

文章编号 1004-924X(2010)10-2137-06

校正水平湍流波面的自适应光学系统的带宽需求

刘超^{1,2}, 胡立发¹, 穆全全^{1,2}, 曹召良¹, 高峰³, 王永伟³, 宣丽¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 空军驻长春地区军事代表室, 吉林长春 130012)

摘要:设计和搭建用于湍流校正的自适应光学系统时,必须考虑大气湍流波面校正所需的系统带宽。由于通常理论估计与实际湍流情况相差很大,本文对如何进行带宽的精确测量进行了研究。通过对500 m水平距离湍流波面的大量统计,分析了湍流波面的时间功率谱密度,得出了所需要带宽(Greenwood频率)的大小,并且首次得到了带宽需求的昼夜变化规律。实验发现,所需带宽在晚上变化缓慢,围绕10~15 Hz波动;白天变化剧烈,在20~90 Hz波动。最后,通过实验确定出了功率谱密度估计所需的采样总时间为70 s,得到的实验结果为设计和搭建更加合理的自适应光学系统提供了实验依据。

关键词:自适应光学; Greenwood频率; 带宽; 水平湍流; 功率谱密度

中图分类号: TH743; O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101810.2137

Bandwidth requirements of adaptive optical system for horizontal turbulence correction

LIU Chao^{1,2}, HU Li-Fa¹, MU Quan-quan^{1,2},
CAO Zhao-liang¹, GAO Feng³, WANG Yong-wei³, Xuan Li¹

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *Air-force Martial Representation of Changchun, Changchun 130012, China*)

Abstract: It is necessary to design an appropriate system bandwidth for an adaptive optical system to correct the atmospheric turbulence. Because the theoretical estimation for the turbulence is more different from the real atmospheric turbulence, this paper researched the method to measure the bandwidth accurately. Through measurement of the wavefront passed through 500 m of horizontal turbulence, the phase power spectral density of turbulence wavefront was analyzed, from which the circadian variation of the bandwidth requirement was obtained for first time. It shows that the bandwidth requirement is nearly steady around 10 to 15 Hz in night time, and strongly fluctuated around 20 to 90 Hz in day time. Furthermore, it points out that the total sampling time for the estimated bandwidth must be greater than 70 s in order to acquire a more precise result. There experimental results can

收稿日期: 2009-12-17; 修订日期: 2010-03-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60578035, 50703039); 吉林省与中国科学院科技合作项目(No. 2008SYHZ0005)

provide useful data for designing and can fabricate an more reasonable adaptive optical system.

Key words: adaptive optics; Greenwood frequency; bandwidth; horizontal turbulence; power spectral density

1 引言

大气湍流严重限制了地基大口径望远镜的角分辨率^[1]。为了克服大气湍流的影响,Backcock提出了利用自适应光学系统克服湍流扰动^[2]的方法。该方法的基本原理是:首先由波前探测器(Wavefront Sensor, WFS)^[3]探测出由于湍流扰动导致的畸变波前,然后由波前校正器(Wavefront Corrector, WFC)来校正探测到的畸变波面^[4]。假设波前探测和波前校正都非常准确,并且探测和校正的过程所花的时间很短以致可以忽略,则这个系统将会得到一个质量趋于衍射极限的图像。然而,实际的自适应光学系统,由于数据运算和设备的响应,从波前探测到波前校正都需要花费一段时间,致使系统存在延迟^[5]。如果这段时间很长,则实际的湍流波面已经发生改变,如若再用探测到的湍流波面来进行校正,则会出现校正效果变差,甚至完全没有校正效果的情况。因此,自适应光学系统应该以多快的速度来进行波面的校正,即自适应光学系统的带宽 f_{3dB} 应该是多少是亟需解决的问题。

然而对于带宽需求的问题,多数文章都在进行理论分析^[6-8],通过实验实际测量带宽的报道很少。理论分析中最著名的是 Greenwood 提出的一个频率指标 f_G ^[7](通常称为 Greenwood 频率),但国内外许多实验证明,Greenwood 的理论和实际不相符合^[9-11],特别是对于光透过近地面水平湍流传播的情况,由于地面温度对湍流的影响非常强,根本没有办法通过理论公式来计算湍流校正的带宽需求。为了设计和搭建更加合理的自适应光学系统,本文通过实验,测量出了水平湍流的带宽需求,并且首次给出了其昼夜变化的规律。

本文在测量所需带宽的过程中,给定的截止均方根残差与 Greenwood 理论给出的截止残差相同,都为 1 rad,故下文把实验测量得到的系统所需带宽也称为 Greenwood 频率(F_G)。

2 湍流的功率谱密度及 Greenwood 频率

Greenwood 频率 f_G 可以由

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} |1 - H(f, f_{3dB})|^2 F_{\Phi}(f) df = (f_G / f_{3dB})^{5/3}, \quad (1)$$

计算得出,其中 σ^2 为系统均方残差, f_{3dB} 为系统带宽, $H(f, f_{3dB})$ 为自适应光学系统闭环传递函数(RC filter)

$$H(f, f_{3dB}) = \frac{1}{1 + if / f_{3dB}}, \quad (2)$$

$F_{\Phi}(f)$ 为大气湍流的时间功率谱密度

$$\lim_{f \rightarrow \infty} F_{\Phi}(f) = 0.0326 k^2 f^{-8/3} \int_0^L C_n^2(z) v_{\perp}^{5/3}(z) dz. \quad (3)$$

该项计算需要用到大气湍流的功率谱密度 $F_{\Phi}(f)$,而功率谱的计算需要知道折射率结构常数 $C_n^2(z)$ 和横向风速随路径的分布 $v_{\perp}(z)$ 。在实验中,这两个参数的实际测量比较困难,所以本文用其他方法计算功率谱密度。

功率谱密度的定义为^[12]

$$F_{\Phi}(f) = 4 \int_0^{\infty} d\tau B_{\Phi}(\tau) \cos(2\pi f\tau), \quad (4)$$

其逆变换为

$$B_{\Phi}(t) = \int_0^{\infty} df F_{\Phi}(f) \cos(2\pi ft), \quad (5)$$

其中,因子 4 是由积分区域从 0 到 ∞ 产生的,如果积分区域从 $-\infty$ 到 $+\infty$,则因子变为 1。功率谱密度的单位是 rad^2/Hz , $B_{\Phi}(t)$ 是波面位相关函数

$$B_{\Phi}(\tau) = \langle \Phi(t) \Phi(t+\tau) \rangle, \quad (6)$$

其中, $\Phi(t)$ 表示波面上某点的位相单位为 rad, $\langle \rangle$ 表示求系综平均,实验中用时间平均代替系综平均。由式(4)可知,功率谱密度是位相关函数的 Fourier 变换。所以在实际测量实验中,首先采集合适个数的波面位相,求其相关函数,然后

作 Fourier 变换得到时间功率谱密度。

当得到功率谱密度以后,由式(1)的积分运算,理论上就可以计算出 f_G 。然而,由于自适应光学系统闭环传递函数 $H(f, f_{3dB})$ 中含有参数 f_{3dB} ,进行数值积分时存在困难,故首先采用垂直截止(Binary filter)的闭环传递函数

$$H(f, f_{3dB}) = \begin{cases} 1, & f \leq f_{3dB} \\ 0, & f > f_{3dB} \end{cases}, \quad (7)$$

带入式(1),得到系统残差 rms 与系统带宽 f_{3dB} 的关系。当 rms 等于 1 rad 时,对应的系统带宽 f_{3dB} 便是 f_G 。对于采用 RC filter 的闭环传递函数,其 f_G 是采用 Binary filter 的 2.7 倍^[7]。

由式(3)可以看出,理论上得出的功率谱在高频段是与频率的 $-8/3$ 次方成正比的,而在实际湍流功率谱的测量中,有时并不满足此关系^[9]。但上面根据实际测量的功率谱密度来估计 f_G 的方法仍然适用。

3 实验结果

3.1 实验装置和参数

在相距约 500 m 的两个房间中进行光的发射和波面的接收探测实验,具体实验装置如图 1 所示。在发射端,用光纤束和一个离轴反射镜来模拟无限远发光的物体。离轴反射镜的口径为 235 mm,焦距为 500 mm,光纤束的直径为 1 mm,把光纤束放在离轴反射镜的焦点附近,接收端望远镜口径为 406 mm,焦距为 1 829 mm。用 Shack-Hartmann 波前探测器(SHWFS)^[3,13]探测波前畸变,其微透镜平面与望远镜主镜共轭。SHWFS 口径为 3 mm,其微透镜数为 415 个,微透镜直径为 $157.5 \mu\text{m}$,焦距为 3 mm 并成六角排列。SHWFS 的 CCD 像素数为 128×128 ,像素尺寸为 $24 \mu\text{m}$ 。实验中,曝光时间取 2 ms,即采样频率为 500 Hz。在 500 m 的路径上,主要为草皮,沥青路面,光传输路径距离地面约 12~15 m。

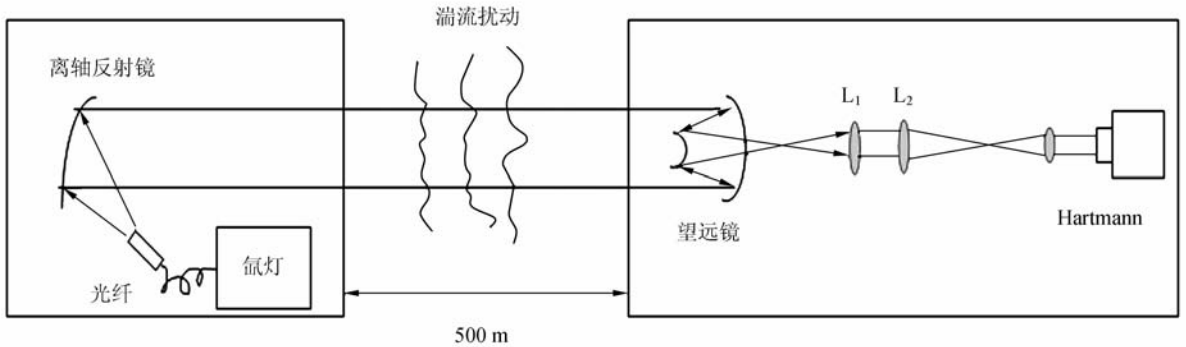


图 1 水平距离湍流测量实验装置

Fig. 1 Measuring setup of horizontal turbulence

3.2 功率谱密度与 Greenwood 频率的实验结果分析

实验中,由于 Hartmann 的 CCD 最小曝光时间为 2 ms,即采用频率为 500 Hz,采样本数为 35 000 个,总计 70 s,则功率谱密度的有效频率为 0.014~250 Hz。实践证明,用这样的频率范围来测量湍流的功率谱密度是合适的。然后,由式(4)和式(5)计算湍流的功率谱密度分布。在计算湍流的功率谱密度时,可以取湍流波面上不同的点进行分析,得到多个功率谱密度曲线,然后取平均,得到更加准确的湍流功率谱密度分布。图 2

给出了于 2009-07-18T 18:11 测出的 500 m 水平距离湍流的功率谱密度图,测量地点为长春光电子园区。从图 2 可以看出,湍流的低频成分所占的比重较大,而高频成分所占的比重较小。Greenwood 指出,湍流的功率谱密度在高频段与频率的 $-8/3$ 次方成正比,在低频段与频率的 $-2/3$ 次方成正比^[12]。由图 2 可知,实际测量的水平湍流功率谱在高频部分与理论的 $-8/3$ 次方吻合,在低频部分与理论的 $-2/3$ 次方有些偏差,实际的水平湍流在低频部分比频率的 $-2/3$ 次方更加陡峭。

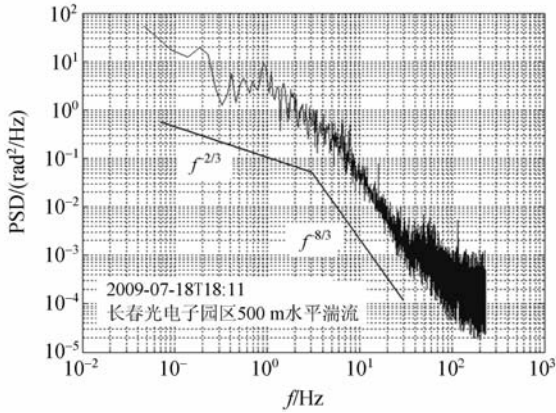


图 2 500 m 水平湍流功率谱密度

Fig. 2 Power spectrum of horizontal turbulence of 500 m

当得到湍流功率谱密度后,把其和式(7)带入式(1)进行数值积分,便得到在 Binary filter 的情况下,均方残差与需要的系统带宽的关系曲线。由于实际的自适应光学系统的闭环传递函数为式(2)所表现的 RC filter 形式,故需将先前计算出来的 $\sigma^2 \sim f_{3dB}$ 曲线的横坐标扩大 2.7 倍,这样便得到了在 RC filter 情况下的 $\sigma^2 \sim f_{3dB}$ 曲线(如图 3 所示)。从图 3 可以看出,随着自适应光学系统带宽的增加,均方残差 σ^2 减小。根据 f_G 的定义,当系统带宽 f_{3dB} 等于 f_G 时,均方残差等于 1 rad^2 ,故可据此定出 f_G 的大小。在图 3 中,当均方残差 σ^2 等于 1 rad^2 时,对应的频率即为 f_G ,等于 15 Hz。

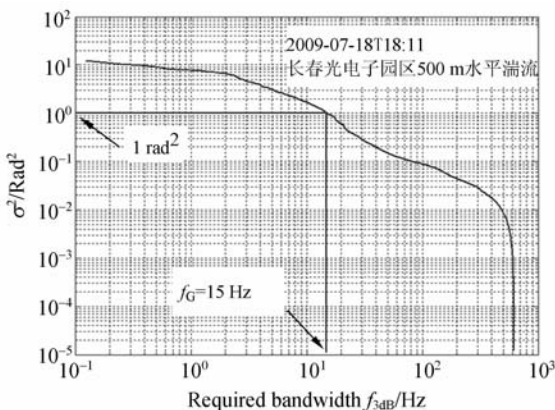


图 3 均方残差与需要的系统带宽的关系

Fig. 3 Relationship between square residual error and bandwidth required

对于昼夜 f_G 的变化情况,可每间隔 30 min 进行一次采样。按照上面介绍的方法确定出 f_G 的大小。图 4 给出了 500 m 水平湍流 f_G 的昼夜变化曲线。测量的时间为 2009-07-18T18:00 到 2009-07-19T21:00,地点为长春光电子园区。由图 4 可知, f_G 在晚上较小,居于 4~15 Hz,并且变化缓慢;而白天较大,波动区间较宽,为 15~65 Hz。从上午 6:00 到 12:00, f_G 逐渐由 10 Hz 上升到 65 Hz 左右;从 12:00 到 18:00 其又逐渐从 65 Hz 下降到约 10 Hz。

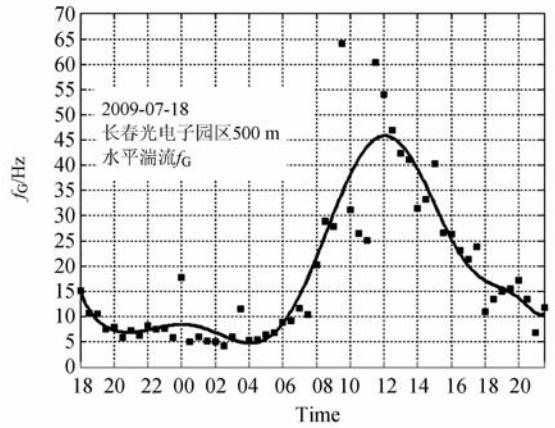


图 4 f_G 的昼夜变化(测量时间 2009-07-18T18:00~2009-07-19T22:00)

Fig. 4 Circadian variation of f_G (measured from 2009-07-18T18:00 to 2009-07-19T22:00)

为了确定数据的可信度,同时还测量多个 f_G 的昼夜变化曲线。图 5 给出了在同样的测量

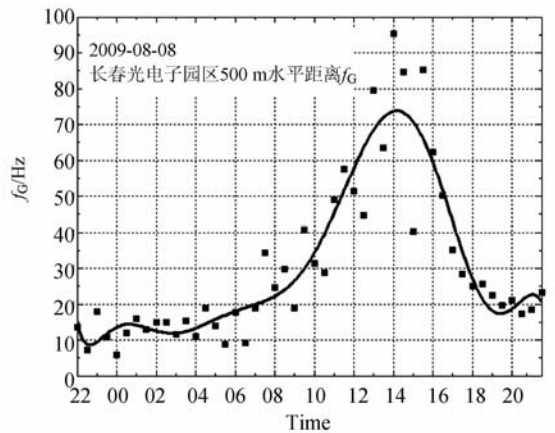


图 5 f_G 的昼夜变化(测量时间 2009-08-08 T 22:00~2009-08-09T22:00)

Fig. 5 Rircadian variation of f_G (from 2009-08-08T22:00 to 2009-08-09T22:00)

条件下,从 2009-08-08T22:00 开始测量 f_G 的昼夜变化曲线,从图 5 可以看出, f_G 的昼夜变化趋势与图 4 基本相同,只是 f_G 整体都偏大一些,峰值也向后移动了 2 h,这主要与当日的温度分布,风速等气候条件有关。

3.3 功率谱密度估计所需波面采样长度的确定

对于湍流波面测量样本的个数,需要用实验来确定。如果波面个数太少,即会导致功率谱密度的频率分辨率过低,使测得的湍流功率谱密度不能反映湍流的真实情况,给 f_G 的估计带来误差。如果波面个数太多,则会增加数据处理时间,浪费存储空间。假设采样样本的个数达到某个数值以后,其数值的增加已不再影响 f_G ,则这个数值就是所需要达到的采样样本数。在一个天气良好,湍流变化缓慢的时间,测量了大量湍流波面,然后计算了在不同的采样样本数的情况下 f_G 的

大小。图 6 给出了在 3 个不同的时段,分别测量的 10 万个湍流波面(采样频率 f_s 为 500 Hz),总计时间为 200 s。然后计算得出了总采样时间 2~200 s 的 f_G 的大小情况。

从图 6 从可以看到,当采样总时间超过 70 s 以后, f_G 不再改变,故需要采样的样本数 N 应该达到 35 000。

4 结 论

通过对长春光电子园区的 500 m 水平距离湍流的湍流波面的大量统计,分析了其时间功率谱密度。发现水平距离湍流的主要频率成分集中在低频段(小于 10 Hz),而高频段的频率成分所占比重较小。实际测得的湍流功率谱密度与理论预言有些差异。在高频段与理论预言相同,即功率谱密度与频率的 $-8/3$ 次方成正比。然而在低频段,实际测得的功率谱密度比理论预言的随频率变化的 $-2/3$ 次方略微陡峭。提出了根据实际测得的功率谱密度确定 f_G 的方法,并统计了其在 24 h 内的变化规律。发现 f_G 在(约从晚上 18:00 到第二天 7:00)变化缓慢,围绕 5~10 Hz 波动;白天变化剧烈,上午随着气温的上升而上升(从 10~60 Hz 或 90 Hz 左右),至正午时分达到最大值(60~90 Hz,随着不同测量时段有所差异),然后下午又随着气温的下降而下降,到达 18:00 以后,又围绕 5~10 Hz 的区间波动。最后还通过实验确定了湍流波面的最佳采样总时间为 70 s。总之,通过对 f_G 频率的估计,给自适应系统的设计和构建提供了实验依据,从而保证了系统设计和构建的科学性。

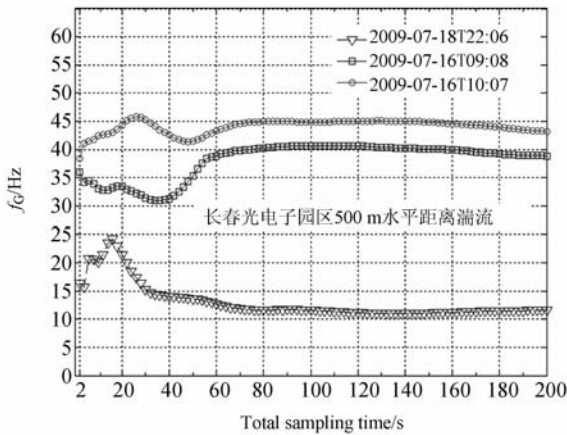


图 6 f_G 与采样总时间的关系

Fig. 6 Relationship between Greenwood frequency and total sampling time

参考文献:

- [1] RODDIER F. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy[J]. *Progress in optics.*, 1981, 19:281-376.
- [2] BABCOCK H W. The possibility of compensating astronomical seeing[J]. *Publ. Astron. Soc.*, 1953, 65:229-236.
- [3] PLATT B. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing[J]. *Journal of Refractive Surgery.*, 2001, 17(5):573-577.
- [4] RODDIER F. *Adaptive Optics in Astronomy*[M].

Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

- [5] FRIED D L. Time-delay-induced mean-square error in adaptive optics[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1990, 7(7):1224-1225.
- [6] TYLER G A. Bandwidth considerations for tracking through turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1994, 11(1):358-367.
- [7] GREENWOOD D P. Bandwidth specification for adaptive optics systems[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, 67(3):390-393.
- [8] CONAN J M, ROUSSET G, MADEC P Y. Wavefront temporal spectra in high-resolution imaging

through turbulence [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, 12(7):1559-1570.

- [9] RAO C H, JIANG W H, LING N. Spatial and temporal characterization of phase fluctuations in non-Kolmogorov atmospheric turbulence[J]. *Journal of Modern Optics*, 2000, 47(6):1111-1126.
- [10] KIBBLEWHITE E, CHUN M. Design of tip-tilt and adaptive optics servos using measured angle-of-arrival and phase power spectra [J]. *SPIE*, 1998, 3353:522-530.
- [11] MCGAUGHEY D, JM AITKEN G. Temporal analysis of stellar wave-front-tilt data[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14

(8):1967-1974.

- [12] GREENWOOD D P, FRIED D L. Power spectra requirements for wave-front-compensative systems [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, 66(3):193-206.
- [13] 李华强, 宋贺伦, 饶长辉, 等. 增大夏克-哈特曼波前传感器动态测量范围的方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7):1203-1206.
- LI H Q, SONG H L, RAO C H, *et al.*. Extrapolation method to extend dynamic range of Shack-Hartmann wave-front sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(7):1203-1206. (in Chinese)

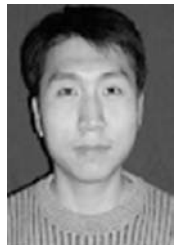
作者简介:



刘超 (1983—), 男, 四川安岳人, 博士研究生, 2007 年于西南大学获得学士学位, 主要从事大气液晶自适应光学校正成像、液晶自适应光学系统控制等方面的研究。E-mail: liuchao678@163.com



胡立发 (1974—), 男, 湖北武汉人, 博士, 副研究员, 2003 年于西北有色金属研究院超导材料研究所获得博士学位, 主要从事大气湍流的液晶自适应光学校正成像、液晶大气湍流模拟器等方面的研究。E-mail: hulifa@ciomp.ac.cn



穆全全 (1980—) 男, 山西吕梁人, 博士研究生, 助理研究员, 2003 年于南开大学获学士学位, 主要从事自适应光学技术及其应用、液晶光学器件等方面的研究。E-mail: muquanquan@ciomp.ac.cn



曹召良 (1974—), 男, 河南济源人, 博士, 副研究员, 1998 年于河南师范大学获学士学位, 2003 年、2008 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位, 主要从事液晶自适应光学、光学设计和衍射光学等方面的研究。E-mail: caozlok@163.com



高峰 (1963—), 男, 山西长安人, 硕士, 高级工程师, 毕业于空军导弹学院, 主要从事地空导弹与雷达的研究。



王永伟 (1983—), 男, 山西汾阳人, 本科, 助理工程师, 毕业于空军工程大学, 主要从事地空导弹与雷达的研究。

导师简介:



宣丽 (1957—), 女, 吉林长春人, 博士, 研究员, 博士生导师, 1983 年于吉林大学获得学士学位, 1986 年于中科院长春物理研究所获硕士学位, 1998 年于日本东北大学获得工学博士学位, 主要研究方向为液晶应用光学、液晶自适应光学工程、液晶器件物理、液晶合成及相关器件的光化学的研究。E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn