

相位调制光外差稳频信号检测技术

胡姝玲, 耿伟彪, 苑丹丹, 刘宏海, 马 静

(北京航空航天大学 惯性技术重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 在高功率条件下, 由于受到多种因素的影响, 单频光纤激光器输出激光的谱线宽度大幅展宽, 输出激光的稳定性也不高。相位调制光外差稳频(PDH)技术在高功率条件下可以实现高频率稳定性。为实现对中心波长为 1 064 nm 的单频光纤激光器的稳频, 理论分析了 PDH 稳频系统的原理并搭建 PDH 稳频系统。实验发现 100 MHz 相位调制光外差信号的检测是稳频系统的关键。实验中首先利用自行设计的探测器前置放大电路, 基于 Si 探测器, 实现了信号的探测和放大; 其次, 设计解调电路, 通过将光电转换后的信号与参考信号进行混频实现解调, 得到鉴频曲线, 实现对光外差信号的检测。

关键词: 光外差信号; 激光稳频; F-P 腔; PDH 技术

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0233-06

PDH frequency stabilization signal detection technology

Hu Shuling, Geng Weibiao, Yuan Dandan, Liu Honghai, Ma Jing

(Science and Technology on Inertial Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In high power condition, not only the linewidth of single frequency fiber laser becomes wider greatly, but also its frequency stability becomes worse because of effects of many factors. PDH frequency stabilization technology can be applied in high-power condition with high frequency stability. To realize stable output of high power 1 064 nm single frequency fiber laser, the principle of PDH frequency stabilization technology was analyzed and a PDH optical heterodyne frequency stabilization system was established. It is found that the key of the PDH system is the detection of 100 MHz phase modulation optical heterodyne signal. Firstly, the optical signal was detected and amplified by Si detector with self-designed preamplifier circuit. Secondly, demodulation circuit was designed and the amplified signal and a reference signal were mixed together with a mixer to realize demodulation, as a result, the frequency discrimination curve was obtained. This indicates that the detection of the optical heterodyne signal has been realized.

Key words: optical heterodyne signal; laser frequency stabilization; F-P cavity; PDH technology

收稿日期: 2012-05-22; 修订日期: 2012-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(61074158)

作者简介: 胡姝玲(1971-), 女, 副教授, 主要从事光纤激光器及放大器、微波光子学等方面的研究。Email: huxi@buaa.edu.cn

0 引言

随着激光技术研究的日新月异,无论在军事领域^[1]还是在民用领域,激光技术的应用都得到了飞速的发展,其中激光良好的相干性的应用促进了对激光频率控制的研究^[2]。激光的频率控制主要分为被动稳频和主动稳频。被动稳频即对激光器腔长的被动稳定,是最简单的实现频率稳定的一种方法。然而,在实际中被动稳定带来复杂的机械结构,包括材料要求高和频率稳定所要求的恒温罩和温度稳定装置复杂。在越来越复杂的光学腔中,这些技术的实现变得越来越困难。主动稳频通常采用兰姆凹陷、饱和吸收、声光盒和斯塔克效应等等几种方法,因兰姆凹陷、饱和吸收峰等的宽度都比较窄,故频率跟踪控制系统的工作范围相对也比较小,为了使系统不失锁,需要极其稳定的环境温度和超静工作间,同时,它的稳频控制系统体积庞大,相对频率控制只需要控制从属激光的频率使它与参考激光或信号激光之间有一个明确的关系。

多年来科学家们不断地研究各种提高激光频率稳定性和有实用价值的主动稳频技术。其中,Drever和Hall等人受到Pound的微波稳频系统^[3]的启发,提出利用Fabry-Perot标准具^[4]的相位特性进行激光稳频,即相位调制光外差稳频技术(Pound-Drever-Hall简称PDH)稳频^[5]。其原理是激光器输出激光经位相调制后入射F-P腔,其反射光到达探测器,经适当放大后和调制信号一起输入混频器进行混频解调,得到具有良好鉴频特性的色散型谱线,以及鉴频得到激光的频率与F-P腔共振频率的误差信号,通过伺服系统来控制激光的腔长,进而改变激光的频率,将激光频率锁定在光学谐振腔的共振频率上。因此系统的频率稳定性主要由F-P腔长变化,探测器噪声和伺服控制系统的控制精度决定。

该技术的优点在于:(1)由于F-P腔可以具有极高的Q值,能满足窄线宽激光稳频的要求;(2)可用来稳频大功率激光器;(3)由于对激光进行射频调制,所以它能避开激光幅度噪声的影响,可以达到散粒噪声的极限。在高功率的条件下,不仅光纤激光器输出的光谱谱线宽度大幅度展宽,同时激光输出的稳定性也不高,而相位调制光外差稳频(PDH)技术

因频率稳定度高,同时能够达到较高的调制频率而被广泛应用。文中围绕基于F-P腔的相位调制光外差稳频,通过实验研究,重点是相位调制光外差信号的检测,这也是整个稳频系统的关键。在实验中利用Si探测器,根据信号需求设计了探测器前置放大电路和解调电路。由于输入信号为高频小信号,在电路的设计过程中重点考虑了放大倍数、响应带宽和电磁屏蔽等问题,并进行实验验证,获取稳频系统鉴频曲线,得到频率误差信号。

1 相位调制光外差稳频系统

图1为相位调制光外差稳频原理框图。单频光源输出的光经电光相位调制器(EOM)进行相位调制,产生分布在激光频率 ω_c 两侧、幅度相等但相位相反的两个边带^[6] $\omega_c \pm \omega_m$ 本征振荡作为EOM的驱动源,同时作用于混频器同步解调误差信号。当激光频率发生变化,偏离标准频率时,两个边带经过法珀标准具反射后振幅和相位形成不等变化,拍频信号不能完全抵消,探测器上会输出一个频率为调制频率的信号,经过混频器解调以后得到激光频率波动信号,该信号被伺服放大后作用于激光器控制系统,从而将激光频率锁定在法珀标准具上。

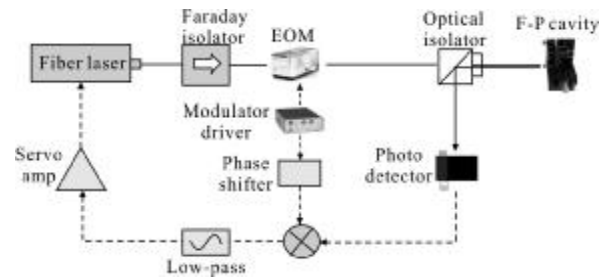


图1 相位调制光外差稳频原理框图

Fig.1 Schematic of the PDH frequency stabilization system

2 相位调制光外差信号

PDH稳频技术避开了光频率调制带来的大部分缺点,能够在较高频率上实现误差信号的检测,因为在高频时系统的噪声远远低于低频噪声,其误差信号具有高信噪比和大获得带宽。

单频激光经过EOM调制后的光场为:

$$E(t) = E_0 e^{i(\omega_c t + \beta \sin \omega_m t)} \quad (1)$$

式中: ω_c 为入射激光的角频率; ω_m 为电光相位调制器的调制频率; β 为调制度。

利用贝塞耳函数将公式(1)在频域展开,当调制度 $\beta < 1$ 时,可取一阶近似:

$$E(t) \approx E_0[J_0(\beta) + 2iJ_1(\beta)\sin\omega_0 t]e^{j\omega_c t} = E_0[J_0(\beta)e^{j\omega_c t} + J_1(\beta)e^{j(\omega_c + \omega_0)t} - J_1(\beta)e^{j(\omega_c - \omega_0)t}] \quad (2)$$

根据无损谐振腔的反射系数和输出反射光场关系,得到 F-P 标准具的反射光场为:

$$E_{ref}(t) = E_0[J_0(\beta)F(\omega_c)e^{j\omega_c t} + J_1(\beta)F(\omega_c + \omega_0)e^{j(\omega_c + \omega_0)t} - J_1(\beta)F(\omega_c - \omega_0)e^{j(\omega_c - \omega_0)t}] \quad (3)$$

因此,反射光束经过偏振分束,入射到探测器,经外差探测的反射光功率为:

$$P_{ref} = P_c |F(\omega_c)|^2 + P_s [|F(\omega_c + \omega_0)|^2 + |F(\omega_c - \omega_0)|^2] + 2\sqrt{P_c P_s} \{ \text{Re}[F(\omega_c)F^*(\omega_c + \omega_0) - F^*(\omega_c)F(\omega_c - \omega_0)] \cos\omega_0 t - \text{Im}[F(\omega_c)F^*(\omega_c + \omega_0) - F^*(\omega_c)F(\omega_c - \omega_0)] \sin\omega_0 t \} + (2\omega_0 \text{ terms}) \quad (4)$$

式中: $P_c = J_0^2(\beta)P_0$ 为载波光功率; $P_s = J_1^2(\beta)P_0$ 为一阶边带光功率; $\cos\omega_0 t$ 项反应腔的吸收特性 ($\omega \ll \Delta\nu$); $\sin\omega_0 t$ 项反应腔的色散特性 ($\omega \gg \Delta\nu$)。

光电流信号经过滤波放大等调理环节后输入到混频器 RF 端口,解调得到的信号为:

$$e = -2A\sqrt{P_c P_s} \text{Im}[F(\omega_c)F^*(\omega_c + \omega_0) - F^*(\omega_c)F(\omega_c - \omega_0)] \quad (5)$$

其中, A 为相关检测电路幅度增益。

在 F-P 腔的近谐振状态,同时调制频率约为谐振腔线宽的 20 倍以上,经过近似得到误差信号为:

$$e = -2A\sqrt{P_c P_s} \text{Im}[F(\omega_c)] \quad (6)$$

当激光频率处于 F-P 腔近谐振状态时,由谐振腔的精细度及反射系数,得到误差信号为:

$$e = -\frac{4A}{\pi} \sqrt{P_c P_s} \frac{\delta\omega}{\Delta\nu} \quad (7)$$

将固有频率 $f = \omega/2\pi$ 代替圆周频率 ω ,误差信号则为:

$$e = D \cdot \delta f \quad (8)$$

其中, D 定义为鉴频斜率^[7],表达式为:

$$D = -8AJ_0(\beta)J_1(\beta)P_0/\Delta\nu \quad (9)$$

3 分析与实验

3.1 仿真分析

图 2 为相位调制光外差吸收和色散特性曲线

图,通过仿真可知,在中心频率 ω_c' 处,色散曲线比吸收曲线斜率大,能得到最高频率响应灵敏度,而且控制范围为调制频率的两倍,选用色散曲线作为稳频系统鉴频曲线。

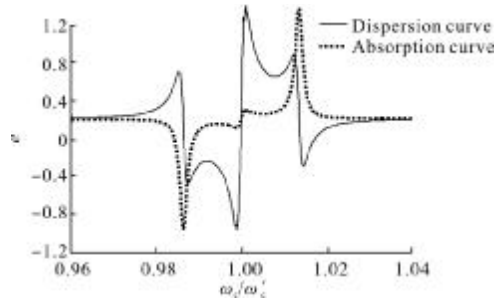


图 2 吸收及色散曲线

Fig.2 Curves of absorption and dispersion signal

根据公式(9),增大光源光功率 P_0 ,贝塞耳函数 $J_0(\beta)J_1(\beta)$,都可使鉴频曲线斜率 D 增大,从而获得最大反应灵敏度。同时选取具有较小线宽 $\Delta\nu$ 的 F-P 腔,稳频效果也会越佳。但是优化调制深度可以更简单地提高系统灵敏度。由图 3 可以看出: $\beta = 1.08$ 时, $J_0(\beta)J_1(\beta)$ 取最大。图 4 为不同调制深度值对应的色散曲线,也可以看出当调制深度为 1.08 时,曲线斜率最大。

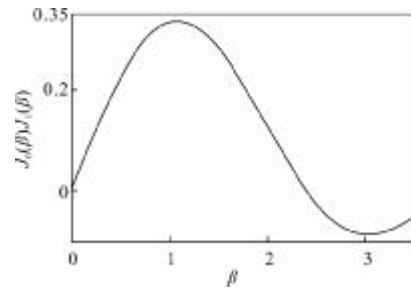


图 3 调制深度 β 优化曲线

Fig.3 Optimization curve of modulation depth β

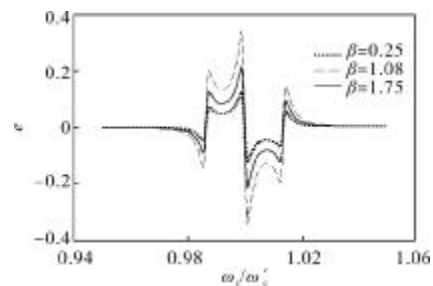


图 4 不同调制深度对应的色散曲线

Fig.4 Curves of dispersion signal at different modulation depth

3.2 实验

3.2.1 信号的探测

由于激光的频率极高，直接测量频率的稳定度很难，用一般的电子仪器无法将极高的频率变化显示出来，所以要用拍频的方法进行测量。信号光进入光电探测器，在理想的情况下，由于两个边带幅度相等，位相相反，边带与载波光外差拍频而产生的电流大小相等且相位相反，所以可以完全抵消。当该束调制光射入一个 F-P 腔时，若激光频率等于参考腔谐振频率，调制边带仍然平衡对称，拍频输出为零。当激光频率偏离参考频率，将导致两侧边带的幅度及相位发生变化，边带的反对称性被破坏，则有拍频电流输出。

光电接收电路是将探测光中的调制光谱信号进行光电转换，并适当放大，然后送到后级电路进行滤波处理。这一步关系到稳频的成功与否。因为稳频需要的误差控制信号就是光电接收电路检测到的光强信号，如果接收电路指标不合格，就会严重影响稳频的精度，甚至无法实现稳频。前置放大电路是红外探测器处理电路的重要组成部分，它把从读出电路中获取的微弱电信号放大后传输给后面的处理电路，其性能直接影响到整个系统的探测精度。

系统中最初所用的探测器为 THORLABS 公司的 SIR5 探测器，其对信号的响应曲线如图 5 所示。由于此探测器无放大电路，响应信号太小，无法满足

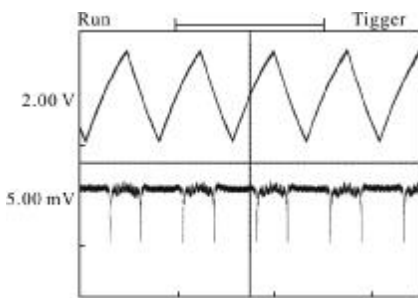


图 5 原探测器响应曲线

Fig.5 Original detector response curves

实验需求。因此，根据系统的需要，重新设计了探测器前置放大电路，在充分考虑了放大倍数和响应带宽的情况下，选用放大器 OPA847，为宽带宽、超低噪声、电压反馈型放大器。在制作 PCB 板时，使用四面板，其中顶层和底层放置元件，中间两层为电源

层，在需要的地方放置过孔连接铺地面，避免地线自感，合理布局元件，电源线远离信号线，避免走线间的干扰。必要的地方使用贴片元件，防止不必要的感抗以及射频信号经由器件尖端散失，保证电路具有较低的损耗和引入较小的噪声，并保证电路有较好的频率响应。放大器周围挖掉一定形状的铜皮，从而有效抑制运算放大器输入端和输出端对地产生的寄生电容所导致的频率响应峰和电路振荡。图 6 为重新设计后的探测器响应曲线。通过对比可以看出，信号进行了有效的放大，经放大后的信号能够满足系统的要求。

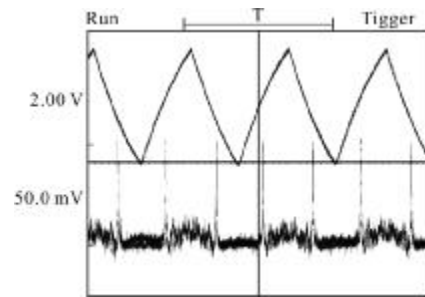


图 6 重新设计后的探测器响应曲线

Fig.6 Redesigned detector response curve

3.2.2 信号的解调

解调电路^[8]的主要功能是将光电检测的信号与参考信号进行混频，将得到的误差信号反馈到激光器进行控制。

如下所示，为解调电路的原理框图。

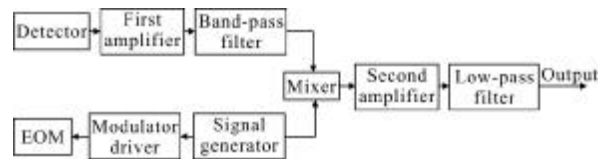


图 7 调制解调电路原理框图

Fig.7 Block diagram of modulation and demodulation circuit

探测器输出电信号进行一级放大后通过中心频率为 100 MHz 的带通滤波器，滤除直流成分、高频成分等干扰，进入混频器，与跟 EOM 驱动源为同源的射频信号进行混频后，再进行二级放大，经低通滤波器得到解调信号输出，得到的信号就是光源频率波动信号。

光源为单频 DFB 光纤激光器，输出波长 1064 nm，线宽为 100 kHz，输出功率为 110.2 mW。调制器为

MgO:LiTaO₃ 晶体。调制器驱动源产生 95~105 MHz、功率为 0~30 dBm 的射频信号作为调制信号。谐振腔自由光谱范围为 7.349 GHz,精细度为 950。当激光频率扫描到谐振腔吸收线线宽 7.736 MHz 内的谐振点附近时,谐振腔的反射光束表现出幅度衰减和相位偏移。图 8 和图 9 分别为最佳调制深度下的吸收曲线和色散曲线,射频调制频率 ω_0 为 100 MHz,扫描 F-P 腔中心频率 ω_c ,通过锁相放大器解调得到同步项和正交项。

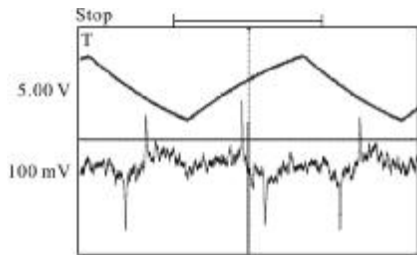


图 8 吸收曲线

Fig.8 Absorption curve

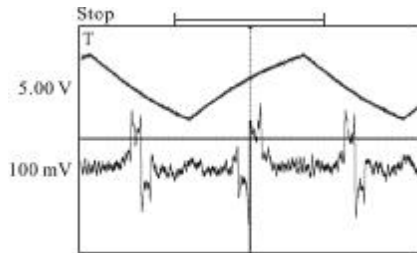


图 9 色散曲线

Fig.9 Dispersion curve

对比两种曲线,相位同步项在上边带产生正值的吸收曲线,而在下边带产生负值的吸收曲线。正交项在上边带、载波、下边带扫过谐振频率时,产生 3 段色散曲线,在谐振中心处的灵敏度最高。观察图 9 的数据得到色散曲线的峰峰值为 386 mV。根据公式(9)得到鉴频斜率为 49.9 mV/MHz。

3.2.3 误差信号

示波器采样频率为 25 Hz,采集时间为 400 s,因此样本数 $m=10\,000$,光纤激光器输出频率 f_0 按波长 1 064 nm 计算,即 $f_0=3.08\times 10^{14}/(1\,064\times 10^{-9})\text{Hz}$ 。图 10 为光源在温控电压 1.25 V 下,采集得到的电压误差信号曲线图。

将采集得到的数据,由以上测试得到的鉴频斜率 D 计算得到光频率波动,并利用艾伦方差^[9]公式计算得到频率漂移的方差值,公式如下:

$$\delta_y^2 = \frac{1}{2(m-1)f_0^2} \sum_{i=1}^{m-1} (\bar{f}_{i+1} - \bar{f}_i)^2 = \frac{1}{2(m-1)f_0^2} \sum_{i=1}^{m-1} (\Delta f_{i+1} - \Delta f_i)^2 \quad (10)$$

式中: m 为采样样本数; f_0 为光纤激光器输出光波频率; Δf_i 为采样得到光频率波动。

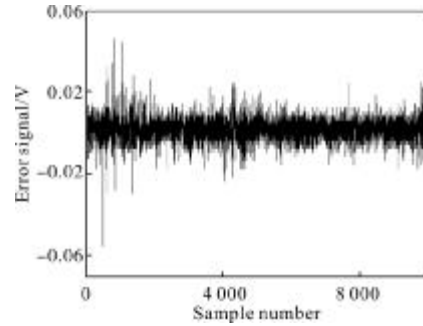


图 10 激光稳频系统输出误差信号

Fig.10 Error signal of the laser frequency stabilization system

根据鉴频斜率 $D=49.9$ mV/MHz,计算得到频率漂移的方差值为 8.66×10^{-13} ,由公式(8)可知,当误差信号 e 取图 10 中最大偏移电压值即 0.056 V 时,频率漂移最大为:

$$\delta f_{\max} = \frac{e_{\max}}{D} = 1.12 \text{ MHz}$$

即在 400 s 的时间内光纤激光器最大的频率漂移为 ± 1.12 MHz。

4 结论

文中以单频光纤激光器为研究对象,采用相位调制光外差技术,根据信号需求设计了探测器前置放大电路和解调电路,将光电检测的信号滤波后与参考信号进行混频,得到鉴频曲线及误差信号,对系统的频率误差信号进行检测,结果表明:电光相位调制器的剩余幅度调制将会引起光谱信号的基线偏离零电平,而剩余幅度又随实验条件的变化而变化。因此,克服剩余幅度调制对提高稳频效果很重要。可以加入偏振片,获取线偏光,通过调节入射光的偏振方向,使其与晶体切割方向有很好的匹配,能够有效地消除剩余幅度调制。此外,在整个稳频控制系统中,伺服电路具有非常重要的作用。选择适合的闭环控制电路及参数,使稳频控制系统接近理想增益分布和相应特性,达到最佳控制状态。

参考文献:

- [1] Chen Xiangjun, Chen Zilai, Dai Yongjiang, et al. Development of the solid laser radar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1998, 27(6): 24-28. (in Chinese)
陈湘君, 陈自来, 戴永江, 等. 固体激光雷达的发展现状[J]. *红外与激光工程*, 1998, 27(6): 24-28.
- [2] Andrew Sutton, Daniel A Shaddock. Laser frequency stabilization by dual arm locking for LISA [J]. *Physical Review D*, 2008, 78(8): 1550-7998.
- [3] Pound R V. Electronic frequency stabilization of microwave oscillators [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1964, 17: 490-505.
- [4] Evan M Lally. A narrow-linewidth laser at 1550nm using the pound-drever-hall stabilization technique [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.
- [5] Drever R W P, Hall J L. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Applied Physics B*, 1983, 31: 97-105.
- [6] Axel Schenzle, Ralph G DeVoe, Richard G Brewer. Phase modulation laser spectroscopy[J]. *Phys Rev A*, 1982, 25(5): 2606-2621.
- [7] Eric D Black. An introduction to pound-drever-hall laser frequency stabilization [J]. *American Journal of Physics*, 2001, 69(1): 79-87.
- [8] Peng Yuexiang, Li Wenbo, Shen Naicheng. et al. Application of modulation and demodulation of photoelectric signal frequency stabilization[J]. *Proc IEEE*, 2004: 180-182.
- [9] Charles A Greenhall, Dave A Howe, Donald B Percival. Total variance, an estimator of long-term frequency stability [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics*, 1999, 46(5): 1183-1191.

下期预览

空间多光谱 CCD 相机调焦精度分析

吕世良^{1,2}, 刘金国¹, 贾平¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;)

摘要: 调焦精度是保证多光谱 CCD 相机成像质量的关键技术之一, 针对星载对地观测多光谱 CCD 相机大视场角、宽地面覆盖的离轴三返光学系统结构特点, 设计实现一种高精度调焦系统。首先以 CCD 多光谱相机感应谱段中最短波长计算出相机调焦需求精度 $10.00\ \mu\text{m}$ 。根据多光谱 CCD 相机的光学系统特点, 对比传统常用航天相机三种调焦方式, 选择 CCD 焦平面调焦方式; 然后提出采用以步进电机为动力源驱动高精度涡轮蜗杆副、齿轮副做旋转运动, 通过超精密级滚珠丝杠把旋转运动转换为直线运动并结合直线导轨约束运动形式, 以 14 位绝对式编码器为位置检元件, 组成高精度调焦系统, 经计算调焦系统的理论灵敏度为 $0.12\ \mu\text{m}$, 该调焦系统具有结构简单紧凑, 调焦灵敏度高的优点; 最后通过实验测试, 在 $\pm 2.2\ \text{mm}$ 调焦行程内实际调焦精度 $3.62\ \mu\text{m}(3\sigma)$, 调焦系统随相机经过力学环境实验、热真空环境实验后复测调焦精度为 $3.64\ \mu\text{m}(3\sigma)$ 。测试结果表明说明所设计调焦系统设计合理, 结构可靠, 调焦精度稳定性高, 满足多光谱 CCD 相机成像清晰对调焦精度的要求。