基于光弹调制的原子磁强计中光信号检测方法

张晓莉,全 伟

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

摘 要:在无自旋交换弛豫原子磁强计中,需要检测极小的旋光角度。基于光弹调制器的偏振调制技术由于其较低的噪声和长时间的稳定性在各种检测方法中是优选的。但光弹调制器的输出信号里包含有大量噪声和高次谐波,严重影响了原子磁强计的性能。针对以上问题分析了基于光弹调制器的偏振调制技术的原理和待检测信号的特性,并提出一种基于双通道数字锁相放大器的原子磁强计微弱信号检测方法。该方法简化锁相放大算法,减小电路复杂度,并能准确地同时检测一次谐波和二次谐波的幅值。理论分析和仿真结果表明,该检测系统工作良好,可以准确地检测微弱信号,误差在 0.1%以内。

关键词:光信号检测; 原子磁强计; 激光器应用

中图分类号:TN206 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.0817001

Optical signal detection method based on the photoelastic modulation in the atomic magnetometer

Zhang Xiaoli, Quan Wei

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In the spin exchange relaxation free (SERF) atomic magnetometer, it is necessary to detect an extreme small optical rotation angle. Among various methods for detecting the rotation angle, the polarization modulation technique based on a photoelastic modulator (PEM) is preferred because it features lower noise and better stability at long-time scales. However, the output signal of the photoelastic modulator contains much noise and high-order harmonics, which seriously affects the performance of the atomic magnetometer. The principle of polarization modulation technique based on photoelastic modulator and the characteristics of the detected signal were analyzed. And a dual channel digital lock-in amplifier to detect the weak signal from the atomic magnetometer was proposed. This method simplified the lock-in algorithm, reduced the complexity of the circuit and accurately detected the amplitudes of the first harmonic and the second harmonic. Theoretical analysis and simulation results show that the detection system works well and detects weak signals accurately, and the simulation error is less than 0.1%.

Key words: optical signal detection; atomic magnetometers; laser applications

收稿日期:2018-03-05; **修订日期**:2018-04-03

基金项目:国家自然科学基金委重大仪器专项(61227902)

作者简介:张晓莉(1991-),女,硕士生,主要从事微弱信号处理方面的研究。Email:zhangxiaoli@buaa.edu.cn

导师简介:全伟(1977-),男,副教授,博士生导师,博士,主要从事基于激光抽运及检测的原子惯性与磁场测量技术方面的研究。Email:quanwei@buaa.edu.cn

0 引 言

基于原子自旋效应可实现超高灵敏磁场测量,在军事、生物学、地质学、基础物理研究等多个领域具有广泛应用前景[1-3]。无自旋交换弛豫原子磁强计基于旋光效应来测量磁场。当检测激光通过碱金属气室时,在外界磁场的作用下,偏振面发生旋转,测量旋转角度,可以计算磁场。在各种检测旋转角度的方法中,基于光弹调制器(Photoelastic Modulator,PEM)的偏振调制技术由于其具有较低的噪声和长时间的稳定度,在各种检测旋光角度的方法中是优选的[4-5]。在偏振调制中,激光束被偏振器线性偏振,然后进入碱金属气室。偏振光与原子自旋进动相互作用,使得线偏振面旋转角度 θ。光弹调制器引入具有振幅 (调制深度)α_m=0.08 rad 的时变双折射。光强由光电检测器检测,然后其输出信号进入锁相放大器 (Lock-in Amplifier,LIA)进行处理[6-11]。待测信号包含直流分量、一次谐波分量(相对于调制频率 ω)、二次谐波分量、高次谐波分量以及大量噪声。为了获得原子磁强计的旋光角度,应检测一次谐波分量的幅值。但除旋光角度外,谐波分量的振幅还包含其他参数, 例如光电转换效率、光强度等。这些参数的不稳定性可导致测量旋转角度不准确。参考文献[4]提出一种基于二次谐波分量检测旋光角度的方法,使用步进电机、可变零级半波片等构成光强稳定闭环电路,使用锁相放大器同时测量一次谐波和二次谐波的幅值,用二次谐波的幅值作为反馈信号送入步进电机,消除激光源的强度波动,并消除由环境引起的光学部件的波动,从而提高旋光角度的检测精度和稳定度。

文中针对基于光弹调制器器的偏振调制技术,提出一种双通道锁相放大器来同时检测一次谐波和二次谐波分量的幅值。通过在输入信号通道中增加带宽适当的带通滤波器和改进相关解调运算过程,在简化锁相放大算法的同时, 完成对一次谐波和二次谐波的同时检测,并减小电路复杂度,有利于原子磁强计小型化和集成化的研制。理论分析和仿真结果表明,该检测方法结构简单,稳定性较强,检测误差小于 0.1%,能很好地同时检测待测信号中的一次谐波分量和二次谐波分量的幅值。

1 基于光弹调制器的偏振调制系统

原子磁强计中, 基于光弹调制器的偏振调制系统如图 1 所示,经过检偏器(Analyzer)输出的光强被光电探测器转换为电信号,其表达式为:

$$I=I_0\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\sin\omega t+\theta\right) \tag{1}$$

式中:θ 为线偏振光与原子自旋进动发生相互作用使得线偏振面旋转的角度;δ 为交变光弹调制旋转的幅度;I_0 为检测激光的光强;ω 为 PEM 的正弦调制角频率。对公式(1)做频谱分析,其结果如图 2 所示。

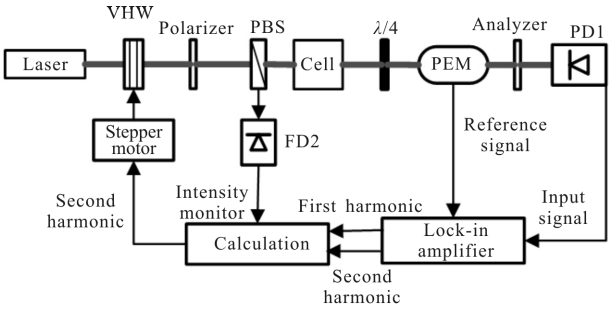

图 1 基于 PEM 的偏振调制系统

Fig.1 Polarization modulation system based on the PEM

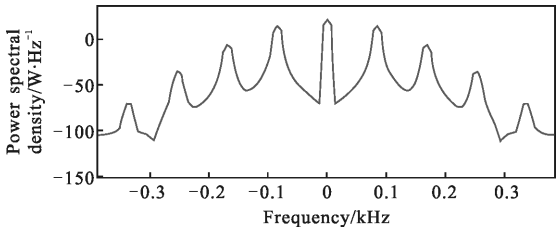

图 2 待测信号的频谱分析

Fig.2 Power spectral analysis of the detected signal

由图 2 可知, 待测信号里含有大量的噪声和高次谐波, 因此需要使用锁相放大器来进行微弱信号检测,从而得到旋光角度。

2 基于光弹调制的双通道锁相放大器

2.1 锁相放大器工作原理

锁相放大器基于互相关检测技术, 利用参考信号和待测信号中的有效信号相关, 而与噪声无关的特性,实现微弱信号检测[9-13]。传统的数字锁相放大器采用了正交检测法,其输入信号如下式所示:

$$x(t)=V(\sin\omega t+\theta)+n(t) \tag{2}$$

式中:$n(t)$为噪声;ω 为待测信号的角频率;θ 为待测信号的初始相位。

参考信号为两路正交信号,通常为正弦和余弦。

参考信号和待测信号分别相乘，得到直流分量和交流分量，如公式(3)所示。

$$\begin{cases} I(t)=x(t)\times s(t)=\dfrac{V}{2}[\cos\theta-\cos(2wt+\theta)] \\ Q(t)=x(t)\times c(t)=\dfrac{V}{2}[\sin\theta+\sin(2wt+\theta)] \end{cases} \tag{3}$$

低通滤波器滤除交流分量，保留含有待测信号的幅值和相位信息的直流分量，并通过进一步的运算得到待测信号的幅值和相位，如公式(4)所示。

$$V=2\sqrt{I^2+Q^2}\ ,\ \theta=\arctan\frac{Q}{I} \tag{4}$$

传统锁相放大器的原理框图如图 3 所示，输入信号经过低通滤波器之后进行解调，解调模块由乘法器和低通滤波器组成。

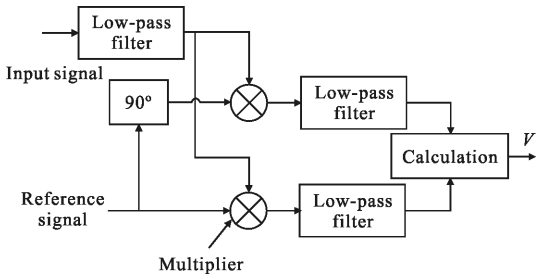

图 3 传统锁相放大器的原理框图

Fig.3 Schematic diagram of the traditional lock-in amplifier

2.2 双通道锁相放大器

根据锁相放大器的工作原理，若同时检测两个不同频率的信号时，则需要四路参考信号，进行四路乘法运算，这大大增加了电路的复杂性。

基于光弹调制器的偏振调制系统中，需要进行一次谐波分量和二次谐波分量的检测，其角频率分别为 ω 和 2ω。设置参考信号频率为 ω，则相对于一次谐波，通过乘法器和低通滤波器可顺利检测到信号幅值。相对于二次谐波，和参考信号相乘会得到两个交流分量，其频率分别为 ω 和 3ω。乘法结果如下式所示：

$$\begin{cases} I(t)=x(t)\times s(t)=\dfrac{V_1}{2}[\cos\theta_1-\cos(2wt+\theta_1)]+ \\ \qquad \dfrac{V_2}{2}[\cos(wt+\theta_2)-\cos(3wt+\theta_2)] \\ Q(t)=x(t)\times c(t)=\dfrac{V_1}{2}[\sin\theta_1+\sin(2wt+\theta_1)]+ \\ \qquad \dfrac{V_2}{2}[\sin(wt+\theta_2)+\sin(3wt+\theta_2)] \end{cases} \tag{5}$$

式中：V_1 和 θ_1 是待测信号中一次谐波分量的幅值和相位；V_2 和 θ_2 是待测信号中二次谐波分量的幅值和相位。

由于基于光弹调制器的偏振检测系统只需要检测一次谐波分量和二次谐波分量的幅值，所以在这里不考虑相位的检测。

中心频率为 ω 的带通滤波器可以滤除直流分量以及不需要的交流分量，仅保留频率为 ω 的分量。如图 4 所示，乘法器的结果分别通过低通滤波器和带通滤波器，得到的结果如下：

$$I_1(t)\approx\frac{V_1}{2}\cos\theta_1,\ Q_1(t)\approx\frac{V_1}{2}\sin\theta_1 \tag{6}$$

$$I_2(t)\approx\frac{V_2}{2}\cos(wt+\theta_2),\ Q_2(t)\approx\frac{V_2}{2}\sin(wt+\theta_2) \tag{7}$$

根据公式(4)进行计算，可以分别得到一次谐波分量和二次谐波的幅值，完成对输入信号的检测。

图 4 是双通道锁相放大器的原理框图。由于输入信号中存在直流分量和大量高次谐波，所以在进行相关解调前，先引入带通滤波器滤除不必要的交流分量和直流分量。否则，直流分量和参考信号相乘后，也会生成频率为 ω 的交流分量，从而引入了误差，造成测量结果不准确。如图 4 所示，和传统锁相放大器相比，文中提出的双通道锁相放大器只需要一个频率的参考信号和两个乘法器，就能同时实现对待测信号中一次谐波幅值和二次谐波幅值的检测，大大简化了运算过程，也减少了电路的复杂度，为原子磁强计的小型化和集成化打下基础。

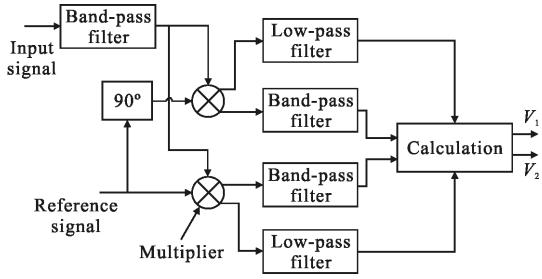

图 4 双通道锁相放大器原理框图

Fig.4 Schematic diagram of the proposed dual-channel LIA

3 仿真实验

为验证所提算法的有效性，基于 MATLAB/Simulink 进行了仿真实验。仿真模型如图 5 所示，输入信号为含有大量随机噪声和直流信号的多频复合信号。根据光弹调制器的特性，设置调制频率 ω 为

50 kHz,则输入信号中一次谐波、二次谐波和三次谐波的频率分别为 50、100、150 kHz，其幅值分别设置为 1、0.5、0.5 V,直流信号设置为 1 V,输入信号的波形如图 6 所示。

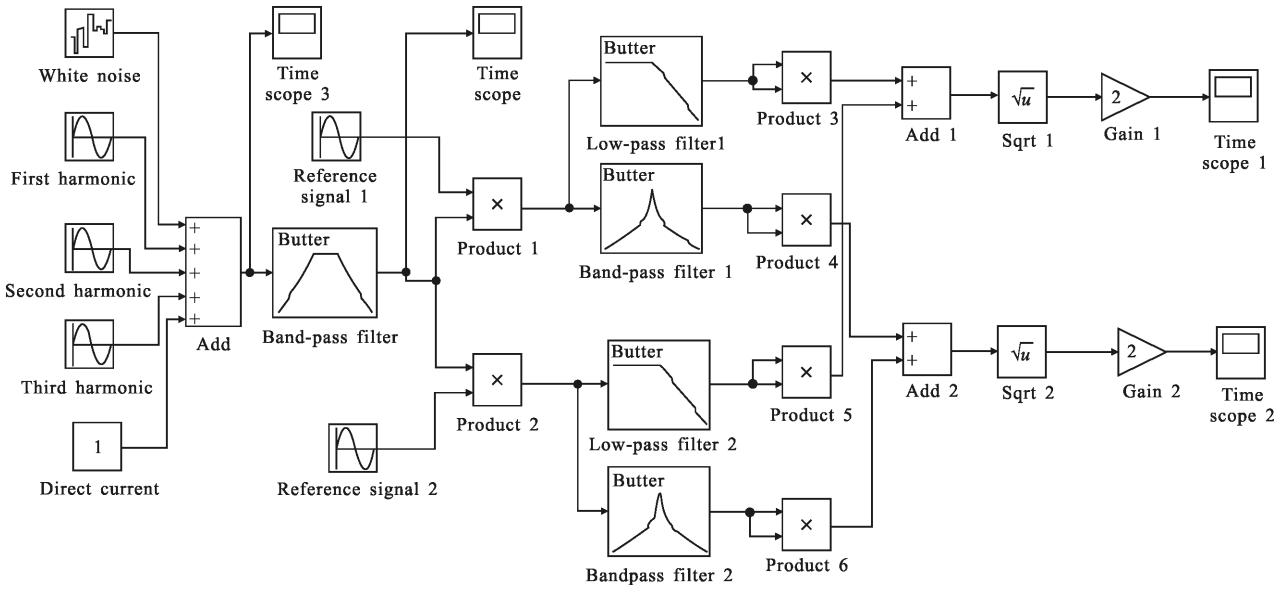

图 5 双通道锁相放大器的 Simulink 模型

Fig.5 Simulink model of the proposed dual-channel LIA

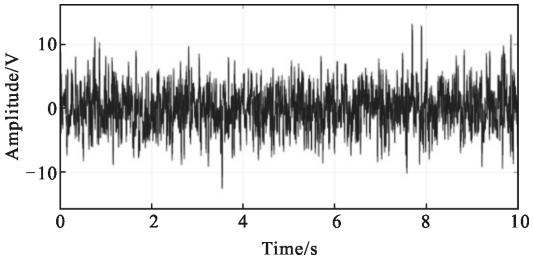

图 6 输入信号

Fig.6 Input signal

进行解调运算前，输入信号通道的带通滤波器的通带频率根据调制频率设置为 30~100 kHz。则输入信号经过带通滤波器后，滤除了直流分量和三次谐波,保留了一次谐波和二次谐波,如图 7 所示。

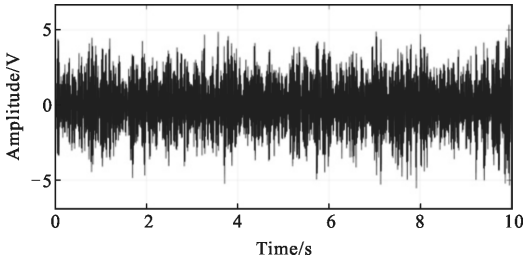

图 7 经过带通滤波器后的输入信号

Fig.7 Input signal after the band-pass filter

解调模块的低通滤波器和带通滤波器均设置为巴特沃斯型，低通滤波器的截止频率设置为 30 Hz，带通滤波器的中心频率为 50 kHz,带宽为 1 kHz。对滤波器的输出结果进行运算,锁相放大器的输出结果如图 8 和图 9 所示。仿真结果表明,文中提出的锁相放大算法能很好地同时检测出输入信号的一次谐波分量和二次谐波分量的幅值,其结果误差小于 0.1%。

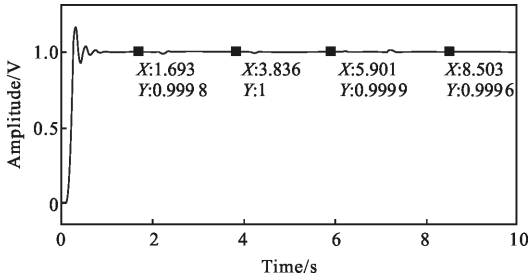

图 8 一次谐波的幅值

Fig.8 Amplitude of the first harmonic

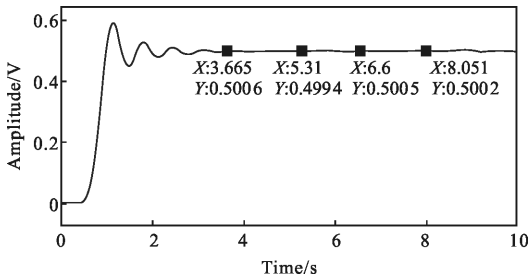

图 9 二次谐波的幅值

Fig.9 Amplitude of the second harmonic

4 结 论

针对原子磁强计中旋光角度的检测，从基于光弹调制的偏振调制技术的原理入手，分析了待测光信号的成分和特性，重点在微弱信号处理与检测方面展开了研究,提出了一种双通道锁相放大器,完成对待测信号中一次谐波幅值和二次谐波幅值的同时检测。所提出的双通道锁相放大器简化了算法,在检测二次谐波分量幅值时，使用带通滤波器代替低通滤波器，仅使用一个频率的参考信号和两个乘法器完成对待测信号中一次谐波分量和二次谐波分量幅值的同时检测,简化电路,为未来原子磁强计的小型化和集成化打下基础。仿真结果表明,所提双通道锁相放大器的两个输出通道结果的误差均小于 0.1%,在实现功能的同时,保证检测精度。

参考文献:

[1] Quan W, Wei K, Li H. Precision measurement of magnetic field based on the transient process in a K-Rb-21Ne co-magnetometer[J]. ***Optics Express***, 2017, 25(8): 8470-8483.

[2] Quan W, Li Y, Liu B. Simultaneous measurement of magnetic field and inertia based on hybrid optical pumping [J]. ***Europhysics Letters***, 2015, 110(6): 60002.

[3] Chu Zhongyi, Sun Xiaoguang, Wan Shuangai, et al. Experiment on active magnetic compensation of atomic magnetometer for space exploration [J]. ***Acta Aeronautica et Astronautica Sinica***, 2014, 35(9): 2522-2529. (in Chinese)

[4] Duan L, Fang J, Li R, et al. Light intensity stabilization based on the second harmonic of the photoelastic modulator detection in the atomic magnetometer [J]. ***Optics Express***, 2015, 23(25): 32481.

[5] Zhang Qiao, Li Shuang, Liu Qiang. Calibration of retardance deviation for DOLP measurement based spatial modulating spectropolarimeter[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(11): 1117008. (in Chinese)

[6] Liu Zhaoyang, Liu Liyuan, Wu Nanjian. Imaging system based on CMOS terahertz detector [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(1): 0125001. (in Chinese)

[7] Wang Yuzhao, Teng Lin, Sun Xiangzheng. Quality factor measurement of vacuum-packaged microgyroscopes[J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2014, 22(10): 2708-2714. (in Chinese)

[8] Cong Menglong, Sun Dandan, Wang Yiding. Application of logarithmic transformed-wavelength modulation spectroscopy in gas detection [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(2): 0223001. (in Chinese)

[9] Wang Xijun, Su Shaochang. Fast aging experiment of EO chromophore stability of dopant polyquinoline polymers [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2011, 19(2): 387-391. (in Chinese)

[10] Wu Jing, Wu Hanping, Huang Junbin, et al. Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors [J]. ***Chinese Journal of Optics***, 2014, 7(4): 519-531. (in Chinese)

[11] Guo Lijun, Ning Liang, Kong Mei, et al. Demodulation characteristics of resonator integrated optical gyro[J]. ***Chinese Journal of Optics***, 2014, 7(4): 651-656. (in Chinese)

[12] Wang J, Wang Z, Ji X, et al. A simplified digital lock-in amplifier for the scanning grating spectrometer [J]. ***Review of Scientific Instruments***, 2017, 88(2): 023101.

[13] Sonnaillon M O, Bonetto F J. A low-cost, high-performance, digital signal processor-based lock-in amplifier capable of measuring multiple frequency sweeps simultaneously [J]. ***Review of Scientific Instruments***, 2005, 76(2): 466.

[14] Chleck D. Improving the resolution of lock-in measurements by tailoring the modulation [J]. ***Measurement Science & Technology***, 2013, 24(10): 1366-1374.