

文章编号: 1001-3806(2014)05-0665-04

基于 FPGA 数字相位调制光外差激光稳频系统设计

耿伟彪, 胡姝玲*, 邵洪峰

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 惯性技术重点实验室, 北京 100191)

摘要: 为了实现中心波长为 1064nm 的单频光纤激光器的稳频, 采用相位调制光外差 (PDH) 激光稳频技术, 搭建稳频系统光路。分析了相位调制光外差稳频信号以及误差信号特征; 设计基于现场可编程门阵列 (FPGA) 的数字式解调和反馈控制电路, 在 FPGA 中实现对相位调制光外差稳频信号的数字解调, 再经数模转换器输出获得误差信号。结果表明, 在 FPGA 中能成功实现对相位调制光外差信号的解调, 经 Allan 方差计算, 频率漂移的方差值可达 10^{-11} , 即所设计的数字系统实现了较高的稳频精度。

关键词: 激光器; 稳频; Pound-Drever-Hall 技术; 现场可编程门阵列; 数字解调

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.05.019

Design of laser frequency stabilization systems based on FPGA and Pound-Drever-Hall technique

GENG Weibiao, HU Shuling, SHAO Hongfeng

(Science and Technology on Inertial Laboratory, School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to stabilize the output frequency of 1064nm single frequency fiber laser, the Pound-Drever-Hall (PDH) locking technique was applied for laser frequency stabilization. The PDH optical heterodyne frequency stabilization system was established. The phase modulation optical heterodyne signal and the demodulation error signal were analyzed. Field-programmable gate array (FPGA) based digital PDH demodulation and feedback control system was designed. A sine wave generator and the multiplication demodulation were implemented in FPGA. Then the error signals were obtained by digital/analog convector. Experimental results show that phase modulation optical heterodyne signal is demodulated successfully in FPGA, and the Allan variance of frequency drifts can reach 10^{-11} , a high level of frequency stabilization.

Key words: lasers; frequency stabilization; Pound-Drever-Hall technique; field-programmable gate array; digital demodulation; digital demodulation

引 言

窄线宽激光器作为现代科学技术重要标志之一, 已经在高分辨率光谱学^[1]以及精密干涉测量^[2]等诸多领域得到了广泛的应用。在激光的众多应用领域当中, 激光频率稳定度是一个极其重要的参量。因此, 随着激光应用的发展, 激光稳频技术已经成为基础科学研究的重要工具, 也是尖端科学的关键组成部分, 在现代科学技术中发挥着越来越重要的作用。

激光稳频技术主要分为被动稳频和主动稳频^[3]技术两种, 它是激光物理学、光谱学和电子学高度结合的产物。在众多的激光稳频技术当中, 相位调制光外差^[4] (Pound-Drever-Hall, PDH) 技术是一种高性能的激光稳频技术, 它以法布里-珀罗^[5] (Fabry-Perot, F-P) 腔作为参考标准频率。采用射频电光相位调制技术和 F-P 腔光外差光谱技术, 鉴频得到与激光频率和参考标准频率之差成比例的误差信号, 将此误差信号反馈到激光器的频率调谐端口, 抑制激光频率的波动, 将激光频率锁定到 F-P 腔标准频率上。

传统的 PDH 稳频系统都是采用模拟器件实现误差信号的解调以及反馈控制, 模拟器件不可避免地会带有一些噪声, 如 $1/f$ 噪声^[6] (f 为信号频率),

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61074158)

作者简介: 耿伟彪 (1987-), 男, 硕士研究生, 现主要从事微波光子学、激光稳频技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: hulxi@buaa.edu.cn

收稿日期: 2013-09-06; 收到修改稿日期: 2013-10-17

会影响稳频系统精度的提高。随着数字信号处理技术的飞速发展,采用数字电路实现 PDH 稳频系统已经成为研究的热门趋势。本文中根据对 PDH 稳频系统原理的分析,设计基于现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 的数字信号解调及反馈控制系统。

1 PDH 稳频原理

PDH 稳频系统^[7]原理如图 1 所示。

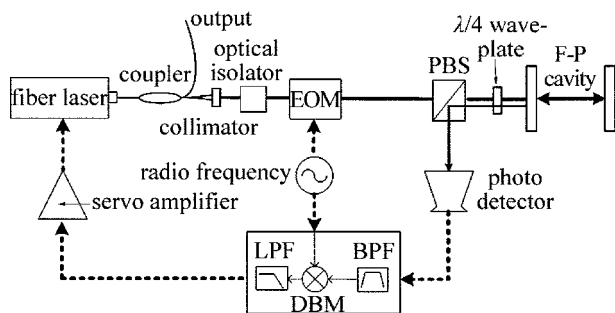


Fig. 1 The basic setup of PDH system, BPF—band pass filter; LPF—low pass filter; DBM—double balanced mixer

设电光调制器 (electro-optic modulator, EOM) 入射光电场 E 为:

$$E = E_0 \exp(j\omega_c t) \quad (1)$$

式中, E_0 为振幅, t 为时间, ω_c 为光载波角频率。当光束透过 EOM 之后, 偏振光分束器 (polarizing beamsplitter, PBS) 入射的光场 E_{inc} 为:

$$E_{inc}(t) = E_0 \exp \{ j[\omega_c t + \beta \sin(\Omega t)] \} \quad (2)$$

式中, Ω 是相位调制频率, β 为调制深度。当 $\beta \leq 1$ 时, (2) 式用贝塞尔^[8]公式展开为:

$$E_{inc}(t) \approx E_0 [J_0(\beta) + 2jJ_1(\beta) \sin(\Omega t)] e^{j\omega_c t} = E_0 [J_0(\beta) e^{j\omega_c t} + J_1(\beta) e^{j(\omega_c + \Omega)t} - J_1(\beta) e^{j(\omega_c - \Omega)t}] \quad (3)$$

式中, $J_0(\beta)$ 和 $J_1(\beta)$ 为贝塞尔函数系数。(3) 式表明, PBS 的入射光束实际上包含 3 种成分: 频率为 ω_c 的光载波和频率为 $\omega_c \pm \Omega$ 的两个调制边带^[9]。

高速光电探测器探测的反射光束为:

$$E_{ref}(t) = E_0 [J_0(\beta) F(\omega_c) e^{j\omega_c t} + J_1(\beta) F(\omega_c + \Omega) e^{j(\omega_c + \Omega)t} - J_1(\beta) F(\omega_c - \Omega) e^{j(\omega_c - \Omega)t}] \quad (4)$$

式中, $F(\omega_c)$ 是 F-P 腔反射系数。反射光在探测器处发生拍频干涉, 探测器输出的信号 P_{ref} 为:

$$P_{ref} = |E_{ref}|^2 = P_c |F(\omega_c)|^2 + P_s [|F(\omega_c + \Omega)|^2 + |F(\omega_c - \Omega)|^2] + 2\sqrt{P_c P_s} \{ \text{Re}[F(\omega_c) F^*(\omega_c + \Omega) - F^*(\omega_c) F(\omega_c - \Omega)] \cos(\Omega t) + \text{Im}[F(\omega_c) F^*(\omega_c + \Omega) - F^*(\omega_c) F(\omega_c - \Omega)] \sin(\Omega t) \} \quad (5)$$

式中, P_c 为载波光功率, P_s 为边带光功率, F^* 代表复数的共轭, Re 和 Im 分别代表复数的实部和虚部。探测器输出信号包含 3 种成分: 直流项; 频率为 Ω 的项 (由载波和边带拍频干涉形成); 频率为 2Ω 的项 (由两个边带拍频干涉形成)。(5) 式中已经忽略频率为 2Ω 的项。

当载波频率接近 F-P 腔谐振频率, 载波全部耦合进 F-P 腔, 有 $|F(\omega_c)|^2 \approx 0$ 。当调制频率足够高, 两个边带全部反射时, $F(\omega_c \pm \Omega) \approx -1$, (5) 式中 $\cos(\Omega t)$ 项可忽略, 则 (5) 式可表示为:

$$P_{ref} = 2P_s - 4\sqrt{P_c P_s} \text{Im}[F(\omega_c)] \sin(\Omega t) \quad (6)$$

探测器输出信号经过滤波器和双平衡混频器, 得到用于反馈控制的误差信号 e 为:

$$e = -4\sqrt{P_c P_s} \text{Im}[F(\omega_c)] \quad (7)$$

如图 2 所示, 横坐标为 ω_c 与参考腔自由光谱范围 $\Delta\nu_f$ 的比值。

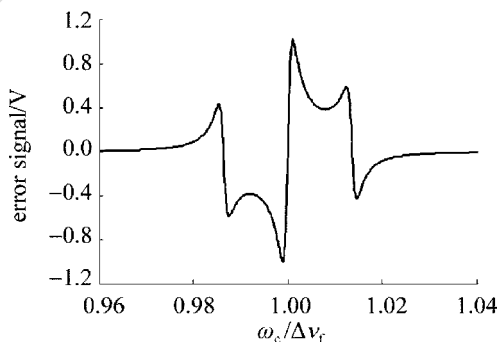


Fig. 2 PDH error signal

2 数字 PDH 系统

2.1 系统硬件设计

将数字信号处理技术应用到主动激光稳频当中, 不但可以使系统具有更强的灵活性, 还可以实现稳频系统的远程调控以及自动化控制, 数字 PDH 激光稳频系统如图 3 所示。

F-P 腔反射光信号经探测器转变为电信号后, 由高速模数转换器 (analog to digital converter, ADC) 转换为数字信号, 采样频率必须满足采样定理^[10]。采样信号在 FPGA 中实现数字滤波和数字解调算法, 获得数字误差信号。误差信号经由数字比例-积分-微分 (proportional-integral-differential, PID) 控制器处理之后获得数字激光频率调谐信号, 此信号由

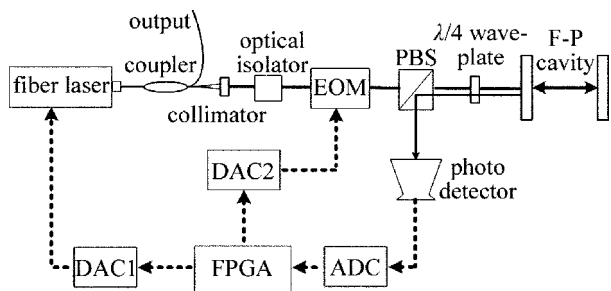


Fig. 3 Digital PDH setup

高速数模转换器 (digital to analog converter, DAC) 转换为模拟信号, 作用于激光器的频率调谐端口, 实现激光器的稳频控制。系统中 DAC2 将 FPGA 内部输出的数字正弦信号转换为模拟信号作为 EOM 的驱动信号。

2.2 软件设计

数字滤波、乘法解调以及 PID 控制是在 FPGA 中实现的, FPGA 是一款可以进行高速数字信号处理的数字芯片, 可以实现复杂、精确的滤波, 也可以实现低延时、高带宽的反馈控制。系统中 FPGA 内部实现的功能如图 4 所示。

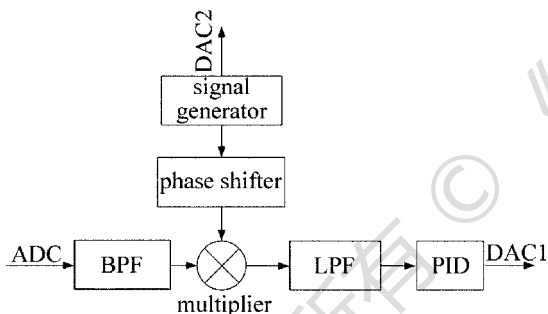


Fig. 4 Functions implemented in FPGA

探测器输出信号经 ADC 采样之后, 在 FPGA 内部首先经过中心频率为调制频率的 BPF。通过调用无限脉冲响应滤波器 (finite impulse filter, FIR) 知识产权 (intellectual property, IP) 核进行编程开发。乘法解调采用 FPGA 内的硬核乘加器实现, 通过调用乘加器 IP 核即可实现。

通过调用直接频率合成 (digital frequency synthesize, DDS) IP 核实现一个相位可调的正弦信号发生器, 经数字移相器为乘法解调提供参考信号, 同时输出 FPGA 作为 EOM 的驱动信号, 数字移相器也通过调用 DDS IP 核实现。乘法解调之后输出的信号经过低通滤波器 (low pass filter, LPF) 滤除高频成分, 即得到想要的误差信号。LPF 也是通过调用 FIR IP 核来实现。

误差信号经过 PID 控制器处理后作用于激光器

调谐端口。数字 PID 控制器可通过虚拟仪器与 FPGA 的接口实现, 而且可多次重复编程直至满足系统要求。

3 实验结果

为了设计方案的可行性, 搭建稳频系统光路, 进行相位调制光外差光谱信号解调实验研究。实验中所用激光器为单频、分布反馈式光纤激光器, 波长为 1064nm, 输出功率 100.3mW, 线宽 100kHz。所用 F-P 腔自由光谱范围为 4.7GHz, 精细度常数为 950, 分辨率为 4.95MHz。调制器调制频率选为 100MHz。

探测器输出信号经模拟带通滤波器滤除直流项和二倍频项, 得到 100MHz 有用信号, 经 AD8352 差分放大器进行信号调理, 送给模数转换器进行模数转换。在 FPGA 中调用硬核乘加器实现乘法解调, 调节移相器, 用示波器观察数模转换器输出波形。

根据示波器存储的实验数据, 选取部分数据, 用 MATLAB 作图, 得到误差信号如图 5 所示。对示波器观察到的误差信号进行采样, 采样频率 25Hz, 采集时间 400s, 得到如图 6 所示的误差信号采样图。根据采样得到的数据, 利用 Allan 方差公式计算得到频率漂移的方差值为 1.01×10^{-11} 。

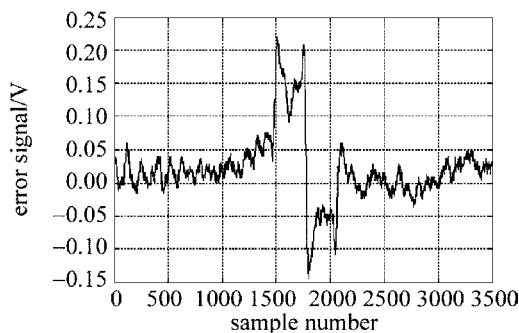


Fig. 5 Error signal

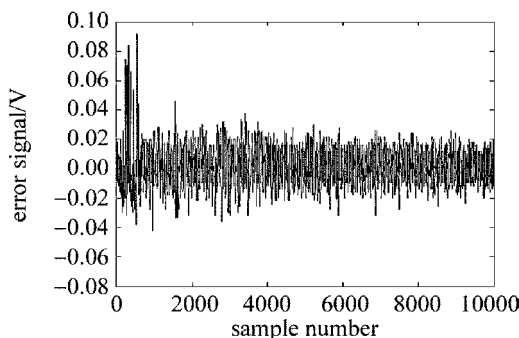


Fig. 6 Sampling data of error signal

4 结论

根据对相位调制光外差稳频信号的分析, 设计

基于 FPGA 的数字式 PDH 稳频系统,实验结果表明,采用数字电路可以成功实现对光外差信号的解调,长期频率稳定度可达 10^{-11} 。由于电路板布局布线设计所带来的噪声会对稳频精度产生影响,所以下一步要优化电路板的设计,进一步提高稳频精度。

参 考 文 献

- [1] YE J, MA L S, HALL J L. Ultrasensitive detections in atomic and molecular physics: demonstration in molecular overtone spectroscopy[J]. Journal of the Optical Society of America, 1998, B15(1): 6-15.
- [2] SUTTON A, SHADDOCK D A. Laser frequency stabilization by dual arm locking for LISA[J]. Physical Review, 2008, D78(8): 082001(1-7).
- [3] YUAN D D, HU S L, LIU H H, *et al.* Research of laser frequency stabilization[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 1-7 (in Chinese).
- [4] DREVER R W P, HALL J L, KOWALSKI F V, *et al.* Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. Applied Physics, 1983, B31(1): 97-105.
- [5] DAY T, GUSTAFSON E K, BYER R L. Sub-hertz relative frequency stabilization of two-diode laser-pumped Nd:YAG lasers locked to a Fabry-Perot interferometer[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(4): 1106-1117.
- [6] LAM T T Y, SLAGMOLEN B J J, CHOW J H, *et al.* Digital laser frequency stabilization using an optical cavity[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(8): 1178-1183.
- [7] BLACK E D. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. American Journal of Physics, 2001, 69(1): 79-87.
- [8] XING J H, JIAO M X, ZHENG Y, *et al.* Design of digital pound-drever-hall frequency stabilizing system for two-cavity dual-frequency Nd:YAG laser[J]. Proceedings of the SPIE, 2012, 8759: 411-417.
- [9] PENG Y X, LI W B, SHEN N C, *et al.* Application of modulation and demodulation of photo-electric signal frequency stabilization [C]//2004 7th International Conference on Signal Processing. New York, USA: IEEE, 2004, 1: 180-182.
- [10] WAKERLY J F. Digital design: principles and practices 4[M]. 4th ed. Englewood Cliffs, NJ, USA: Pearson Prentice-Hall, 2006: 18-21.