

傅里叶光谱仪的光程扫描控制系统设计

粘 伟, 刘兆军, 林 喆, 吴春楠

(北京空间机电研究所, 北京 100076)

摘 要: 为实现高信噪比、高光谱分辨率的光谱探测性能, 在时间调制型傅里叶变换光谱仪中, 需要控制反射镜往复精密摆动, 完成干涉光程差的均匀扫描调制。首先分析了光谱探测性能对光程扫描控制性能要求间的关系; 在此基础上, 针对星载干涉仪对光程差扫描的高性能要求, 给出了一种基于极点匹配的控制设计方法。该方法借助于状态反馈设计结果, 采用易于工程应用的前项和前馈环节加以有效实现, 简化了控制器的设计与实现难度。通过仿真试验, 验证了该方法的有效性。

关键词: 扫描控制; 极点配置; 星载干涉仪; 光程差

中图分类号: TM301.2; TH744 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)08-2085-07

Optical path scanning control system design of the Fourier spectrometer

Nian Wei, Liu Zhaojun, Lin Zhe, Wu Chunnan

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076, China)

Abstract: To achieve a high signal-to-noise ratio, high spectral resolution spectroscopy detection performance, it needs to control the mirror reciprocating precision swing to complete uniformity scan modulation of the interference optical path difference in time modulation type Fourier transform spectrometer. Firstly, the relationship between the spectral detection performance and the scanning control performance requirements was analyzed. On this basis, according to the high performance requirements, a controller design method based on the pole assignment was proposed. Referencing the state feedback design results, the forward and the feed-forward link was used to realize effectively. The controller design and the difficulty of the realization was simplified. The simulation results show that the proposed method is effective.

Key words: scanning control; pole assignment; spaceborne interferometer; optical path difference

收稿日期: 2012-12-10; 修订日期: 2013-01-25

基金项目: 国家重大科技专项工程

作者简介: 粘伟(1987-), 男, 硕士生, 主要从事空间光学遥感器总体设计与控制技术的研究。Email: nianwei1@126.com

导师简介: 刘兆军(1969-), 男, 研究员, 博士, 主要从事空间红外光学遥感、遥感器系统总体技术的研究。

Email: bisme@china.com

0 引言

傅里叶变换光谱仪通过对被测光束进行时间或空间调制获取干涉图信号,并通过对干涉图信号反演获取被测光谱信息^[1]。它可获得景物目标精细光谱,从而可以识别地物目标的化学组成,以判断是否伪装、武器弹药性质以及水体特性等,可用于天文物理研究、地球资源普查、监视全球污染与灾害,还可用于大气层中微量成分的探测。用于大气微量成分探测的傅里叶变换光谱仪为了获取高光谱分辨率数据,在时间调制型傅里叶光谱仪中,系统需要控制反射角镜往复精密摆动,完成干涉光程差的均匀扫描调制。此类摆动扫描控制系统要求具备摆动频率稳定、扫描线性段速率稳定性高、扫描换向段运动平滑性好等特点。

文中针对某星载傅里叶变换光谱仪,首先给出了光谱探测信噪比与光程扫描运动控制性能间的关系;通过被控对象的数学模型,建立了系统的状态空间表达式;理论分析给出期望极点,得到状态反馈增益矩阵;考虑星载仪器控制系统的可实现性与可靠性,为避免位置/速度/电流三环复合回路控制方法的复杂性以及状态观测器中状态估值的不准确性,提出了基于极点匹配的控制设计及其实现方法,并通过仿真验证了该方法的有效性。

1 干涉仪对光程扫描稳定性要求分析

对单色光而言,光谱仪接收到的干涉信号可表示为:

$$I(\delta, \lambda) = 4RTB_0(\lambda) \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (1)$$

式中: λ 为光波长; δ 为位相差; R 为分束镜反射率; T 为分束镜的透射率; $B_0(\lambda)$ 为光源光谱亮度。用波数 σ 代替 λ ,光程差代替位相差 $\delta=2\pi\sigma x$,由三角函数公式,公式(1)可改写为:

$$I(x, \sigma) = 2RTB_0(\sigma) + 2RTB_0(\sigma) \cos(2\pi\sigma x) \quad (2)$$

仅考虑对光谱测量有实际意义的余弦调制项,对波数积分,可得到全光谱范围的干涉图像函数:

$$I_D(x) = \int_{-\infty}^{\infty} 2RTB_0(\sigma) \cos(2\pi\sigma x) d\sigma \quad (3)$$

对公式(3)作傅里叶变换可得到光源的光谱分布

函数,即光谱信息:

$$B(\sigma) = \frac{1}{2} RT \int_{-\infty}^{\infty} I_D(x) \cos(2\pi\sigma x) dx \quad (4)$$

由公式(4)可知,干涉图到光谱图的反演主要受光程差 x 的影响, dx 的稳定性取决于扫描运动的稳定性,直接决定了反演精度^[2]。根据叠加原理,将公式(3)写为单一光谱的线性叠加:

$$I_D(x) = \sum_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} 2RTB_0(\sigma) \cdot [\delta(\sigma_1) + \delta(\sigma_2) + \dots] \cdot \cos(2\pi\sigma x) \quad (5)$$

式中: δ 为狄拉克函数,满足 $\delta(\sigma_i) = \begin{cases} 1 & \sigma = \sigma_i \\ 0 & \text{others} \end{cases}$ 。

由于光程扫描不稳定,存在光程采样位置误差 Δx ,公式(5)可重写为:

$$I_D(x + \Delta x) = \sum_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} 2RTB_0(\sigma) \cdot [\delta(\sigma_1) + \delta(\sigma_2) + \dots] \cdot \cos(2\pi\sigma(x + \Delta x)) = \sum_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} 2RTB_0(\sigma) \cdot [\delta(\sigma_1) + \delta(\sigma_2) + \dots] \cdot [\cos(2\pi\sigma x) \cos(2\pi\sigma \Delta x) - \sin(2\pi\sigma x) \sin(2\pi\sigma \Delta x)] \quad (6)$$

则 $\sigma = \sigma_1$ 时,单色光谱干涉图为:

$$I_D(x + \Delta x) = 2RTB_0(\sigma_1) \cdot [\cos(2\pi\sigma_1 x) \cdot \cos(2\pi\sigma_1 \Delta x) - \sin(2\pi\sigma_1 x) \sin(2\pi\sigma_1 \Delta x)] \quad (7)$$

将公式(7)代入公式(4)中,根据傅里叶变换的性质以及正余弦傅氏积分公式,最终得出当光程差变化时,干涉图到光谱图的反演结果为:

$$B(\sigma_1) = R^2 T^2 B_0(\sigma_1) [\cos(2\pi\sigma_1 \Delta x) - \sin(2\pi\sigma_1 \Delta x)] \quad (8)$$

公式(8)是当光程差存在误差时对单一谱线的影响。可见,当为全色谱即光谱波数发生变化时, Δx 对光谱的影响程度不同,波数越大,对其影响也越大。

Δx 是由摆臂扫描速度波动 Δv 和红外探测器的积分时间 τ_{IR} 共同决定的,对于确定的探测系统, τ_{IR} 为定值。而 Δx 、 Δv 、 τ_{IR} 近似有如下关系:

$$\Delta v \cdot \frac{\tau_{IR}}{2} = \Delta x \quad (9)$$

可以得到摆臂扫描速度波动与信噪比之间的关系:

$$SNR_{\sigma} = \frac{1}{1 - \cos(\pi\sigma\Delta v\tau_{IR}) + \sin(\pi\sigma\Delta v\tau_{IR})} \quad (10)$$

从公式(10)可知,光程差速度的波动会影响信噪比的大小,且光谱波数越高,对光程扫描稳定性要求

越高。

2 光程扫描运动系统分析

2.1 系统组成与控制性能要求

星载迈克尔逊干涉仪在光程差扫描时需完成小角度范围内的往复摆动,系统采用带挠性枢轴的音圈电机作为扫描的执行器件。电机与摆臂之间采用挠性枢轴连接,可以有效克服轴承连接带来的摩擦力矩的影响。摆臂式迈克尔逊干涉仪应用摆臂上对称固定的角镜来完成光程差调制,可在较小空间内实现大的光程差扫描,其组成与光路如图 1 所示。

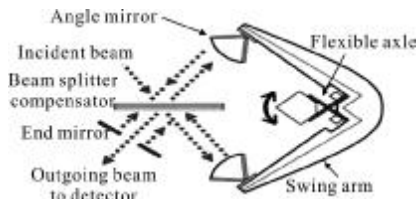


图 1 摆臂式迈克尔逊干涉仪组成与光路图

Fig.1 Michelson interferometer composition and optical path diagram

由于双镜运动的摆臂形式,加上端镜作用,使得整个光路的最大光程与机械行程之间形成了 8:1 的关系,当摆臂转动角度 θ ,干涉光程差表示为:

$$OPD=8l_b \sin\theta(t) \tag{11}$$

其中, l_b 为摆臂臂长,考虑小角度范围摆动, $\sin\theta(t)$ 近似等于 $\theta(t)$ ^[4],可近似有如下关系:

$$OPD=8l_b \sin\theta(t) \approx 8l_b \theta(t) \tag{12}$$

该星载傅里叶变换光谱仪的光谱波数范围为 $750 \text{ cm}^{-1} \sim 4\ 100 \text{ cm}^{-1}$,为达到高光谱分辨率的设计要求,在红外干涉图采样中引入计量激光提取采样脉冲触发,激光波长 $\lambda=1\ 552 \text{ nm}$ 。根据第一节分析可知,只要最大波数满足要求,则可以实现干涉图到光谱图的等效转换。已知参数, $\tau_{IR}=10^{-7} \text{ s}$, $V_{OPD}=25 \text{ cm/s}$,信噪比要求大于 70 dB,取最大波数 $\sigma=4\ 100 \text{ cm}^{-1}$,由公式(10)得到 Δv 与 SNR 的关系曲线图如图 2 所示。

从图 2 可以得到,SNR 是 Δv 的单调减函数。当信噪比要求大于 70 dB 时,对应的速度波动要求小于 $0.002\ 5 \text{ m/s}$ 。因此对速度稳定性的要求为 $\Delta v/V_{OPD}<1\%$ 。

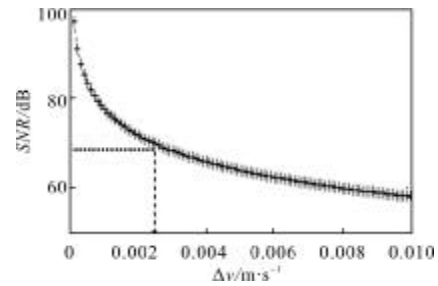


图 2 波数最大时速度变化与信噪比关系图

Fig.2 Speed changes with SNR in maximum wave number

当速度稳定性满足要求时,得到的信噪比随光谱波数变化曲线如图 3 所示,可知,在探测的光谱范围内,系统信噪比满足要求。

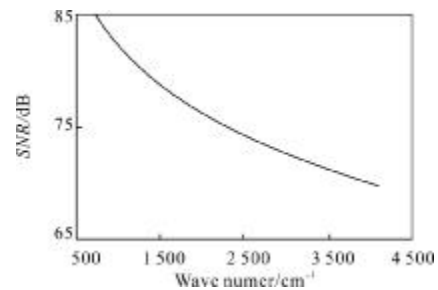


图 3 信噪比随光谱波数变化图

Fig.3 Changes of the SNR with spectral wave number

根据光谱仪探测效率的要求,有效探测时间即光程差匀速段的采样时间应不小于整周期的 97%,由匀速段时间为 2 s 得到系统的调头时间要求小于等于 120 ms,如图 4 所示。

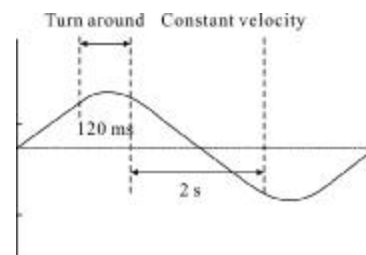


图 4 扫描曲线及调头段时间示意图

Fig.4 Scan curve and turn around time diagram

因此,光程扫描控制系统在采样段即光程差匀速运动段要求光程差速度稳定在 1% 以内;在调头段,系统的调整时间要求小于 0.12 s。当两者同时满足要求时才能实现干涉图到光谱图的等效转换。

2.2 状态空间模型

光程扫描过程中,电机的电压方程和运动方程

$$E = U - YH = U - YH + UH - UH = (U - Y)H + U(1 - H) \quad (21)$$

从而可将系统等价为:

$$Y = \frac{(1 - H)G}{1 + GH} + \frac{GH}{1 + GH} \quad (22)$$

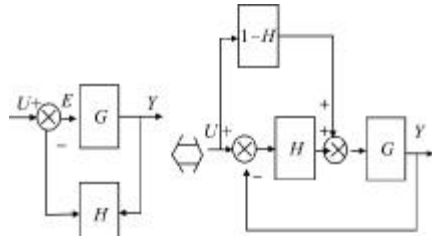


图 6 系统等价原理图

Fig.6 System equivalent schematic

H 为前项校正环节,其幅相频率特性及校正作用如图 7 所示,在频率 $\omega=148 \text{ rad/s}$ 处提供 55° 的相角裕度。

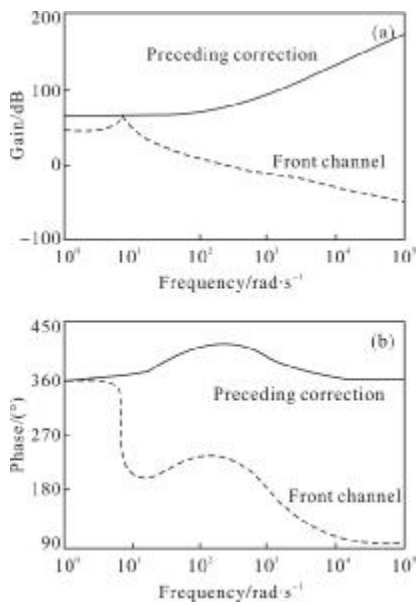


图 7 前项校正环节及前向通道的幅相频特性

Fig.7 Preceding correction and front channel bode diagram

考虑系统的可实现性,补入极点,得:

$$H_1 = K_1 \times \frac{(\tau_1 s - 1) \times (\tau_2 s + 1)}{(\tau_3 s + 1) \times (\tau_4 s + 1)} \quad (23)$$

根据上述剪切频率与相角裕度的要求,计算选取 $\tau_3 = \tau_4 = 0.0005$,在系统带宽内等价关系如图 8 所示。

对于前馈环节 $1 - H$,其传递函数形式为:

$$1 - H = 0.3 \times \frac{Js^2 + K_f}{K_T} - 21.9s - 1 \quad 216.7 \quad (24)$$

将其看作位置指令、速度指令和加速度指令各

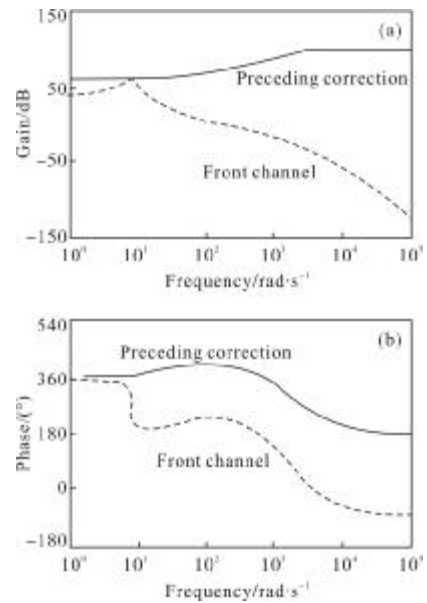


图 8 可实现的前项校正环节与前向通道的幅相频率特性

Fig.8 Achieved preceding correction and front channel bode diagram

乘相应系数再相加。干涉仪摆臂的运动是一种规律性的往复运动,可通过离线算法获取该规律性运动的高阶信息^[8]。根据扫描运动要求的扫描周期 T_s ,扫描速 ω_s ,扫描线性段范围 θ_s ,分段规划一个扫描周期内的扫描运动曲线表达式如下:

$$p(t) = \begin{cases} \omega_s \times t & 0 \leq t < t_1 \\ \theta_s + A \sin(2\pi\lambda(t - t_1)) & t_1 \leq t < t_2 \\ \theta_s - \omega_s \times (t - t_2) & t_2 \leq t < t_3 \\ -\theta_s - A \sin(2\pi\lambda(t - t_3)) & t_3 \leq t < t_4 \\ -\theta_s + \omega_s \times (t - t_4) & t_4 \leq t < T_s \end{cases} \quad (25)$$

进一步计算出速度曲线 $\omega(t)$ 与 $\alpha(t)$,规划得到的曲线图如图 9 所示。

$$\omega(t) = \begin{cases} \omega_s & 0 \leq t < t_1 \\ 2\pi\lambda A \cos(2\pi\lambda(t - t_1)) & t_1 \leq t < t_2 \\ -\omega_s & t_2 \leq t < t_3 \\ -2\pi\lambda A \cos(2\pi\lambda(t - t_3)) & t_3 \leq t < t_4 \\ \omega_s & t_4 \leq t < T_s \end{cases}$$

$$\alpha(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_1 \\ -4\pi^2\lambda^2 A \sin(2\pi\lambda(t - t_1)) & t_1 \leq t < t_2 \\ 0 & t_2 \leq t < t_3 \\ 4\pi^2\lambda^2 A \sin(2\pi\lambda(t - t_3)) & t_3 \leq t < t_4 \\ 0 & t_4 \leq t < T_s \end{cases} \quad (26)$$

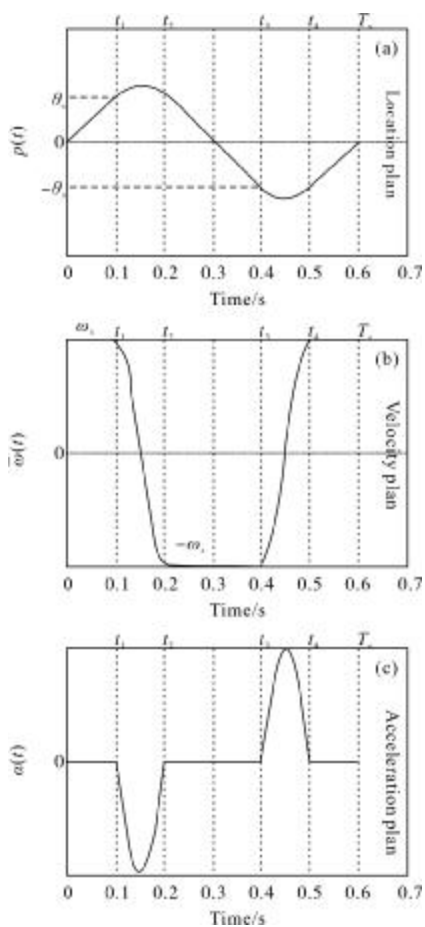


图 9 摆动扫描运动规划曲线图

Fig.9 Swing scanning motion planning graph

因此得到前馈环节的实现形式如图 10 所示。

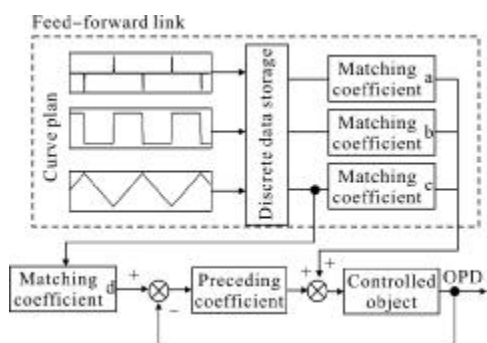


图 10 前馈环节实现原理图

Fig.10 Feed-forward link achieving schematic

根据已经规划好的位置、速度、加速度指令将前馈环节加以实现,无需再增加任何测量信息。经过上述分析,可以得到系统的闭环特征方程并计算得到闭环主导极点为:

$$p_1 = -85 + j47.13, p_2 = -85 - j47.13$$

由此可见系统闭环极点满足期望的极点要求,上述过程有效地完成了系统的工程实现问题。对系统的跟踪性能与扫描速度稳定性仿真验证,得到的结果如图 11 所示。可知调头段调整时间小于 120 ms 稳态段速度稳定性远小于 1。

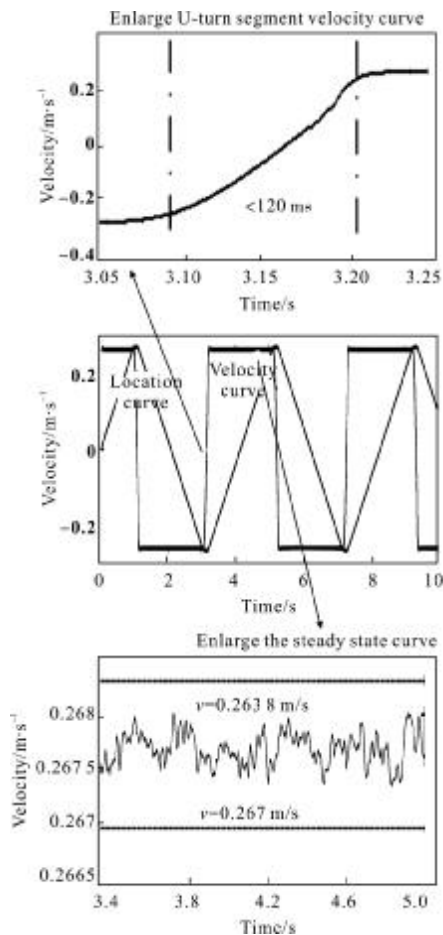


图11 输出的位置跟踪曲线和速度曲线

Fig.11 Output location tracking and velocity curve

4 结 论

高分辨率光谱探测对星载干涉仪的光程扫描系统有极其严苛的要求,光程扫描速度波动直接影响了系统的信噪比,且随光谱波数的增大对其影响越大,对光程扫描速度稳定性要求也越高,其稳定性直接决定了干涉图到光谱图的等效转换。文中根据扫描运动控制系统的状态空间模型,由状态反馈实现期望的极点配置,达到了干涉仪控制系统对位置跟踪性能及光程差速度稳定性的要求。考虑工程实现性和可靠性,提出了基于前馈和前项校正环节的控制器设计方法,并对控制方法的实现问题做了进一

步处理,保证了系统的可实现性。通过仿真试验,确定了该方法在扫描控制中的可行性。文中所提出的控制器设计方法对控制系统设计有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Zhang Chunmin. Interference Imaging Spectrometer Technology [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
张淳民.干涉成像光谱技术[M].北京:科学出版社,2010.
- [2] Guan Enyi, Wang Ping, Fan Dongdong, et al. B3M infrared fourier transform spectrometer sampling pulse error research [J]. Optical Technique, 2009, 35(S): 74-76. (in Chinese)
管恩义,王平,范东栋,等. B3M 傅里叶变换红外光谱仪干涉图采样触发信号的误差研究 [J]. 光学技术, 2009, 35(S): 74-76.
- [3] Zhiqiang Gao, Shaohua Hu, Fangjun Jiang. A novel motion control design approach based on active disturbance refection [C]//IEEE Conference on Control and Decision, 2001: 4877-4882.
- [4] Fu Pingping, Hong Huajie, Lei Jinli, et al. Design and realization of fuzzy PI algorithm for stability control of photoelectric stabilized platform [J]. Opto -Electronic Engineering, 2009, 36(3): 46-51. (in Chinese)
负平平,洪华杰,雷金利,等. 光电稳瞄稳定控制模糊PI算法设计与实现[J]. 光电工程, 2009, 36(3): 46-51.
- [5] Zhang Defeng. MATLAB Automatic Control System Design [M]. Beijing: China Machine Press, 2010. (in Chinese)
张德丰. MATLAB 自动控制系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [6] Richard C Dorf, Tobert H Bisgop. Modern Control System [M]. London: Pearson Education, 2002.
- [7] Cao Lihua, Li Hongwen. Design and simulation of servo system based on state-space averaging method [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2006, 27 (Z3): 1957-1959. (in Chinese)
曹立华,李洪文. 基于状态空间平均法的伺服控制系统设计与仿真[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(Z3): 1957-1959.
- [8] Donald Ruffatto, Donald Brown. Stabilized high-accuracy optical tracking system [C]//SPIE, 2001, 4365: 10-18.

会议论文发表在正式期刊, Ei 收录! 投稿截止时间: 2013 年 9 月 30 日

2013 年大气光学及自适应光学技术发展研讨会

2013 年 11 月 14-16 日 安徽 合肥

会议网站: www.cnoenet.com/2013atmospheric-optics/

投稿网站: www.manuscript-cnoenet.com

主办单位: 中科院大气成分与光学重点实验室

中科院自适应光学重点实验室

大会主席:

姜文汉院士(中科院光电所)

龚知本院士(中科院安徽光机所)

潘德炉院士(国家海洋局海洋二所)

征文方向:

- ◆ 大气光学特性(大气成分的光物理和光化学特性;大气湍流光学特性;云和天空背景辐射特性,等)
- ◆ 激光与红外大气传输
- ◆ 混浊和湍流大气中的成像
- ◆ 自适应光学技术与系统
- ◆ 大气传输与成像的自适应光学校正
- ◆ 天文观测与选址
- ◆ 激光雷达大气探测技术、大气环境监测新技术等
- ◆ 光学遥感及其大气校正
- ◆ 自由空间光通信大气校正技术,等

会议秘书处联系方式:

联系人: 李瑾, 邓伟 电话: 022-58168516; 投稿技术咨询: 常磊 电话: 022-58168515

电子邮箱: lijin@cnoenet.com