

文章编号 1004-924X(2011)07-1531-07

精密控制谐振腔获得合成孔径 激光雷达信号的方法

来 志*, 曾晓东, 冯喆君, 曹长庆

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要:为获得高效的合成孔径激光雷达信号,提出一种通过精密控制谐振腔提高激光线性调频信号有效功率的方法,并描述了激光器的调频实现。首先,分析驱动信号获得其傅里叶谱,获知调腔信号有效功率低的原因在于调腔器件对信号高次谐波响应较差;通过在谐振腔驱动电路中引入了高次谐波响应模块,最终有效地减小了信号调频波形下降沿,提高了合成孔径激光雷达信号的有效功率。对所获得的调频信号性能指标进行了测试,结果表明,调频周期为 1 ms 时,调频带宽达到了 789 MHz,信号功率中有用功率由 72% 提高到 92% 以上。

关键词:激光技术;合成孔径激光雷达;线性调频信号;谐振腔;压电换能器

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111907.1531

Obtaining synthetic aperture ladar signal based on precisely cavity tuning

LAI Zhi*, ZENG Xiao-dong, FENG Zhe-jun, CAO Chang-qing

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

* Corresponding author, E-mail: zlai@mail.xidian.edu.cn

Abstract: To obtain a synthetic aperture ladar signal with a high net power rate, a novel method to obtain the Linear Frequency Modulation(LFM) laser signal was presented and the LFM laser experiment was also performed. Detailed Fourier analysis for the driving signal shows that the cavity tuning device can not response the high-order harmonics well. A high-order harmonics response module was introduced into the driving circuit of the cavity resonator to drive the piezoelectric transducer for cavity tuning, so that the trailing edge of the signal was shortened and the net power rate of the signal was improved greatly. Furthermore, the performance of obtained signal was tested and analyzed. The results show that when the FM period is 1 ms, the FM bandwidth is 789 MHz with the FM linearity better than 1.6%. Meanwhile, the net power rate of the signal is raised to 92% from 72%.

Key words: laser optics; Synthetic Aperture Radar(SAR); chirped signal; cavity resonator; piezoelectric transducer

收稿日期:2010-12-27;修订日期:2011-02-15.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA12Z144);中央高校基本科研业务费资助项目(No. K50510050010)

1 引言

合成孔径激光雷达^[1-4]具有测量精度高、被截获概率小等突出优点,近些年来其相关激光技术已成为该领域的研究热点。对于合成孔径激光雷达来说,获得大时宽带宽积的探测信号,需要对窄线宽的激光进行高速线性调频,而实现厘米甚至毫米量级的距离向分辨率,调频带宽要达到数十上百千兆赫芝。

高稳定、线性好、宽频带的啁啾激光源一直是合成孔径激光雷达实用化的核心技术之一。电光晶体用于激光调频虽有稳定性高的优点,但受目前材料性能和电子驱动元器件压摆率等的限制,实现数十上百千兆赫芝以上的宽带调频尚不现实,而利用调腔方式获得宽带调频信号是比较实际的途径。压电陶瓷^[5]具有体积小,分辨率高,推力大等优点,以管状压电陶瓷为核心制成的压电换能器可用于激光器调腔以实现调频,但由于陶瓷器件的迟滞及电容特性,使得调频信号实际带宽较小且信号有用功率较低。

针对上述问题,本文从压电换能器的固有特性出发,提出了一种精密控制谐振腔的新方法,在保证调频带宽的前提下获得了高效激光线性调频信号,为实现激光器线性调频提供了一个新的解决方法。

2 激光合成孔径雷达信号分析

激光合成孔径雷达是指光波段的连续波合成孔径雷达,其光源信号^[6]为

$$S_{\omega} = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2\right)\right], \quad (1)$$

其中

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1 & nT < t < (n+1)T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

式中 $k = B/T$ 为调频斜率, B 为调频带宽, T 为调频周期,其频率随时间的变化为 $\Delta f(t)$

$$\Delta f(t) = k(t - nT), \quad (2)$$

其中

$$nT < t < (n+1)T, (n=0, 1, 2, \dots).$$

信号的调频带宽决定其距离向分辨率,而信号功率的利用率取决于调频信号频率从最高回到最低的时间,称为“回调时间”,如图 1 中 t_0 所示。

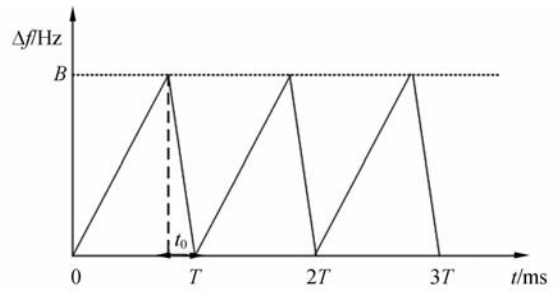


图 1 线性调频信号

Fig. 1 Chirped signal

在“回调时间”之内,合成孔径雷达接收的信号回波形成“死区”,不包含有用信息,即形成功率浪费,因此“回调时间”越短,调频信号中有效功率就越高,其功率有效利用率 η 为

$$\eta = \frac{T - t_0}{T} \times 100\%. \quad (3)$$

激光振荡的纵模数主要由工作物质的增益线宽和谐振腔的纵模间隔决定^[7]。设激光器的谐振腔长度为 L ,腔内介质折射率为 n ,激光器输出光频率 f 的变化为 Δf ,则

$$\frac{\Delta f}{f} = -\left(\frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta L}{L}\right). \quad (4)$$

另外,激光器是单纵模输出,因此其调频带宽也就是频率连续变化的最大范围在暂不考虑跳模调频的情况下为激光器的纵模间隔

$$B = \Delta\nu_q = \frac{c}{2nL}, \quad (5)$$

在调腔时激光器谐振腔中介质折射率 n 没有变化,由式(4)、(5)可计算出谐振腔长的最大变化量 ΔL_{\max} 为

$$\Delta L_{\max} = \frac{\lambda}{2}, \quad (6)$$

其中, λ 为激光器的中心工作波长。

3 高效调频激光器驱动电路

由于气体激光器的输出频率稳定性要远高于常用固体激光器,所以本文采用气体激光器进行具体实验以研究抑制“回调时间”问题。图 2 给出了半外腔激光器线性调频的具体实现。

该装置主要有两部分,分别为压电换能器驱动系统和短半外腔氦氖激光器,其中调腔驱动设计是整个系统的核心,调腔时采用两级压电陶瓷

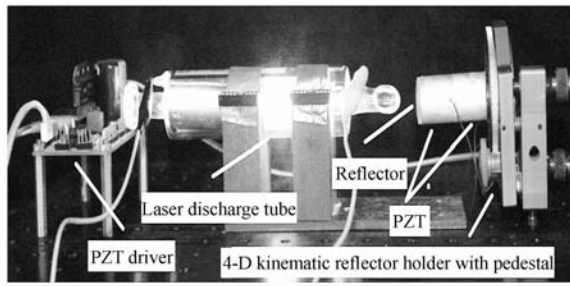


图 2 高效调频激光器装置

Fig. 2 Installation of high effective power FM laser

串联。第一级通过直流电压缓慢调整输出峰的起始位置, 如图 3 实线所示。图 4 为驱动电压与负载时间常数的关系。其中 4(a) 为无负载时驱动电压输出波形, 第二级在此电压驱动下, 激光器的激光输出峰将在图 3 所示频率轴上做周期性往复运动, 调频周期等于驱动电压周期, 且由式(6)可

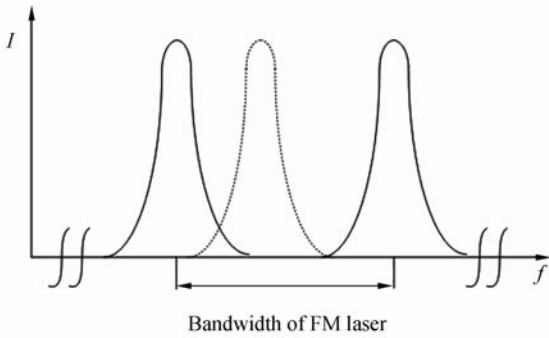
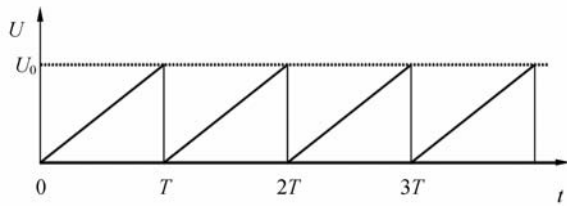


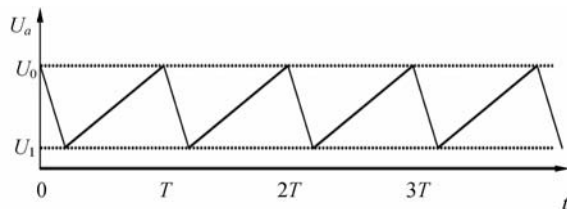
图 3 激光输出谱变化范围

Fig. 3 Range of laser output spectrum



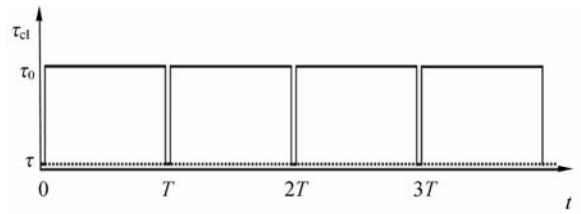
(a) 无负载驱动电压输出

(a) Driving voltage without load



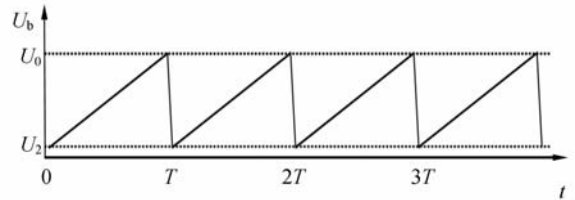
(b) 无驱动电压带载输出

(b) Driving voltage on load without HHRM



(c) 负载时间常数

(c) Load time constant



(d) 有 HHRM 驱动电压带载输出

(d) Driving voltage on load with HHRM

图 4 驱动电压与负载时间常数关系

Fig. 4 Relationship between driving voltage and load time constant

知输出电压峰值对应微动系统推进长度为激光工作中心波长的 $1/2$ 。图 4(b), (d) 分别为有、无高次谐波响应模块 (High-harmonics Response Module, HHRM) 时的驱动电压带载输出。

3.1 驱动信号分析

驱动电路的峰值输出电压 U_0 由调控所需要的伸长量最大值 (即二分之一工作光波长) 和压电陶瓷的压电系数决定, 在保证伸长线性的前提下应选取大压电系数的压电陶瓷换能器。

因为压电陶瓷驱动电压峰值较高, 本文采用 APEX 公司的高压高速线性运算放大器芯片 PA78 对锯齿波信号进行放大, 电路示意图如图 5 所示。该模块可控制输出信号的直流电平, 单端输出时的峰值电压可达 350 V, 由 A+ 输出。

这样的高压驱动压电陶瓷进行激光调频时, 由于压电陶瓷是容性器件, 会产生调频信号“回调时间”较长的问题。由图 4(b) 可以看出, 经驱动信号上升沿充电后的压电陶瓷无法响应其陡峭的下降沿, 这是由于当驱动信号已经进入下一周期的上升沿时, 压电陶瓷上的本应释放完毕的电荷并未完全释放, 所以下一周期的开始阶段驱动电压的上升实际上是与压电陶瓷的放电同时进行的。因而只有当陶瓷上的电荷释放至与当前驱动

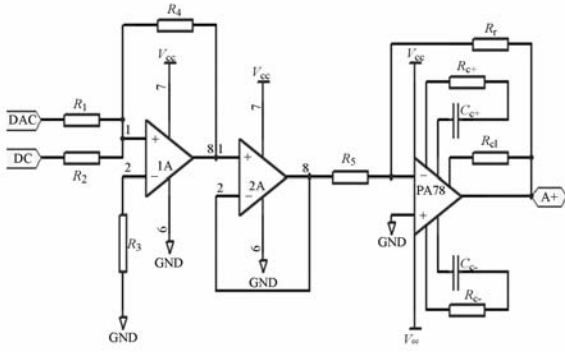


图 5 信号放大模块示意图

Fig. 5 Amplifying circuit module of driving signal

电压上升到达的数值相等时,陶瓷才会开始下一周期的充电。这样,陶瓷上的电压变化(对应实际调频带宽)较驱动原始值有所减小,这本质上是由于压电陶瓷放电缓慢而造成的,它大大降低了调频信号的功率有效利用率,这是利用压电陶瓷产生线性调频激光信号的一个突出问题。

3.2 高次谐波响应模块

由上一节的分析可知,调频信号功率有效利用率低的原因是负载陶瓷放电速度太慢,所以在输出端耦合一电路模块,该模块相当于在放电阶段给负载陶瓷并联一个小值电阻,用以提高负载陶瓷的放电速度。

图 4(a)所示电压信号可表示为

$$U(t) = h(t - nT), \quad (7)$$

$$h = U_0 / T, \quad (8)$$

其中 $nT < t < (n+1)T, (n=0, 1, 2, \dots), h$ 为输出位移变化斜率, U_0 为最大输出电压, T 为信号周期。将式(7)进行傅里叶展开,可得

$$U(t) = \frac{U_0}{2} + U_0 \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\Omega t, \quad (9)$$

$$b_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{n\pi}, \quad (10)$$

$$\Omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (11)$$

其中 $(n=0, 1, 2, \dots)$ 。

由式(9)可知驱动信号可以展开为一系列谐波电压之和,其基频数值等于信号调制频率^[8]。本质上,压电陶瓷放电速度慢是因为容性器件对驱动信号中的高次谐波响应较差造成的,因此在驱动电路中加入高次谐波响应模块(HHRM)可

以解决该问题。该电路模块减小负载在频率回调阶段时间常数,增加负载陶瓷在电路中对驱动信号的高次谐波响应,提高了负载陶瓷的放电速度,电路模块示意图如图 6 所示。

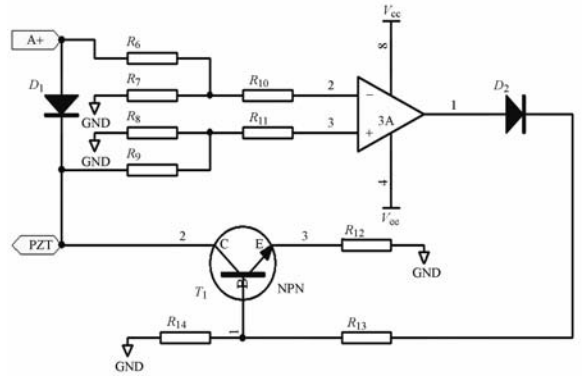


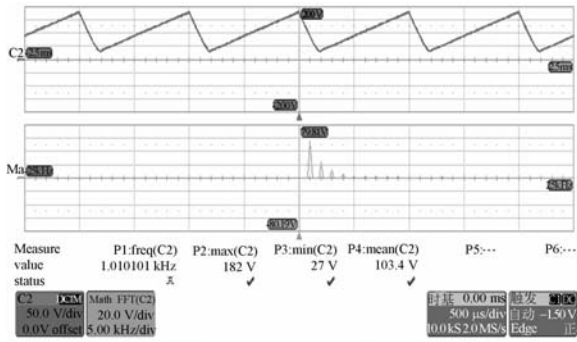
图 6 HHRM 示意图

Fig. 6 Diagram of HHRM

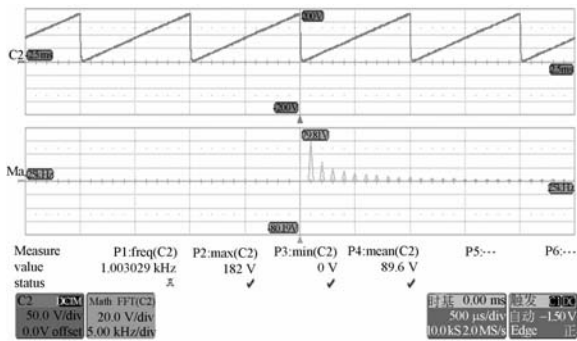
加入此模块后,负载时间常数 τ_d 和电路带载时的输出如图 4(c)、(d)。频率上升阶段 HHRM 是不起作用的,在“回调时间”内将前端输出阻抗较大的信号放大模块断开,并通过开关控制使得压电陶瓷上积聚的电荷通过开关三极管快速释放。

HHRM 的工作原理如下: $A+$ 为驱动锯齿波电压输入端, PZT 为高次谐波响应模块输出端。若前端信号放大模块输出至 $A+$ 为电压上升沿时,此模块不会改变负载时间常数 τ_d , 调频信号频率缓慢“上调”;若驱动信号由上升沿转至下降沿时电压比较器 3A 立刻翻转,三极管 $T1$ 随即导通,大大降低了时间常数 τ_d , 从而达到响应高次谐波以减小调频信号“回调时间”的目的,实际效果如图 7 所示。

为保证该模块的实际工作指标,图 6 中 NPN 型三极管应采用耐高压的高速开关管,当比较器 3A 输出为高电平时可以控制三极管 $T1$ 处于导通状态,为避免输出为低电平时三极管 $T1$ 基极悬空,导致三极管 $T1$ 处于不可靠的截止状态,将 $T1$ 的基极通过电阻 $R14$ 接地并串联一限流电阻 $R13$ 。另外,比较器 3A 应采用高压摆率(响应速度快)、小输入失调电压的高精度电压比较器。



(a) 未加 HHRM
(a) Without HHRM



(b) 加入 HHRM
(b) With HHRM
图 7 输出波形

Fig. 7 Output waveforms of driving circuit

4 实验测试分析

本文讨论的线性调频激光器设计调频周期为 1 ms, 调频带宽约为 789 MHz^[9]。

4.1 调频带宽测试

调频激光器采用腔长为 19 cm 的半外腔氦氖气体激光器, 由式(5)可计算出纵模间隔(即单纵模线性调频激光器的设计调频带宽)为 789.47 MHz。由于测量激光器的调频带宽涉及光频率的动态测量, 采用一种基于法布里珀罗腔的方法^[9]进行间接测量, 图 8 为相应的测量系统。经过多次测量, 表 1 给出了其中几组测量结果及误差。由表 1 可见, 测量与设计值的偏差 < 25 MHz, 实际调频带宽符合设计指标要求。

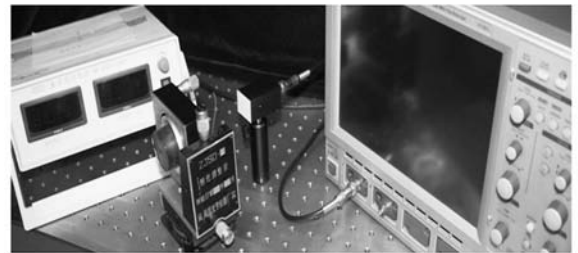


图 8 带宽测量系统

Fig. 8 Bandwidth measurement system

表 1 带宽测量值

Tab. 1 Measuring values of bandwidths

	1	2	3	4	5	6	7	8
带宽/MHz	765.99	782.45	765.99	782.45	765.99	765.99	782.45	765.99
偏差/MHz	23.48	7.02	23.48	7.02	23.48	23.48	7.02	23.48

4.2 调频信号功率有效利用率测试

由式(3)可知, 测试调频信号功率有效利用率需要知道调频信号的“回调时间”和调频周期。对于驱动电路, 调频周期一定时, “回调时间”与负载的时间常数相对应。通过调整驱动电路负载的时间常数即可完成调频信号功率有效利用率的测试。

驱动电路的负载时间常数由输出阻抗和负载

电容决定, 由于信号放大模块的输出阻抗为 44 Ω, 所以高次谐波响应模块中选择小于 44 Ω 的电阻, 同时为了避免开关管瞬时电流过大, 电阻对应的初始导通电流应该小于开关管限流值。所以选择耦合一 10 Ω 电阻进行实验。图 7 为一组加入高次谐波响应模块(HHRM)前后的电路输出波形与其频谱分析的实测图, 表 2 为相应功率有效利用率测算结果抽样对比。

表 2 功率有效利用率

Tab. 2 Effective utilization ratio of power

有效利用率/%	1	2	3	4	5	6	7	8
加 HHRM 前	70.7	72.1	72.1	72.1	70.7	70.1	72.1	72.1
加 HHRM 后	92.3	93.3	92.9	92.9	92.3	92.9	93.3	93.3

由表 2 可见,加 HHRM 前后“回调时间”比值约为 4:1,与相应时间常数比值吻合。同时可知,实验中加入 HHRM 后得到的激光调频信号功率有效利用率由 72% 提高到 92% 以上。

5 结 论

提出了一种精密控制谐振腔高效获得激光线性调频信号的方法,在谐振腔驱动电路中引入 HHRM 从而有效地减小了调频信号的频率“回

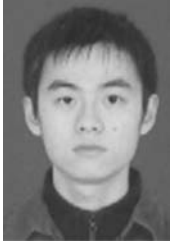
调时间”,提高了激光信号的功率有效利用率。对所获得的调频信号性能指标进行多次测试,实验结果表明,调频周期为 1 ms 时,调频带宽达到了 789 MHz,同时功率有效利用率达到 92% 以上。

对于固体激光器^[10-11],增益带宽可达数十上百千兆赫兹,当采用调腔法获得调频激光信号,产生“回调时间”的机制与本文讨论情况完全一致。所以本文方法不仅对后期激光合成孔径雷达的参数设计有重要作用,而且对未来大功率固体调频激光器的设计有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] CURLANDER J C, DONOUGH R N MC. *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing* [M]. New York: Wiley, 1991.
- [2] MARCUS S, COLELLA D, GREEN T J. Solid-state laser synthetic aperture radar[J]. *Appl Opt.*, 1994, 33(6):960-964.
- [3] BASHKANSKY M, LUCKE R L, FUNK E, et al.. Two dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *App. Opt.*, 2002, 27(22): 1983-1985.
- [4] LUCKE R L, RICHKARD L J. Photon-limited synthetic-aperture imaging for planet surface studies [J]. *App. Opt.*, 2002, 41(24):5084-5095.
- [5] 胡自强, 凌宁, 潘君骅, 等. 基于 PZT 的非球面能动抛光盘的变形优化[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(1):1-7.
HU Z Q, LING N, PAN J H, et al.. Optimization control of PZT actuated deformable aspheric polishing lap[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):1-7. (in Chinese)
- [6] BECK S M, BUCK J R, BUELL W F, et al.. Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(35):7621-7629.
- [7] KOECHNER W. *Solid-state Laser Engineering* [M]. New York: Springer, 2006:259-263.
- [8] 吴大正. 信号与线性系统分析[M]. 北京:高等教育出版社, 1998.
WU D ZH. *Signal and Linear System Analysis* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998. (in Chinese)
- [9] 来志, 曾晓东. 一种合成孔径激光雷达激光器带宽测量新方法[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(1): 9-11.
LAI ZH, ZENG X D. A novel method to measure bandwidth of laser in synthetic aperture radar[J]. *Journal of Optoelectronics · laser*, 2010, 21(1):9-11. (in Chinese)
- [10] 郝二娟, 檀慧明, 李特等. LD 端面泵浦的高输出单频 Nd:YVO₄ 绿光激光器[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(4):580-583.
HAO E J, TAN H M, LI T, et al.. High output and single-frequency ring Nd:YVO₄ laser end-pumped by diode laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 580-583. (in Chinese)
- [11] 姜忠明, 陈殿仁. 全固态复合内腔和频 570 nm 连续波黄光激光器[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(4):805-808.
JIANG ZH M, CHEN D R. All-solid-state continuous-wave doubly resonant all-intracavity sum-frequency yellow laser at 570nm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4):805-808. (in Chinese)

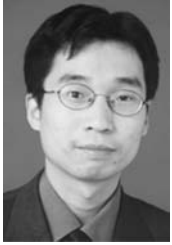
作者简介:



来志(1983—),男,陕西西安人,博士,讲师,2005年于西安电子科技大学获得学士学位,主要从事合成孔径激光雷达相关激光技术的研究。E-mail: zlai@mail.xidian.edu.cn.



曹长庆(1977—),男,河南新乡人,副教授,2001年、2005年、2010年于西安电子科技大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事激光技术及应用的研究。E-mail: chqcao@mail.xidian.edu.cn.



冯喆君(1977—),男,陕西西安人,副教授,1999年、2002年于西安电子科技大学分别获得学士和硕士学位,主要从事激光物理、激光器设计及其应用的研究。E-mail: zhjfeng@mail.xidian.edu.cn.

导师简介:



曾晓东(1956—),男,教授,博士生导师,1982年于吉林大学获得学士学位,1985年、1996年于西安电子科技大学分别获得硕士和博士学位,主要从事激光器光学、光电检测等方面的研究。E-mail: xdzeng@xidian.edu.cn

●下期预告

全反射式无焦 ZH 系统装调技术

何红星,赵劲松,潘顺臣

(昆明物理研究所,云南昆明 650223)

本文介绍了一种新颖的共轴全反射式无焦光学系统——ZH 系统的装调技术。ZH 系统由两块相对放置的抛物面反射镜和一块 45° 放置的双面反射镜共同组成,该系统的两抛物面反射镜可分别从两端安装,双向平面反射镜也易于安装。对 ZH 系统进行了误差分析和装调分析,分析了元件位置失调会带来系统像差的变化,给出了 ZH 系统的误差分析结果,光线经过 ZH 系统和分束镜后,光轴在水平方向和垂直方向有平移,平移后的出射光轴与入射光轴的平行,需要精确的装调技术来保证。给出了 ZH 系统的装调方法,采用可见光平行光管进行辅助装调,采用水平偏移补偿镜和垂直偏移补偿镜对 ZH 系统出射光轴的偏移量进行补偿,利用测微组件和测微目镜对装调中平晶、反射镜的调节量进行测量,实现了 ZH 系统出射光轴与入射光轴的同轴,装调完成后,去掉水平偏移补偿镜和垂直偏移补偿镜,实现了 ZH 系统光轴的空间平行。