

·激光技术·

一种用于CPT磁力仪的激光调制信号设计

熊天林¹, 孔小健¹, 雷选华¹, 赵国华²

(1. 海军工程大学, 湖北 武汉 430033; 2. 海军北海舰队, 山东 青岛 266000)

摘要: CPT磁力仪是一种用于微弱磁场测量的新型高灵敏度原子光学磁力仪, 针对CPT磁力仪垂直腔面发射激光器电流调制需要产生低相位噪声调制信号, 提出了一种基于锁相环频率合成器的方案。该方案从CPT磁力仪的基本原理出发, 分析了CPT磁力仪对调制信号的频率要求, 根据锁相环频率合成基本原理, 采用锁相环仿真软件ADIsimPLL完成了频率合成器中关键模块参数的确定, 产生了高精度、低相噪以及杂散性好的3.4 GHz频率信号, 并对系统性能进行了仿真分析。经仿真测试表明, 锁相效果良好, 性能可靠, 可以满足CPT磁力仪的研制。

关键词: CPT磁力仪; 垂直腔面发射激光器; 激光调制; 锁相环; 相位噪声

中图分类号: TN74⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-03-0023-05

Design of Laser Modulation Signal for CPT Magnetometer

XIONG Tian-lin¹, KONG Xiao-jian¹, LEI Xuan-hua¹, ZHAO Guo-hua²

(1. Naval Engineering University, Wuhan 430033, China; 2. North China Sea Fleet, Qingdao 266000, China)

Abstract: Coherent population trapping (CPT) magnetometer is a new high sensitive atomic optical magnetometer for weak magnetic field measurement. According to low phase noise modulated signal requirements in the process of current modulation of vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL) of the magnetometer, a scheme based on phase locked loop (PLL) frequency synthesizer is presented. On the basis of basic principles of CPT magnetometer, frequency requirements of modulated signal for CPT magnetometers are analyzed. According to basic principles of frequency synthesis of PLL, key module parameters in frequency synthesizers are determined by ADIsimPLL software. A 3.4 GHz frequency signal with high precision, low phase noise and good spurs is generated and simulation analysis is performed to the system. Simulation results shows that the system has good phase-locking effect, reliable performance and can meet the research of CPT magnetometer.

Key words: coherent population trapping (CPT) magnetometer; vertical cavity surface emitting laser (VCSEL); laser modulation; phase-locked loop; phase noise

微弱磁场测量作为研究物质特性、探测未知世界的一种有效手段, 在军事^[1]、医学^[2-3]、地球物理^[4]、工业检测^[5]、科学研究等领域发挥着重要作用。目前, 国内外常见的微弱磁场测量仪器有很多种, 但是它们各自受到精度、体积、功耗以及经济等诸多方面因素的影响, 使得其应用受到一定的限制^[6]。CPT (coherent population trapping) 磁力仪是近年来发展起来的根据相干粒子数捕获原理, 利用光学方法实现

磁场精密测量的一种原子光学磁力仪, 它具有体积小、能耗低、灵敏度高、结构简单、性能稳定等优点, 并且在这些方面有极大的可开发和优化空间, 在未来会有巨大的研发潜力和广泛的实际应用价值。

CPT现象首先由Alzetta等在1976年观察到^[7], 同年Arimondo等对此进行了初步的理论分析^[8]。随后国际上开展了大量有关CPT现象的理论和实验研究^[7-10]。近十几年来, 随着半导体激光技术的发展, CPT现象

收稿日期: 2013-04-08

作者简介: 熊天林(1985-), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要从事光电子技术与目标探测方面的研究。

在磁力仪中的应用研究引起了广泛的关注。从CPT原理出发,分析CPT磁力仪工作原理,从理论上推导出CPT磁力仪对调制信号的频率要求,提出一种实现方案。

1 CPT磁力仪工作原理

CPT磁力仪的基本原理是基于激光与处于磁场中的原子的相互作用,由于磁场中的原子能级会发生塞曼分裂,相邻塞曼子能级的能量差与外磁场成正比,不同的塞曼能级通过对入射激光产生一定的吸收,从而产生了可以反映磁场信息的CPT共振信

号,通过对CPT共振信号探测就可以得到外磁场的信息,从而实现外磁场的测量^[11]。

CPT磁力仪基本结构由三部分构成,即光源部分、磁传感器部分和信号检测部分,如图1所示。光源部分包括产生所需光束的垂直腔面发射激光器(VCSEL)及其控制部分,将相干光束变为圆偏振光的光学元件;磁传感器部分包括装有碱金属原子的样品池及其加热系统;信号检测部分包括接收带有磁场信息的光信号并把它转化成为电信号的光电探测器和获得数据与图像的示波器。光信号同时也反馈给激光器,用于激光器的稳频和锁频。

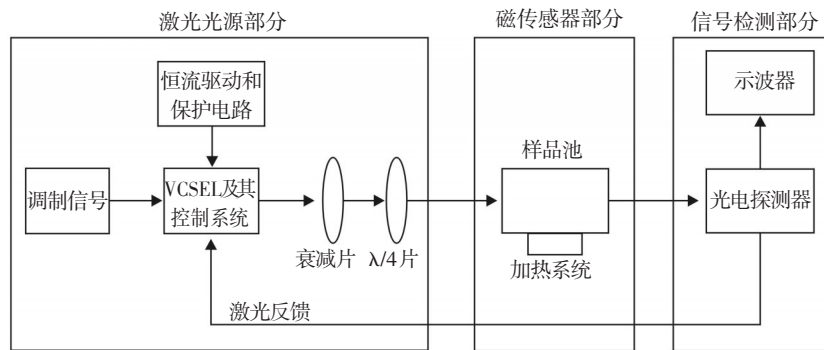


图1 CPT磁力仪结构框图

激光光源部分中恒流驱动和保护电路为VCSEL提供低噪声恒流源和保护,VCSEL控制系统主要包括高精度温度控制器及稳频电路,两部分使VCSEL能够稳定输出特定波长的单纵模线偏振激光;调制信号部分产生所需要频率的调制信号,对铷原子来说是3.4 GHz,通过对VCSEL注入电流的调制,使VCSEL发出两束频率差等于调制信号频率的相干光,以使入射光源照射碱金属样品池时发生CPT现象^[7]。

2 CPT磁力仪调制信号设计

2.1 CPT磁力仪对调制信号的频率要求

CPT磁力仪需要用到两束相干的激光束以实现光射入碱金属蒸汽腔后产生CPT现象^[7]。当前,碱金属方面CPT磁力仪采用最多的原子为铯(¹³³Cs)和铷(⁸⁷Rb)。以⁸⁷Rb为例,其能级结构如图2所示,D1线(5²S_{1/2}→5²P_{1/2})跃迁波长为795 nm,基态的两个超精细能级相距约为6.8 GHz,两个基态与激发态之间的跃迁频率分别为ω₁和ω₂。

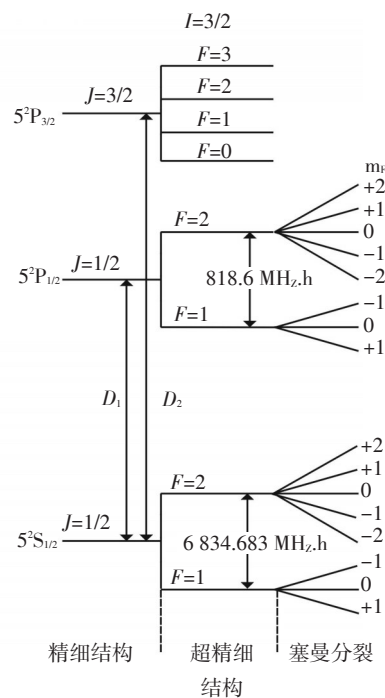


图2 ⁸⁷Rb能级结构示意图

为了产生CPT现象,必须有两个频率相差稳定

且为 $\omega_1 - \omega_2 = 6.8$ GHz的相干光束。最初用于CPT共振的方法是用相位或者频率锁定的方法来将两束互相独立的光源分别稳定,然后调整他们之间的频率差,但是为了获得稳定性很好的工作状态,需要高速的电子设备(如光电二极管、放大器、混频器等),以及一个高带宽的电子伺服电路。随着激光技术的发展,可以采用的方法是通过调制在激光束两边加上边频,从而获得相干的两束激励光源。这种方法对于VCSEL激光器来说很容易实现,因为VCSEL的调制带宽很大,即使需要调制超过10 GHz也是可行的,同时在CPT磁力仪小型化方面也具有很好的应用前景。

由激光器的特性,激光器被调制后其发射光频谱方程可表示为^[12]

$$\begin{aligned} E = & E_0 \cos 2\pi\nu_{\text{opt}}t + E_{-1} \cos 2\pi(\nu_{\text{opt}} - f_m)t + \\ & E_{+1} \cos 2\pi(\nu_{\text{opt}} + f_m)t + E_{-2} \cos 2\pi(\nu_{\text{opt}} - 2f_m)t + \\ & E_{+2} \cos 2\pi(\nu_{\text{opt}} + 2f_m)t + \dots \end{aligned} \quad (1)$$

式中, ν_{opt} 为激光器输出的未经调制的发射光频率,即直流光频率, f_m 为射频调制频率。对采用 ^{87}Rb 原子D1线的CPT磁力仪来说, ν_{opt} 对应795 nm光频, f_m 必须使其等于 ^{87}Rb 原子基态超精细能级跃迁频率的1/2,即3.4 GHz。从式中可以看出,调制后激光器产生一系列边频带,而第一边频带正是所需要的相干光频。

同时由于原子基态超精细能级受外界磁场的影响较大以及荧光暗线对信号源频率控制的需要,调制信号的频率必须可调且有一定的调频范围。基于外界磁场的变化以及磁力仪研究的需要,要求调制信号的频率变化范围在500 KHz以上。由于目前在信号的传输过程中功率的损耗无法确定,所以调制信号的输出功率应有0~10 dBm的可调范围。另外,信号源的性能也影响着磁力仪的稳定性,所以还要求调制信号具有频谱纯度高、相位噪声低、杂散性好等特点。

2.2 调制信号源设计方案

目前,用于CPT磁力仪调制信号的主要技术有Injection locked oscillation、LO(本振)和锁相环技术(PLL)。Injection locked oscillation信号源有较小的相位噪声;LO在体积和实现难易程度上具有优势;PLL方案在相位噪声和杂波抑制等方面可以满足

CPT磁力仪设计要求,是最成熟的设计方案。综合相位噪声、体积、功耗以及技术成熟度等性能指标,选择了锁相环作为设计方案。

锁相环原理框图如图3所示,锁相环电路通常由参考信号源恒温晶振、鉴相器(PD)、环路滤波器(LPF)、压控振荡器(VCO)等部件组成。锁相环路实质是一个相位差自动调节系统,能够实现两个输入信号相位同步的自动控制系统,更精确的说就是一个系统中由振荡器产生的输出信号在频率和相位上与参考信号或输入信号同步。如图3中,鉴相器把输入参考信号与压控振荡器输出信号的分频信号的相位进行比较,产生对应于两个信号相位差的误差电压,该误差电压经环路滤波器处理后去调整压控振荡器的频率(相位),使压控振荡器的频率向参考信号的频率接近,也就是使差拍频率越来越低,直到消除频率差而锁定^[13]。

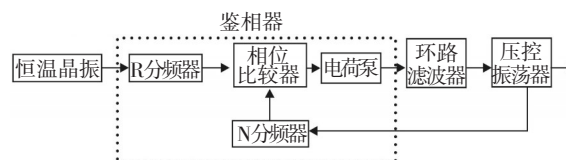


图3 锁相环原理框图

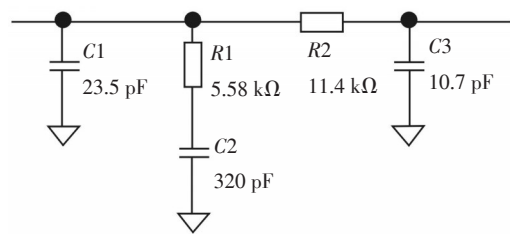
2.3 电路设计与器件选取

本设计要求中心振荡频率为3.4 GHz,所以选择的鉴相器芯片工作频率必须在3~4 GHz之间。可选用的芯片有ADI公司的ADF4113和ADF4106,NS公司的LMX2433和LMX2486等,本设计采用PLL芯片ADF4106来实现频率合成。ADF4106是ADI公司生产的高集成度PLL频率合成器,它集成有一个低噪声的数字鉴相器、可编程的分频器、可编程A/B计数器、双模前置分频(P/P+1)、频率检波器,精确电荷泵等模块^[14]。该芯片外接环路滤波器和压控振荡器即可组成一个锁相环路,用其设计的锁相环路具有很宽的带宽,在高频系统中不必另外使用倍频器,消除了由倍频器所带来的谐波、杂波及噪声信号。

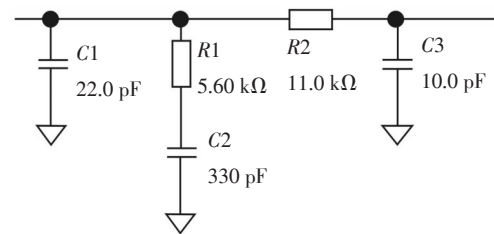
压控振荡器是锁相环频率合成器的核心器件之一,其本身的性能指标对频率合成器性能的影响极大。本设计要求中心振荡频率为3.4 GHz,所以选择的压控振荡器的振荡频率要在3~4 GHz之间,可选用的芯片有Zcomm公司的V844ME01和V846ME01,UMC公司的UMZ-116-A16和UMZ-117-A16,Sirenza公司的VCO690-3 300T等,在此选择UMZ-116-A16进行设计。

环路滤波器也是锁相环的重要部件之一,它与环路带宽、捕捉范围等环路的基本特性有密切关系,环路滤波器的设计和参数选择尤为重要,通过选择合理的参数,可以使信号源具有较低的相位噪声、较高的频谱纯度、较少的杂散波以及稳定的环路。为获得较好的相噪指标,设计采用无源环路滤波器,因为它不含有源器件,引入的噪声较有源滤波器更少些。用ADI公司的锁相环仿真工具ADIsimPLL直接生成,采用三阶无源滤波器,输出频率设为3.4 GHz,鉴相频率设为2.5 MHz,环路带宽设为250 KHz,相位裕量设为 45° ,最终生成理论环路滤波器如图4a所示,为方便实际应用,优化后的环路滤波器如图4b所示。

最终,锁相环方案原理图如图5所示,设定参考晶体为10 MHz,参考相位噪声选择point/floor,鉴相器选择ADF4106,压控振荡器选择UMZ-116-A16,环路滤波器选用图4b所示的优化方案。



(a)环路滤波器理论设计图



(b)环路滤波器优化方案图

图4 三阶无源环路滤波器

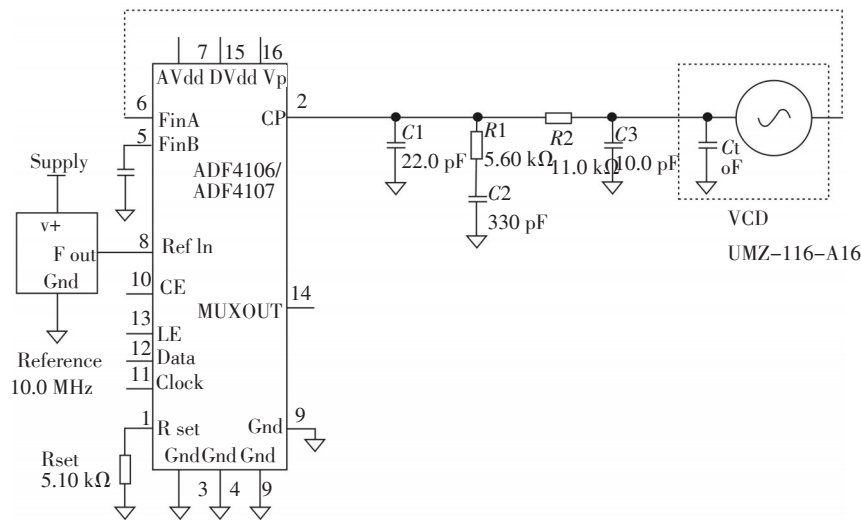


图5 锁相环方案原理图

3 仿真结果及分析

采用仿真工具ADIsimPLL对锁相环频率合成器进行仿真设计,得到系统输出3.4 GHz时的相位噪声仿真图如图6所示,输出频率响应如图7所示,输出频率误差如图8所示,输出相差如图9所示,从图中可以看出,锁相环输出不仅没有频差,而且相差也为零。仿真结果显示相位噪声在1 kHz时为 -79.16 dBc/Hz, 10 kHz时为 -91.52 dBc/Hz, 100 kHz时为 -90.16 dBc/Hz, 1 MHz时为 -108.4 dBc/Hz。以上仿真结果初步表明,所设计的调制信号可以满足 ^{87}Rb 原子CPT磁力仪的要求。

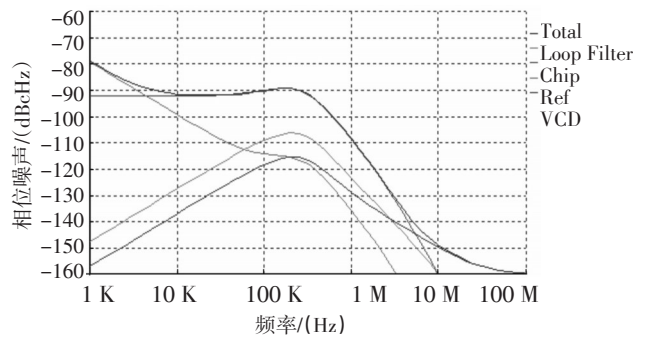


图6 相位噪声仿真图(3.40 GHz)

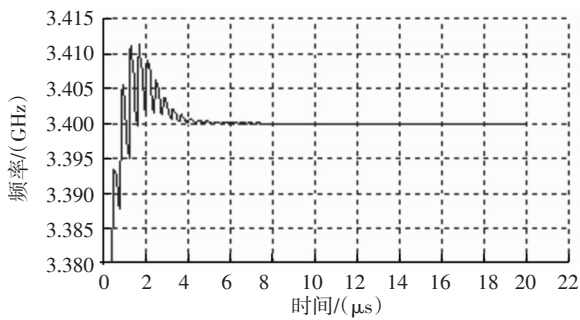


图7 输出频率响应

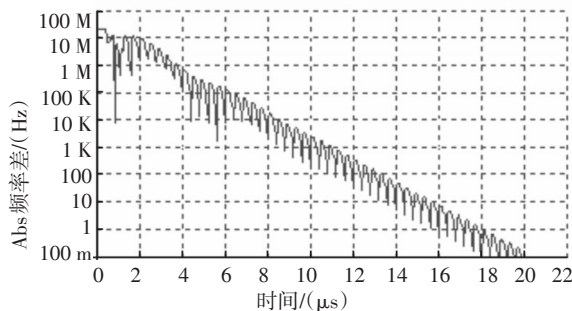


图8 输出频差

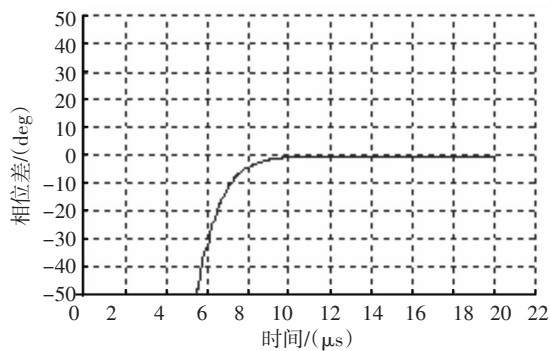


图9 输出相差

4 结束语

^{87}Rb 原子CPT磁力仪是一种新型原子光学磁力仪,需要3.4 GHz调制信号通过高频耦合器作用于VCSEL激光器进行电流调制,产生两束频率相差稳定的相干激光束以发生CPT现象。文中分析了CPT原理对调制信号的频率要求,采用锁相环(PLL)频率合成方案基于ADF4106产生所需的3.4 GHz调制信号,频率可靠稳定,相位噪声低,杂散性好,可以满足

^{87}Rb 原子CPT磁力仪对调制信号的要求。

参考文献

- [1] 路红山,张京伟,李四娣,等. 新概念潜艇及其技术展望[J]. 中国舰船研究,2008,3(3):78-80.
- [2] Inouchi M, Kubota M, Ohta K, et al. Neuromagnetic mismatch field (MMF) dependence on the auditory temporal integration window and the existence of categorical boundaries: Comparisons between dissyllabic words and their equivalent tones [J]. Brain Research, 2008, 1232:155-162.
- [3] 韩颖琳,姚志剑. 脑磁图在精神疾病中的应用进展[J]. 中国神经精神疾病杂志,2008,34(9):572-574.
- [4] 白春华,徐文耀,康国发. 地球主磁场模型[J]. 地球物理学进展,2008,23(4):1045-1057.
- [5] Carreon H. Fretting damage assessment in Ti-6Al-4V by magnetic sensing [J]. WEAR, 2008, 265:255-260.
- [6] 董浩斌,张昌达. 量子磁力仪再评说[J]. 工程地球物理学报,2010,7(4):460-469.
- [7] Alzetta G, Gozzini A, Moi L, et al. Nonabsorbing atomic coherences by coherent two-photon transitions in a three-level optical pumping[J]. Nuovo Cimento B, 1976, 36: 1-5.
- [8] Arimondo E. Coherent population trapping in laser spectroscopy[J]. Progress in Optics, 1996, 35(10):257-354.
- [9] Dalton B J, Knight P L. Coherent population trapping and the effect of laser phase fluctuations[J]. Laser Physics, 1983: 213-225.
- [10] Vanier J, Levine M, Janssen D. Coherent population trapping passive frequency standard[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003, 52(2):258-262.
- [11] 李琦.相干粒子数俘获磁力仪的研究[D]. 长春:吉林大学,2011:17-29.
- [12] Phillips D F, Novikova I, C Y-T Wang, et al. Modulation-induced frequency shifts in a coherent-population-trapping-based atomic clock[J]. Opt. Soc. Am. B, 2005, 22(2):305.
- [13] 雷振亚. 射频/调制电路导论[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2006:169-173.
- [14] 万琰.基于单片机控制的ADF4106锁相环频率合成器设计[J]. 电子元器件应用,2009,11(6): 30-32.