进动,并通过探测磁矩横向分量来获得待测磁场信息,最终实现一台灵敏度 $500 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ @ $1 \sim 5 \text{ Hz}$, 响应带宽 3.5 kHz 的原子磁强计。并利用该原子磁强计作为磁传感器对频率 200 Hz 、磁场分量幅度 10 nT 的电磁波开展了通过探测磁场分量接收通信信号的实验,实现码率 200 /s 的电磁波通信信号的接收,验证了该磁强计作为接收机接收低频电磁波通信信号的能力。

关键词:原子磁强计;电子顺磁共振;磁通信;调制解调

中图分类号:O45

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2023)05-0127-08

Application of fast-response atomic magnetometers to low-frequency electromagnetic wave communication

JIANG Shuanghui^{1,2}, ZHU Xiaojie^{1,2}, TIAN Yuan¹, GU Sihong¹, ZHANG Yi¹, CHEN Jiehua^{1,3}

- (1. State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Wuhan Institute of Quantum Technology, Wuhan 430206, China)

Abstract: Compared with the traditional coils, the atomic magnetometer has the advantage of small size and high sensitivity as a low-frequency electromagnetic wave communication (LFEWC) signal magnetic sensor receiver. Herein, the macroscopic polarization and coherent precession of atoms are appropriately realized based on the principle of RF-optical double resonance, and the measured magnetic field information is obtained by detecting the transverse component of the magnetic moment. Finally, this leads to the realization of an atomic magnetometer with a sensitivity of $500 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ @ $1 \sim 5 \text{ Hz}$ and a response bandwidth of 3.5 kHz . The test is performed on the reception of communication signals through detecting the components of the magnetic field. For this purpose, this atomic magnetometer is utilized to identify electromagnetic waves, whose frequency and amplitude of the magnetic field components are 200 Hz and 10 nT , respectively. Such a magnetometer is able to realize the reception of communication signals of electromagnetic waves with a

收稿日期: 2023-03-30; 修订日期: 2023-06-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2002400)

作者简介: 蒋双辉(1995-), 男, 博士研究生, 主要从事原子分子光物理和磁强计方面的研究。

通信作者: 陈杰华(1980-), 男, 博士, 正高级工程师, 博士生导师, 主要从事原子分子光物理和原子传感器的研制与应用等方面的研究。

code rate of 200 /s. This evidence confirm the ability of the magnetometer as an effective receiver to receive LFEWC signals.

Key words: Atomic magnetometer; Electron paramagnetic resonance; Magnetic communication; Modulation and demodulation

0 引言

利用极低频电磁波信号实施通信是一种有效的对水下或地下通信手段^[1-4]。早在 20 世纪五六十年代,美国海军就开始进行低频通信网的实验部署,通过线圈作为接收天线实现与水下潜艇的通信^[5-6]。然而,采用的线圈的尺寸常常需要达到几十米到上百米,才能保证通信质量,因此应用范围十分受限^[7-8]。采用超导量子干涉磁强计(superconducting quantum interference device, SQUID)作为接收天线也可以进行低频电磁波通信^[9],但维持其稳定工作所需的低温冷却系统昂贵庞大。

原子磁强计灵敏度与 SQUID 磁强计相当,已达亚 fT/Hz^{1/2} 水平,是目前灵敏度最高的磁场测量仪器,并在磁通信^[10]、地球物理与导航^[11-13]、军事反潜^[14]、生物医学^[15-17]和基础物理研究^[18-20]等领域获得广泛应用。并且,相比线圈和 SQUID 磁强计等传统电磁波信号接收天线,原子磁强计具有成本低和尺寸小的优势,用作极低频接收天线具有很强竞争力。2020 年,英国斯特拉恩克莱德大学研究团队利用灵敏度 30 pT/Hz^{1/2}@100 Hz 便携式原子磁强计作为天线接收超低频和甚低频电磁波信号,实现载波 200 Hz 到 200 kHz 频率范围内的通信信号接收^[21]。中国科学院大学研究团队利用原子磁强计作为天线来研制贯穿地球(through-the-Earth, TTE)的通信系统,实现原子磁强计探头体积 $\Phi 40 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$,响应带宽 200 Hz 的低频电磁波地下通信接收装置^[22]。不同的应用对原子磁强计的技术指标要求不同,在对潜通信应用中,为提高水下装备通信隐蔽性,实施通信电磁波信号频率可低至几 Hz,以增加传输深度,因此原子磁强计几 Hz 频率处的灵敏度尤其重要,需要灵敏度达到百 fT/Hz^{1/2} 量级。但通信信道容量随电磁波频率提高而增大,因此对于广泛应用,作为接收天线的原子磁强计响应速率越快越好。

本文展示了所研制的原子磁强计及其作为极低频电磁波通信接收天线的应用实验研究。通过系统设计和参数优化实验,实现了一种高灵敏度、快

响应的 Mx 型原子磁强计,并应用该原子磁强计作为低频电磁波通信信号接收天线完成了接收通信信号的实验。

1 原子磁强计

1.1 原理

实验采用单光束 Mx 型原子磁强计方案,调节圆偏振激光束与待测磁场方向呈一定夹角,其中与磁场平行的光分量作为泵浦光来极化原子,与磁场垂直的光分量作为探测光来获取信号。采用和磁场方向垂直的射频磁场与原子塞曼子能态共振,实现原子的相干进动,并利用光电探测器探测透射光,从所获的光电信号中提取出原子的进动信息,从而实现磁场强度测量。设待测磁场 B_0 沿 z 轴方向,激光处于 xz 平面,射频磁场沿 y 方向,为 $B_y = B_{rf} \cos \omega t$,求解 Bloch 方程^[23],从而得出对应原子 x 方向极化的光电信号可表示为 $S_x = S_{bg} + Px' \cos \omega t + Py' \sin \omega t$,其中 S_{bg} 为信号本底。

$$\begin{aligned} Px' &= -\frac{\Omega/T_2}{\Delta\omega^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2} \cdot S_0 \\ Py' &= \frac{\Delta\omega \cdot \Omega}{\Delta\omega^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2} \cdot S_0 \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中 $\Delta\omega = \omega_0 - \omega$ 为射频场的失谐频率, $\omega_0 = \gamma B_0$ 为拉莫尔进动频率, γ 为旋磁比, B_0 为待测磁场, $\Omega = \gamma B_{rf}$ 为拉比频率, T_2 为横向弛豫时间, Γ 为共振信号线宽, S_0 为正值常数。所以 S_x 中角频率为 ω 的交流成分还可表示为

$$S_x - S_{bg} = \frac{-Px' \cos[\omega t - (\pi + \varphi)]}{\sqrt{1 + \Delta\omega^2 T_2^2}} \quad (2)$$

式中 $\pi + \varphi$ 为光电信号相比射频磁场的相移, $\varphi = \arctan(\Delta\omega \cdot T_2)$ 。

分别通过开环和闭环两种模式对 Mx 磁强计开展了实验研究。开环模式下,锁相放大器以频率为 ω 的正弦信号作为参考对 S_x 进行相敏解调,所获解调信号与 Py' 成正比,是以 $\Delta\omega$ 为参量的微分形式谱线。实验中,通过评估该谱线线宽、幅度和噪声来优化原子磁强计参数。闭环模式下,由光电信号

中提取出 S_x 信号经过放大后隔直,再经移相器进行 π 的相移,然后加载到产生射频磁场的线圈上。由于光电信号相比射频磁场相移 $\pi + \varphi$,而闭环回路仅当 $\Delta\omega = 0$,即 $\omega = \omega_0$ 时总相移为 2π ,这样闭环回路就满足了自激振荡相位条件。当闭环回路增益大于 1 时,闭环回路就能建立自激振荡^[24],产生频率为 ω_0 的信号,实验中通过测量自激振荡信号频率来获取待测磁场强度。

1.2 实验装置

磁强计实验装置如图 1 所示。本文选用分布式反馈二极管激光器(distributed feedback laser, DFB)作为实验光源,它提供⁸⁷Rb 原子的 D1 线波长约为 795 nm 的线偏振光。出射光通过光学隔离器(isolator)后由偏振分光棱镜(polarized beam splitter, PBS1)分为两束:一束光射入原子圆二向色性激光锁定系统(dichroic atomic vapor laser lock, DAVLL),利

用处在磁场中的原子对左右旋圆偏振光吸收不同的原理,该系统将激光频率锁定在⁸⁷Rb 原子基态超精细能级 $F_g = 2$ 到激发态能级 $F_e = 1$ 的跃迁谱线上;另一束光则与原子气室(cell)中的⁸⁷Rb 原子相互作用。图 1 中,半波片 $\left(\frac{\lambda}{2}a\right)$ 和 PBS1 组合用于分配两束光的光强,而半波片 $\left(\frac{\lambda}{2}b\right)$ 和 PBS2 组合则用于调节与原子作用光束的光强。PBS2 出射光耦合入多模光纤(optical fiber),出射光经光纤耦合器转变为平行光,再经线偏振片(P)和四分之一波片 $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$ 后转变成圆偏振光。激光束入射原子气室与原子作用通过抽运实现原子极化,透射激光经透镜(L)汇聚后被光电二极管(photodiode, PD)探测,光电探测器输出电流信号由光电二极管电流放大器(amplifier, AMP)放大并转换为电压信号输出。

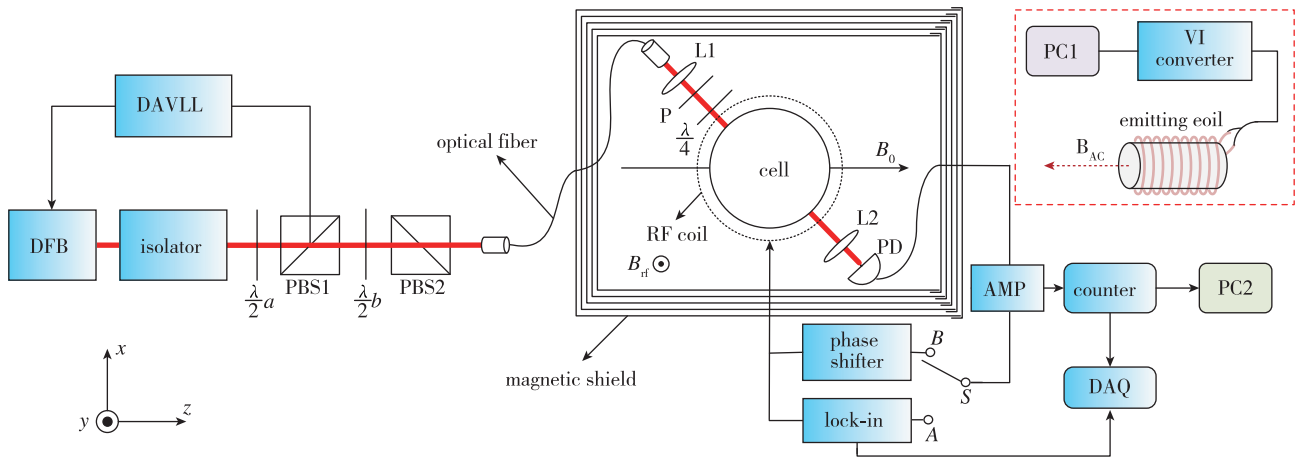


图 1 Mx 型原子磁强计实验装置

Fig. 1 Experimental setup of Mx-scheme atomic magnetometer

实验中,原子磁强计的工作模式切换由开关 S 控制。S 连接 A 端口时,原子磁强计工作在开环模式,锁相放大器(lock-in)产生的交流信号加载到射频线圈(RF coil)上产生 y 轴方向射频场(B_{rf})来激发原子相干进动,并作为参考信号用于对输入锁相放大器的信号进行相敏解调,所获解调结果被数据采集系统(data acquisition, DAQ)采集。S 连接 B 端口时,原子磁强计工作在闭环模式,AMP 输出信号通过移相器(phase shifter)产生 π 的相位移动后作为振荡频率源信号加载到射频线圈,从而形成自激振荡,在自激射频场中所获光电信号经 AMP 输出。计数器(counter)测量放大器输出信号频率,测

量结果被 DAQ 采集。

实验中采用的原子气室为直径 $\Phi = 30$ mm 球形玻璃泡,泡内充有⁸⁷Rb 元素,泡壁上镀有石蜡涂层。原子气室安装在陶瓷容器内,通过双绞缠绕的加热丝对陶瓷加热,无磁温度传感器探测陶瓷温度而实现对原子气室控温。待测磁场 B_0 由 z 向亥姆霍兹线圈(图中未画出)产生,整个光-原子作用系统放置在五层坡莫合金材料制成的圆柱形磁屏蔽桶(magnetic shield)中,以消除外界杂散磁场对实验影响。

在实现高灵敏度、快响应自激 Mx 磁强计后,利用该实验系统开展了通过探测低频电磁波磁场分

量而接收通信信号的应用研究。通信应用实验中将磁屏蔽系统最外面四层盖子取下,仅保留最内层盖子,且内层盖子中心处为直径 2 cm 的圆孔。通过图 1 中红色虚线框(发送端)中的发射装置产生交变电磁场,利用该磁强计(接收端)作为磁传感器探测从端面(圆孔处)入射电磁波的磁场分量强度变化实现通信信号的接收。

2 结果与讨论

为获得高性能的 M_x 磁强计,本文先在开环工作模式下开展性能优化实验,再由所获的最优参数实现快响应的自激式 M_x 磁强计。对于 M_x 磁强计,磁场测量灵敏度 δB 可由(3)式评估^[25]

$$\delta B = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\Delta \nu}{S/N} \quad (3)$$

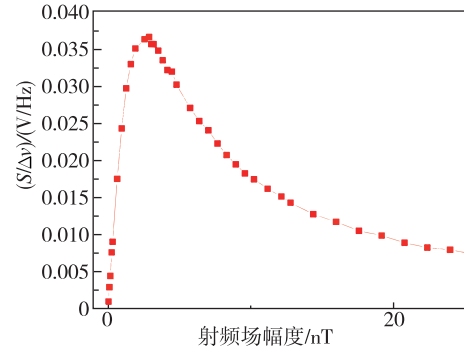
式中, $\gamma = 7 \text{ Hz/nT}$ 为 ^{87}Rb 原子旋磁比, $\Delta \nu$ 为共振信号线宽, S 为共振信号幅度, N 为共振谱线噪声,实验中将射频频率设置在共振处,记录 80 s 锁相放大器解调所获信号,进行快速傅里叶变换而获得的功率谱密度的平方根作为本实验所获 N 。

2.1 参数优化

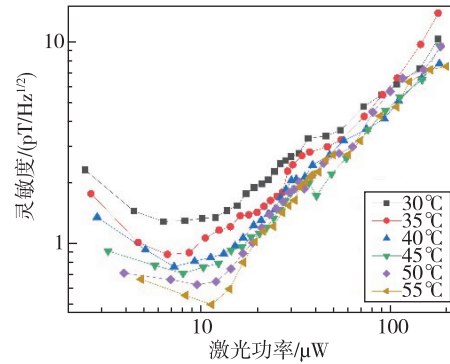
为获得更佳的磁强计灵敏度,分别对射频场幅度、原子气室温度和光功率进行参数优化(图 2 所示)。通过噪声分析可知,实验中噪声 N 主要为入射到光电二极管上的光引起的噪声,因此主要与入射原子气室的光功率和原子气室温度有关,对射频功率变化不敏感,所以在进行原子气室温度和光功率优化之前,先根据 $S/\Delta \nu$ 来优化射频场幅度,如图 2(a)所示。从图中信号幅度与线宽的比值 $S/\Delta \nu$ 随射频场幅度变化的关系可知,当射频场幅度为 2.9 nT 时 $S/\Delta \nu$ 达到极大值,接下来以该射频场幅度来优化光功率和气室温度参数。

确定射频场幅度后,在共振频率附近扫描锁相放大器输出射频信号频率,利用 DAQ 获得磁共振谱线信号(线宽、幅度),并将射频频率设置在共振处获得共振谱线噪声,根据(3)式计算出开环模式下的灵敏度。实验研究了开环磁强计灵敏度随入射光功率和原子气室温度的变化关系,并采用 1~5 Hz 频率内的平均噪声来表征灵敏度,如图 2(b)所示。图 2 参数优化结果表明,最佳灵敏度对应的参数分别为原子气室温度 55 °C,光功率 11.5 μW ,射频场幅度 2.9 nT。并在该实验参数条件下,将开关 S 切换到 B 端口,原子磁强计切换至闭环模式并获得图 3 所示的自激振荡

荡信号。然后将 DAQ 记录的自激信号的频率除以原子旋磁比 γ ,得到待测磁场测量结果。



(a) $S/\Delta \nu$ 随射频场幅度变化函数



(b) 开环原子磁强计在 1~5 Hz 平均灵敏度

图 2 参数优化结果

Fig. 2 Results of parameter optimization

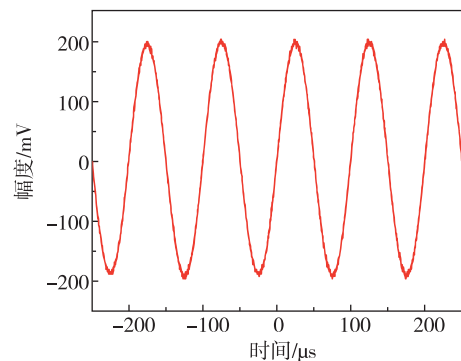


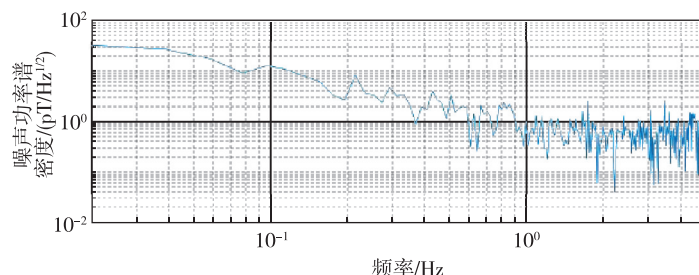
图 3 自激振荡信号

Fig. 3 Self-oscillating signal

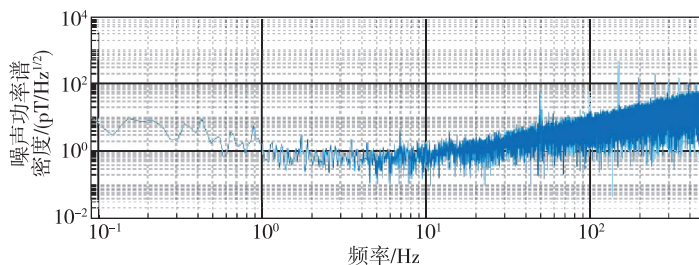
分别采用 10 Hz 和 2 kHz 计数器采样率采样,利用快速傅里叶变换计算磁场噪声的噪声功率谱密度平方根,获得的闭环模式下磁强计噪声功率谱密度如图 4 所示,图中横纵坐标用对数坐标值来表示。从图 4(a)可见,采样率为 10 Hz 时,1~5 Hz 灵

灵敏度平均为 $500 \text{ fT/Hz}^{1/2}$,而通过对提供待测磁场的电流源噪声评估发现低频噪声与图 4 中的变化曲线一致,因此低于 1 Hz 时噪声增加主要源于待测磁场低频噪声。从图 4(b)可见,当采样率为 2 kHz 时, $1 \sim 10 \text{ Hz}$ 灵敏度平坦,大于 10 Hz 时灵敏度随着频率增加而恶化,这是由于自激模式下反馈环路的

增益使幅频响应曲线保持平坦,但随着频率增加噪声相应增加,导致原子谱线信噪比降低^[26]。并且比较不同采样率的灵敏度发现,由于计数器采样率增加导致测量噪声增加使得图 4(b)中 $1 \sim 5 \text{ Hz}$ 磁场测量噪声比图 4(a)中 $1 \sim 5 \text{ Hz}$ 磁场测量噪声略差。



(a) 计数器采样率 10 Hz



(b) 计数器采样率 2 kHz

图 4 自激式 Mx 型原子磁强计噪声功率谱密度

Fig. 4 Noise power spectral density of the self-oscillating Mx-scheme atomic magnetometer

对于接收低频通信信号应用,原子磁强计的最大响应带宽决定了可接收通信载波信号的最高频率。为了评估所实现的闭环原子磁强计的响应带宽,实验中,在驱动 z 向亥姆霍兹线圈的电流上叠加不同频率正弦交流电流,从而在所测磁场 B_0 上叠加幅度约 10 nT 交流磁场,测量得到的原子磁强计响应随着交流磁场频率变化如图 5 所示。从图中可知,原子磁强计 3 dB 响应带宽约为 3.5 kHz ,快响应速率也为电磁波通信应用打下基础。

2.2 低频电磁波通信应用

基于上述所实现的自激式 Mx 型原子磁强计,本文验证了该磁强计作为磁传感器接收低频电磁波通信信号的可行性。通信系统如图 1 所示,主要包括两部分:虚线框内为发送端部分;闭环磁强计系统为接收端部分。

在发送端,电脑 1(PC1)产生随机二进制数据,经过 ASCII 编码和调制后产生的数字信号经过数

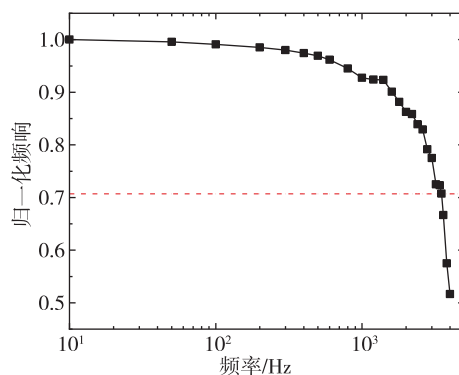


图 5 自激式 Mx 原子磁强计的频率响应

Fig. 5 Frequency response of the self-oscillating Mx atomic magnetometer

据采集卡转变成模拟电压信号,经电压-电流转换器(VI converter)转换成电流信号并加载在发射线圈(emitting coil)上,产生沿 z 轴向的交变磁场(B_{AC})。为抑制环境磁场和磁屏蔽内部磁场浮动噪声,采用相位连续、占用带宽最小、包络恒定的最小

频移键控(minimum shift keying, MSK)调制方案来传输二进制数据。经 MSK 调制后信号频率在 f_1 和 f_0 之间跳变,分别表示比特 1 和比特 0,信号载波频率 $f_c = (f_1 + f_0)/2$,码率 $f_s = f_c/(n + m/4) = 4|f_1 - f_c|$,其中 n 为正整数, m 为非负整数。

在接收端,磁屏蔽桶仅保留最内层端面盖,电磁波沿屏蔽桶的轴向入射(图 1 中红色虚线箭头),以实现的闭环磁强计作为磁传感器来接收该电磁波的磁分量信号,并利用解调和解码技术恢复原始数据,具体过程如下。

寻找接收端调制信号的初始位置是 MSK 解调过程中的关键,图 6 展示了数据信号初始位置寻找判别过程。电脑 2(PC2)接收计数器测量结果并转换为图 6(a)中的数字信号,数字信号通过 MSK 解调为二进制数据并完成数据展示。在 ASCII 编码过程中,由于插入的起始符信号频率、相位和周期已知,所以通过在接收端产生相同的信号(图 6(a)红色点线)实时地与所接收到的调制信号(图 6(a)黑色点线)相乘并在时间上进行积分,积分结果如图 6(b)所示。根据积分结果的最大值可以判断接收到的调制信号中起始符信号的位置,从而得到原始数据信号的初始位置。确定该位置后,对接收到的调制信号进行解调,已知 MSK 调制信号的第 k 个码元可以表示为

$$s_k(t) = \cos\left[2\pi\left(f_c \pm \frac{f_s}{4}\right)t + \varphi_k\right] \quad (4)$$

式中, φ_k 为第 k 个码元的初始相位。选取与载波信号频率相同且初始相位为零的参考信号 $s_1(t) = \sin(2\pi f_c t)$ 和 $s_2(t) = \cos(2\pi f_c t)$,并用调制信号 $s_k(t)$ 分别乘以参考信号 $s_1(t), s_2(t)$,利用滤波器滤除二倍频信号再进行积分,让两积分结果相乘再乘以与第 k 个码元有关的正负因子,得到式(5)解调结果

$$s(t) = (-1)^k \cdot \int s_k(t) \cdot s_1(t) dt \cdot \int s_k(t) \cdot s_2(t) dt \quad (5)$$

实际解调过程中,图 7(a)中接收信号与参考信号相乘后的积分结果如图 7(b)所示,当图中积分结果大于零时输出二进制 1,积分结果小于零时则输出二进制 0。再将解调后的二进制数据进行 ASCII 解码,从而在 PC2 端显示原始输入数据。

实验系统中 MSK 调制解调载波频率 f_c 和码率

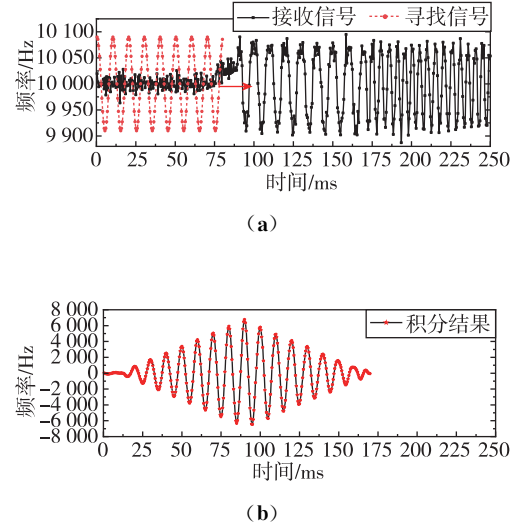


图 6 确定数据初始位置

Fig. 6 Determine the initial position

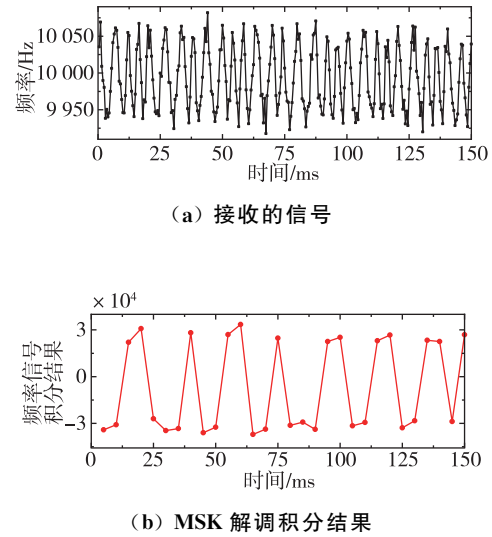


图 7 接收端信号

Fig. 7 Signals at the receiving end

f_s 可由 PC1 中的 Labview 程序控制,通信实验时将载波频率和码率分别设为 $f_c = 200$ Hz, $f_s = 200$ /s。通过调节施加到原子气室区域的交流磁场幅度,研究了实现 20 min 持续无误码地实现数据传输所需要的最小磁场幅度,实验结果表明当耦合到原子气室区域交流磁场幅度大于 10 nT 时,所实现的实验系统能够连续无误码地接收通信信号。

此外,从图 4(b)中可知,当频率大于 10 Hz 时,原子磁强计的灵敏度随着频率增加而恶化,1~5 Hz 灵敏度比 200 Hz 处灵敏度约高 1 个量级。所以将载波频率 f_c 设置为 1~5 Hz,实现持续通信所需要的最小交流磁场幅度应可以大幅度减小。

3 结论

为实现微小型原子磁强计的研制和利用该磁强计作为传感器接收低频电磁波磁分量的通信应用,实现了一种高灵敏度、快响应的自激式 M_x 型原子磁强计,并利用该磁强计实现了低频电磁波通信信号的接收。获得的实验结果如下:

1)在磁强计的开环和闭环两种工作模式下,通过评估谱线线宽、幅度和噪声来优化原子磁强计的实验参数,最终在原子气室温度 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$,光功率 $11.5\text{ }\mu\text{W}$,射频场幅度 2.9 nT 的最佳实验参数条件下实现一台灵敏度为 $500\text{ fT/Hz}^{1/2}$ @ $1\sim 5\text{ Hz}$ 的原子磁强计。

2)在驱动 z 向亥姆霍兹线圈的电流上叠加不同频率正弦交流电流来评估闭环原子磁强计的响应带宽,从而在所测磁场 B_0 上叠加幅度约 10 nT 交流磁场,测量得到的原子磁强计 3 dB 响应带宽约为 3.5 kHz 。

3)利用所实现的原子磁强计作为低频电磁波通信接收天线,接收频率 200 Hz ,磁场分量 10 nT 的电磁波分量,实现码率 200 /s 的电磁波通信信号持续无误码的接收,从而验证了原子磁强计作为低频电磁波通信信号的接收能力。

总之,相比于采用传统接收线圈的低频电磁波通信接收器,原子磁强计作为磁传感接收机具有体积更小和低频信号探测灵敏度更高的优势,有利于水下极低频电磁波通信的应用和微小型通信接收机的研制。本研究为接收低频电磁波通信信号提供了一种可行选项。

参考文献

- [1] MOORE R K. Radio communication in the sea[J]. IEEE Spectrum, 1967, 4(11): 42-51.
- [2] MEISSNER T, WENTZ F J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(9): 1836-1849.
- [3] 李新年,李清华,王常虹,等. 美国地下领域无人系统发展现状及启示[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(6): 52-59.
LI Xinnian, LI Qinghua, WANG Changhong, et al. Development and enlightenment of unmanned underground system in the United States[J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8(6): 52-59 (in Chinese).
- [4] 王毅凡,周密,宋志慧. 水下无线通信技术发展研究[J]. 通信技术, 2014, 47(6): 25-27.
WANG Yifan, ZHOU Mi, SONG Zhihui. Development of underwater wireless communication technology[J]. Communications Technology, 2014, 47(6): 25-27 (in Chinese).
- [5] NISENOFF M. The use of SQUIDS in low-frequency communication systems[C]// United States: AIP Conference Proceedings, 1978, 44(1): 117-129.
- [6] KORSCHING P F. The ELF odyssey: national security versus environmental protection[J]. Rural Sociology, 1981, 46(3): 537.
- [7] YENCHEK M R, HOMCE G T, DAMIANO N W, et al. NIOSH-sponsored research in through-the-earth communications for mines-a status report[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(5): 1700-1707.
- [8] 梁涓. 水下无线通信技术的现状与发展[J]. 中国新通信, 2009 (23): 67-71.
LIANG Juan. Current situation and development of underwater wireless communication[J]. China New Telecommunications, 2009, (23): 67-71 (in Chinese).
- [9] WEI T, GAO J, PAN H, et al. HTc rf SQUID magnetometer as low frequency antenna[C]// Gangzhou: Proceedings of the International Symposium on Antennas Propagation & EM Theory, 2010: 140-143.
- [10] GERGINOV V, DA SILVA F, HOWE D. Prospects for magnetic field communications and location using quantum sensors[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(12): 125005.
- [11] MEYER H G, STOLZ R, CHWALA A, et al. SQUID technology for geophysical exploration[J]. Physica Status Solidi (c), 2005, 2(5): 1504-1509.
- [12] DANG H B, MALOOF A C, ROMALIS M V. Ultrahigh sensitivity magnetic field and magnetization measurements with an atomic magnetometer[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(15): 151110.
- [13] 陆一,魏东岩,纪新春,等. 地磁定位方法综述[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 118-130.
LU Yi, WEI Dongyan, JI Xinchun, et al. Review of geomagnetic positioning method[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(2): 118-130 (in Chinese).
- [14] PATTON B, VERSOLATO O O, HOVDE D C, et al. A remotely interrogated all-optical ^{87}Rb magnetometer[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(8): 083502.
- [15] BISON G, CASTAGNA N, HOFER A, et al. A room temperature 19-channel magnetic field mapping device for cardiac signals[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95

- (17): 173701.
- [16] JENSEN K, BUDVYTYTE R, THOMAS R A, et al. Non-invasive detection of animal nerve impulses with an atomic magnetometer operating near quantum limited sensitivity[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29638.
- [17] BOTO E, HOLMES N, LEGGETT J, et al. Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system[J]. *Nature*, 2018, 555 (7698): 657-661.
- [18] VASILAKIS G, BEOWN J M, KORNACK T W, et al. Limits on new long range nuclear spin-dependent forces set with a K-3He comagnetometer[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(26): 261801.
- [19] SMICKLAS M, BROWN J M, CHENUK L W, et al. New test of local Lorentz invariance using a ^{21}Ne -Rb-K comagnetometer[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(17): 171604.
- [20] TERRANO W, ROMALIS M. Comagnetometer probes of dark matter and new physics[J]. *Quantum Science and Technology*, 2021, 7(1): 014001.
- [21] INGLEBY S J, CHALMERS I C, DYER T E, et al. Resonant very low-and ultra low frequency digital signal reception using a portable atomic magnetometer [J]. *arXiv Preprint arXiv:2003.03267*, 2020: 8.
- [22] YAN B, ZHU W, LIU L, et al. Design of induction magnetometer receiving sensor for through-the-earth communications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 15(2): 1139-1144.
- [23] BLOCH F. Nuclear induction[J]. *Physical Review*, 1946, 70(7-8): 460.
- [24] USHER M, STUART W, HALL S. A self-oscillating rubidium vapour magnetometer for geomagnetic measurements[J]. *Journal of Scientific Instruments*, 1964, 41(9): 544.
- [25] JIMÉNEZ-MARTÍNEZ R, GRIFFITH W C, WANG Y J, et al. Sensitivity comparison of Mx and frequency-modulated bell-bloom Cs magnetometers in a microfabricated cell[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2009, 59(2): 372-378.
- [26] SCHWUBDT P, HOLLBERG L, KITCHING J. Self-oscillating rubidium magnetometer using nonlinear magneto-optical rotation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(12): 126103.

(编辑:黄利华)