

# 自适应光纤准直器的谐振特性优化研究

刘红梅<sup>1,2,3</sup> 耿超<sup>1,2</sup> 罗文<sup>1,2,3</sup> 王彩霞<sup>1,2</sup> 李新阳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209  
<sup>2</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209  
<sup>3</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 自适应光纤准直器(AFOC)是一种快速、高精度调节出射准直激光束方向的新型无源光纤器件。随着其应用范围的拓展,对 AFOC 的谐振特性提出了更高的要求。对阶梯型减振结构改善 AFOC 谐振特性的方法进行了实验研究,结果表明该结构能提高 AFOC 的一阶谐振频率并减小谐振峰谷值。在此基础上,理论并实验研究了利用双二阶数字滤波器技术提高 AFOC 可用带宽的方法,实验结果表明,该方法有效地抵消了一阶谐振峰,将 AFOC 的可用带宽从约 1.3 kHz 提升至 2.5 kHz。

**关键词** 光纤光学;自适应光学;自适应光纤准直器;谐振特性;双二阶数字滤波器

**中图分类号** TP217 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s106011

## Optimal Research of Resonance Characteristic of Adaptive Fiber-Optics Collimator

Liu Hongmei<sup>1,2,3</sup> Geng Chao<sup>1,2</sup> Luo Wen<sup>1,2,3</sup> Wang Caixia<sup>1,2</sup> Li Xinyang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China  
<sup>2</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China  
<sup>3</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The adaptive fiber-optics collimator (AFOC) is a kind of passive fiber-optics device with the capability of fast and precise tip-tilt deviation control of collimated output. With the rapid extension of its application areas, the AFOC with greater resonance characteristic is needed. A method of using step-profile damping structure to improve the resonance characteristic of AFOC is experimentally studied, and the results reveal that the first-order resonance frequency increases with the reduction of the first-order resonance peak. On this basis, a way to enhance the available bandwidth of AFOC is studied theoretically and experimentally based on the biquad digital filter technique. Experimental results show that the first-order resonance peak of AFOC is suppressed efficiently and the usable operation bandwidth increases from about 1.3 kHz to 2.5 kHz.

**Key words** fiber optics; adaptive optics; adaptive fiber-optics collimator; resonance characteristic; biquad digital filter

**OCIS codes** 060.3510; 070.2025; 230.0250; 230.2285

## 1 引言

自适应光纤准直器(AFOC)是一种快速、高精度地调节出射准直激光束偏转角度的新型无源光纤

器件,已经有实验验证了其在光纤激光光束合成、激光瞄准、光纤耦合等方面的能力<sup>[1-8]</sup>。AFOC 及其阵列技术在激光大气传输、自由空间激光通信、激光

收稿日期: 2014-03-31; 收到修改稿日期: 2014-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61205069,61138007)

作者简介: 刘红梅(1990—),女,硕士研究生,主要从事信号处理和控制等方面的研究。

E-mail: liuhongmei12@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 李新阳(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学等方面的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn (通信联系人)

雷达等领域也有着广阔的应用前景<sup>[9]</sup>。AFOC 与传统自适应光学中的快速倾斜镜相比,具有运动惯性小、谐振频率高、结构紧凑、有利于阵列集成化等优点,且更便于与光纤光学技术相结合<sup>[10]</sup>。美国陆军研究实验室的 Beresnev 等<sup>[11]</sup>和中国科学院光电技术研究所的耿超等<sup>[12]</sup>分别于 2005 年和 2011 年独立研制出了 AFOC 器件,并将其应用于各自的实验系统。其中,中国科学院光电技术研究所研制的一款 AFOC 的一阶谐振频率约为 1.8 kHz,可用带宽约为 1 kHz<sup>[3]</sup>。

随着应用范围的拓展,对 AFOC 的谐振特性提出了更高的要求<sup>[9]</sup>,因而有必要展开 AFOC 谐振特性优化技术的研究。2008 年, Beresnev 等<sup>[13]</sup>设计了一种基于弹性阻尼材料的阶梯型减振结构,将 AFOC 的可用带宽提高至 3 kHz<sup>[13]</sup>。而在 1999 年,中国科学院光电技术研究所的李新阳等<sup>[14]</sup>就针对快速倾斜镜谐振模式的抑制问题,提出了双二阶网络滤波器抑制谐振峰的方法。本文结合以上两种方法,设计并实际研制了一种基于阶梯型减振结构

的 AFOC,并在此基础上,对利用双二阶数字滤波器技术提高 AFOC 可用带宽的方法进行了理论和实验研究,为研制较好谐振特性的 AFOC 器件提供了参考。

## 2 AFOC 的原理和测试方案

### 2.1 AFOC 的原理

AFOC 由基座、两对双压电驱动器、带中心孔的柔性十字梁和准直透镜组成,其中,基座、双压电驱动器和十字梁构成了光纤端面定位器。光纤端面固定于十字梁的中心孔内,由在 X、Y 方向布置的两对双压电驱动器驱动,在准直透镜的焦平面内平移,出射光束经准直透镜后产生方向上的变化,结构如图 1 所示。准直透镜的焦距为  $f$ ,光纤端面在焦平面内偏移  $\Delta x$ ,则出射激光束相对于光轴偏转角度  $\varphi = \arctan(\Delta x/f)$ ,由于偏转角度为很小,可近似为  $\varphi = \Delta x/f$ 。当准直透镜的焦距  $f$  确定后,偏转角  $\varphi$  的大小将取决于光纤端面的偏移量  $\Delta x$ 。

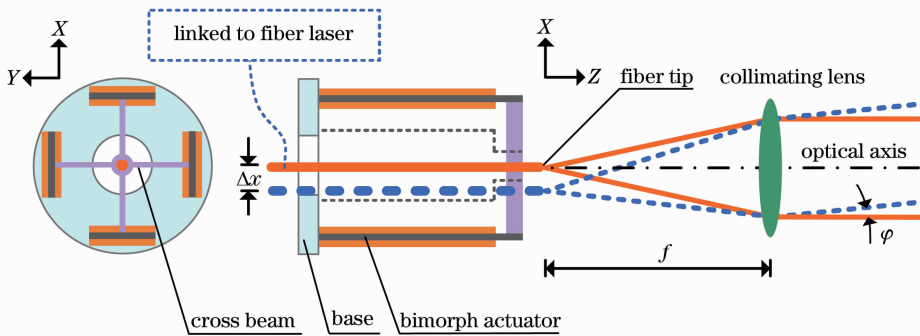


图 1 AFOC 的工作原理

Fig. 1 Principle schematic of AFOC

### 2.2 测试方案

图 2 为 AFOC 的谐振特性测试方案的示意图。激光器的尾纤与 AFOC 的内置光纤相连,AFOC 的准直激光束经聚焦透镜聚焦至位置敏感探测器

(PSD)的光敏面上。由计算机(PC)产生正弦扫频电信号,经高压放大器后作用于 AFOC,控制 X 方向上的一对双压电驱动器带动光纤端面在 X 方向运动,最终在 PSD 上实现聚焦光斑在相应方向上的

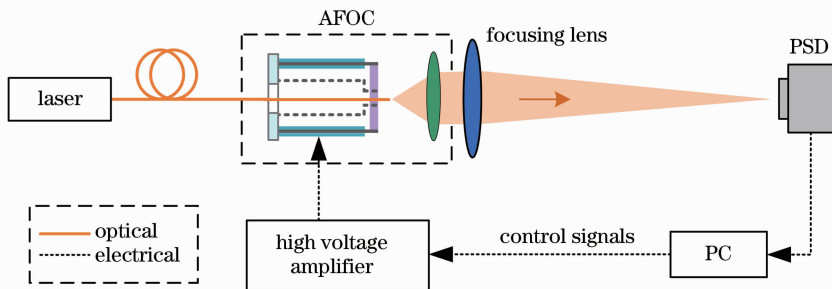


图 2 AFOC 的谐振特性测试方案示意图

Fig. 2 Schematic of measurement of AFOC's resonance characteristic



5) 将  $F(z)$  取倒, 得到与 AFOC 的  $z$  域频率特性曲线相匹配的双二阶数字滤波器的传递函数

$$F^{\text{DSF}}(z)$$

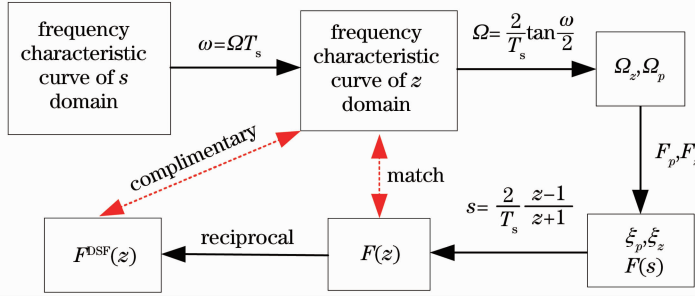


图 5 双二阶数字滤波器的设计流程图

Fig. 5 Flow diagram of biquad digital filter design

### 3.2.3 参数计算及稳定性分析

为了保持器件在低频信号处的特性, 使该近似函数在低频段的增益接近于 1, 将(2)式乘以一个归一化系数并写为

$$F(s) = \frac{1}{A_0} \frac{s^2 + 2\xi_z \Omega_z s + \Omega_z^2}{s^2 + 2\xi_p \Omega_p s + \Omega_p^2}, \quad (4)$$

式中  $A_0 = \Omega_z^2 / \Omega_p^2$ 。(4) 式中含有  $\xi_z$ 、 $\Omega_z$ 、 $\xi_p$ 、 $\Omega_p$  四个待求的参数。 $z$  域的零极点角频率分别为  $\omega_z = 2\pi f_z T_s$ ,  $\omega_p = 2\pi f_p T_s$ , 通过双线性 Z 变换关系得到  $s$  域的零极点角频率为

$$\begin{cases} \Omega_z = \frac{2}{T_s} \tan \frac{\omega_z}{2} = \frac{2}{T_s} \tan(\pi f_z T_s) \\ \Omega_p = \frac{2}{T_s} \tan \frac{\omega_p}{2} = \frac{2}{T_s} \tan(\pi f_p T_s) \end{cases}. \quad (5)$$

为方便书写和计算, 令  $F_z = \frac{|F(j\Omega_z)|}{|F(j0)|}$ ,  $F_p = \frac{|F(j\Omega_p)|}{|F(j0)|}$ ,  $\Omega_0 = \frac{\Omega_z}{\Omega_p} > 1$ , 用零极点频率处的归一化幅值  $F_z$ 、 $F_p$  ( $F_p > F_z$ ) 来匹配得到

$$\begin{cases} \xi_z = \sqrt{\frac{F_z^2 (F_p^2 A_0^2 + \Omega_0^2) (\Omega_0^2 - 1)^2}{4\Omega_0^4 (F_p^2 - F_z^2)}} \\ \xi_p = \sqrt{\frac{(F_z^2 2A_0^2 + \Omega_0^2) (\Omega_0^2 - 1)^2}{4A_0^2 \Omega_0^2 (F_p^2 - F_z^2)}} \end{cases}. \quad (6)$$

用双线性 Z 变换关系  $s = \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{z+1}$  将(4) 式变换到  $z$  域, 并将传递函数取倒, 得到与 AFOC 频率特性互补的双二阶数字滤波器的传递函数

$$F^{\text{DSF}}(z) = A_0 \frac{(4 + 4\xi_p \Omega_p T_s + \Omega_p^2 T_s^2) z^2 + 2(\Omega_p^2 T_s^2 - 4) z + (4 - 4\xi_p \Omega_p T_s + \Omega_p^2 T_s^2)}{(4 + 4\xi_z \Omega_z T_s + \Omega_z^2 T_s^2) z^2 + 2(\Omega_z^2 T_s^2 - 4) z + (4 - 4\xi_z \Omega_z T_s + \Omega_z^2 T_s^2)}. \quad (7)$$

双二阶系统实际上是一个简单的无限冲激响应系统(即 IIR 系统), 对于 IIR 系统来说, 当系统传递函数的全部极点落于 S 左半平面/单位圆内(不包括虚轴/单位圆)时系统才是稳定的<sup>[15]</sup>。由图 5 中的变换关系知  $F^{\text{DSF}}(z)$  的全部极点落于单位圆内等价于  $F(s)$  的全部零点落于 S 左半平面, 由(4)式知  $F(s)$  的零点为

$$s_{1,2} = -\xi_z \Omega_z \pm j \sqrt{\xi_z^2 \Omega_z^2 - \Omega_z^2}. \quad (8)$$

只要  $\xi_z$  大于零就能满足全部零点落于 S 左半平面的稳定性条件, 由(6)式知  $\xi_z > 0$ , 所以该系统是稳定的。

### 3.3 实验结果

利用图 2 所示的测试装置, 分别测试了所研制的 AFOC 在未添加减振结构时和添加减振结构后的谐振特性。由图 6 可知, AFOC 在未添加减振结

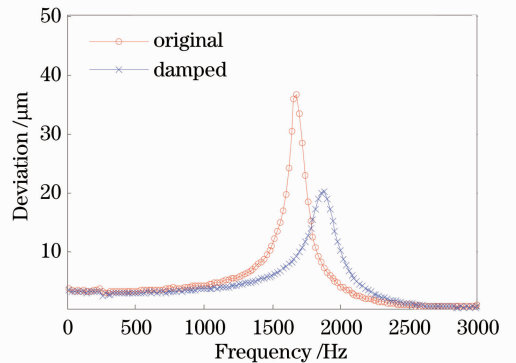


图 6 AFOC 在未添加减振结构时和添加减振结构后的谐振特性曲线对比

Fig. 6 Comparison of AFOC's frequency characteristic without and with damping structure

构时的谐振频率在 1.68 kHz 左右; 添加减振结构

后, AFOC 的一阶谐振频率提升至 1.88 kHz, 并且谐振峰值降低了约 1/2, 说明提高谐振频率的同时抑制了谐振峰值。

用图 6 中 AFOC 减振后的谐振特性曲线来计算双二阶数字滤波器的传递函数, 可知极点  $f_p = 1.88$  kHz,  $F_p = 6.3276$ , 取零点为  $f_z = 2.22$  kHz,  $F_z = 1.0197$ , 采样频率  $f_s = 16$  kHz, 即  $T_s = 62.5$   $\mu$ s, 代入(5)式和(6)式可得到  $\xi_z, \xi_p, \Omega_z, \Omega_p$  的值, 再代入(7)式得到双二阶数字滤波器的传递函数

$$F^{\text{DSF}}(z) = 1.4495 \times \frac{0.8223z^2 - 1.1850z + 0.7799}{z^2 - 1.0910z + 0.6959} \quad (9)$$

对比图 7(a) 中该传递函数的频率特性曲线和 AFOC 滤波前的谐振特性曲线可知, 双二阶数字滤波器的谷值频率与 AFOC 的峰值频率相等, 归一化

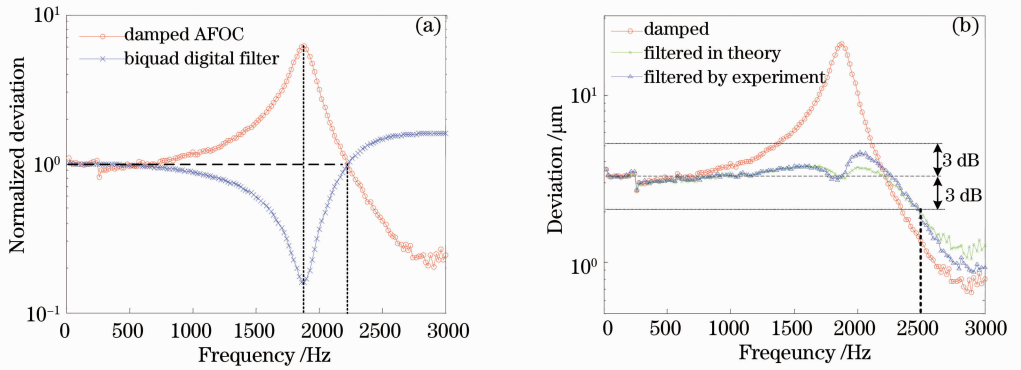


图 7 (a) AFOC 与双二阶滤波器的频率特性对比; (b) 滤波前后 AFOC 的频率特性对比

Fig. 7 (a) Frequency characteristic comparison of AFOC and biquad digital filter; (b) frequency characteristic comparison of AFOC before and after signal filtering

## 4 结论

本文分别对阶梯型减振结构和双二阶数字滤波器技术改善 AFOC 谐振特性的能力进行了验证。结果表明, 所研制的一款 AFOC 经添加阶梯型减振结构后的一阶谐振频率从 1.68 kHz 提升至 1.88 kHz, 一阶谐振峰值降低了约 1/2; 在此基础上经双二阶数字滤波器滤波后, 理论计算和实际滤波结果一致, AFOC 的一阶谐振峰基本被抵消, 有效控制带宽提高到了约 2.5 kHz。为研制较好谐振特性的 AFOC 器件提供了参考。

## 参考文献

- 1 Thomas Weyrauch, Mikhail A Vorontsov, Gary Carhart, *et al.*. Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(22): 4455–4457.
- 2 Chao Geng, Baoyin Zhao, Entao Zhang, *et al.*. 1.5 kW incoherent beam combining of four fiber lasers using adaptive

幅值约等于 1 处对应的频率与 AFOC 对应的频率相等, 幅值的变化规律相反, 证明了二者满足推导时的互补关系。将(9)式作用于 AFOC 得到理论滤波后的频率特性曲线, 然后用图 2 所示的测试装置测得 AFOC 实际滤波后的频率特性曲线, 如图 7(b)所示, 实验滤波与理论滤波的结果基本相符, 证明了理论建立的模型的正确性。由测得的 AFOC 滤波前和滤波后的频率特性曲线对比可知, 经过双二阶函数滤波以后, AFOC 的一阶谐振峰基本被抵消, 获得了一条近似平坦的频率特性曲线, 在 3 dB 衰减范围内的有效控制带宽达到 2.5 kHz, 证明了用双二阶数字滤波方法对控制信号滤波来提高控制带宽是可行的。

- fiber-optics collimators [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(13): 1286–1289.
- 3 Chao Geng, Wen Luo, Yi Tan, *et al.*. Experimental demonstration of using divergence cost-function in SPGD algorithm for coherent beam combining with tip/tilt control [J]. *Opt Express*, 2013, 21(21): 25045–25055.
- 4 Geng Chao, Tan Yi, Mu Jinbo, *et al.*. Experimental research of tip/tilt control of a multi-channel fiber-laser array [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 024206.
- 耿超, 谭毅, 牟进博, 等. 多单元光纤激光阵列的倾斜控制实验研究 [J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 024206.
- 5 Xinyang Li, Chao Geng, Xiaojun Zhang, *et al.*. Coherent beam combining of collimated fiber array based on target-in-the-loop technique [C]. *SPIE*, 2011, 8178: 81780M.
- 6 Luo Wen, Geng Chao, Wu Yunyun, *et al.*. Experimental demonstration of single-mode fiber coupling using adaptive fiber coupler [J]. *Chin Phys B*, 2014, 23(1): 014207.
- 7 Luo Wen, Geng Chao, Li Xinyang. Simulation and experimental study on single-mode fiber coupling efficiency in the presence of atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0606001.
- 罗文, 耿超, 李新阳. 大气湍流像差对单模光纤耦合效率的影响分析及实验研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0606001.

- 8 Geng Chao, Luo Wen, Li Xinyang, *et al.*. An Adaptive Fiber Transceiver Control System for Laser Beam Directional Transmission, China: 201310161222.7 [P]. [2013-05-03]. 耿超, 罗文, 李新阳, 等. 一种激光束双向收发的自适应光纤耦合或准直器控制系统, 中国: 201310161222.7 [P]. [2013-05-03].
- 9 Mikhail A Vorontsov, Thomas Weyrauch, Lenoid A Beresnev, *et al.*. Adaptive array of phase-locked fiber collimators; analysis and experimental demonstration [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2009, 15(2): 269–280.
- 10 Geng Chao, Zhang Xiaojun, Li Xinyang, *et al.*. Structural design of adaptive fiber optics collimator [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9): 1682–1685. 耿超, 张小军, 李新阳, 等. 自适应光纤光源准直器的结构设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1682–1685.
- 11 Leonid A Beresnev, Mikhail A Vorontsov. Design of adaptive fiber optics collimator for free-space communication laser transceiver [C]. SPIE, 2005, 5895: 58950R.
- 12 Chao Geng, Xinyang Li, Xiaojun Zhang, *et al.*. Coherent beam combination of an optical array using adaptive fiber optics collimators [J]. Opt Commun, 2011, 284(24): 5531–5536.
- 13 Leonid A Beresnev, Thomas Weyrauch, Mikhail A Vorontsov, *et al.*. Development of adaptive fiber collimators for conformal fiber-based beam projection systems [C]. SPIE, 2008, 7090: 709008.
- 14 Li Xinyang, Ling Ning, Chen Donghong, *et al.*. Stable control of the fast steering mirror in adaptive optics system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11(1): 31–36. 李新阳, 凌宁, 陈东红, 等. 自适应光学系统中高速倾斜反射镜的稳定控制[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(1): 31–36.
- 15 Zheng Junli, Ying Qiheng, Yang Weili. Signals and System [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 237. 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 237.

栏目编辑: 何卓铭