

文章编号: 0253-2239(2005)07-897-5

采用多波段 θ 调制器作多光谱照像技术的研究*

王 乐 方志良 冯德魁 杨 勇 刘福来

(南开大学现代光学所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要: 提出了一种用多波段 θ 调制的白光光学/数字图像处理作多光谱照相的技术,即通过使用多波段 θ 调制器对目标的某几个波段信息进行调制,使用傅里叶变换技术对各个多波段图像解调,可分别得到目标各波段的图像信息,然后通过假彩色融合得到目标多波段假彩色图像。从理论和实验上论证了使用多波段 θ 调制器与单个 CCD 探测器组成的多光谱照相系统,代替传统的多个相机构成的多光谱照相系统的可行性和优越性。该技术与传统多光谱照相技术相比,具有体积小、重量轻和假彩色融合操作简单方便等优点。

关键词: 图像处理; 多波段 θ 调制器; 调制; 解调; 空间频谱滤波; 假彩色融合

中图分类号: TP751 文献标识码: A

Study on Multispectral Photography with θ Multichannel Modulator

Wang Le Fang Zhiliang Feng Dekui Yang Yong Liu Fulai

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Optoelectronic Information Science
and Technology Laboratory, MOE, Tianjin 300071)

Abstract: A multispectral photography of white-light optic/digital image processing with θ -multichannel modulator is brought forward, in which θ -multichannel modulator is used to modulate the several waveband information of the object, and the technique of Fourier transform is employed to decode the modulated image, then waveband information of the object is demodulated. Afterwards, a multispectral pseudo-color image can be obtained by means of pseudo-color fusion. A new multispectral system consists of θ -multichannel modulator and a single CCD. And it proved to be feasible to substitute the new system for traditional one composed by several cameras with different bands. Compared with the traditional multispectral photography system, the new one has many advantages, such as small volume and weight, easy operation in pseudo-color fusion.

Key words: image processing; θ -multiple wave band modulator; modulate; demodulate; spatial spectral filtering; pseudo-color fusion

1 引 言

多光谱照相技术是航空遥感的重要手段,它可获得目标各波段的灰度图像,根据目标各波段图像灰度差异而叠加成不同的假彩色图像来判别目标的特性,其在地形地貌普查、水文、地质、气象、环境污染监测等领域具有重要的应用价值^[1]。传统的多光谱照相机是对目标的各波段信号分别探测来获取目标的多波段图像。即由多个相机组成一个多光谱照相系统,各个相机分别通过某一段滤波片仅对目标的某一段成像,由多个面探测器分别获得各波段的图像,然后将这些单波段图像通过一定的融合

方法合成一幅假彩色图像。

在航空航天遥感中对多光谱相机的重量和体积等的要求是非常严格的,传统多光谱照相系统设备复杂、庞大,难以满足要求;而且在假彩色融合时,不同波段光谱图像间的空间叠加配准和融合操作复杂^[2,3],容易出现明显的拼接痕迹^[4],不利于人眼识别和后续的目标识别过程。

南开大学的白光信息处理课题组曾经在利用三色光栅和黑白胶片实现彩色摄影方面取得重大进展^[5],发展了一套完整的编码解码方法及彩色校正方法并在实际中得到了应用^[6]。本文提出利用多波

* 国家自然科学基金(60278005)资助课题。

作者简介: 王 乐(1979~),男,南开大学现代光学研究所硕士研究生,主要从事光学信息处理方面的研究。

E-mail: zhoujuwei@mail.nankai.edu.cn

收稿日期: 2004-06-24; 收到修改稿日期: 2004-11-01

段 θ 调制的多光谱照相技术获得目标多波段图像, 即由多波段 θ 调制器和单个 CCD 探测器组成的多光谱照相系统代替传统的多镜头光谱照相系统, 形成新型的多光谱相机, 使多光谱照相系统大大简化, 图像假彩色融合也比较简单方便, 且融合结果不会出现拼接痕迹。

2 多波段 θ 调制器作多光谱照相的原理

2.1 多波段 θ 调制器的设计

传统的假彩色图像融合是在只有灰度差异的一组单波段图像中, 根据多光谱目标识别的需要选取几幅单波段图像, 然后通过一定的假彩色融合方法进行融合, 得到需要的多光谱图像。

我们将 θ 调制技术^[7]用于多光谱照相, 在制备多波段 θ 调制器时, 首先选取有利于目标识别的三组波段(中心波长为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$), 构成三个不同方向、

不同光谱透过率的龙基(Ronchi)子光栅。其结构特殊性在于: 三个龙基子光栅能够分别选择透过与之对应的波段信号, 即水平方向透过 λ_1 波段信号, 垂直方向透过 λ_2 波段信号, 135° 方向透过 λ_3 波段信号。三个子光栅依次覆盖在彩色反转片(基板)上进行曝光, 即可得到多波段 θ 调制器。因而, 多波段 θ 调制器可以看作是三个子光栅经三次曝光法得到的组合光栅(也可说成是一种彩色网屏)。三个龙基子光栅对不同波段的光波具有独立的选择透过性, 并将之进行一定空间频率的调制, 在子光栅发生重叠的位置上, 曝光后基板上相应的位置是三个波段光波(中心波长 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)的混合色, 它们能够同时从该位置通过。光栅的空间方位 θ 调制作用将图像的 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 波段的衍射一级频谱在频域上分离, 实现了不同波段光在同一空间位置上的复用。图 1 为多波段 θ 调制器的 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 波段光栅取向。

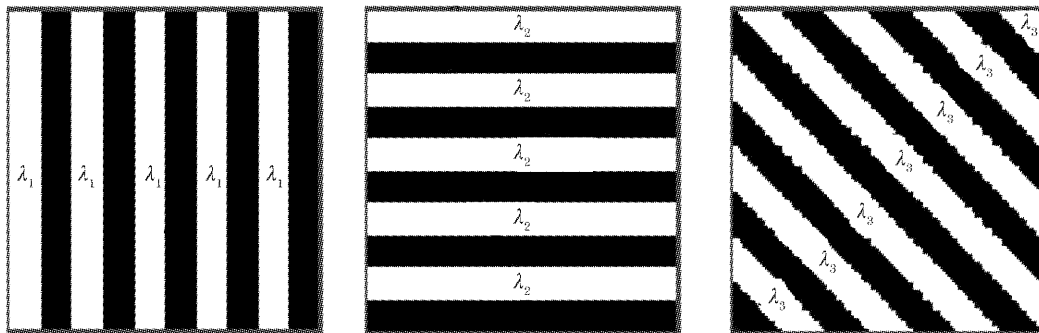


图 1 多波段 θ 调制器 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 波段光栅取向

Fig. 1 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ waveband grating orientation of θ -multichannel modulator

2.2 多波段 θ 调制图像的摄取

设组成多波段 θ 调制器的三个方向龙基子光栅的幅度为 A , 最小值为 a , 脉冲宽度为 t 的周期性矩形脉冲, 周期为 T , 占空比为 $d=t/T$ 。对应 λ_1 波段选取水平方向为 x 方向, 对应 λ_2 波段选取垂直方向为 x' 方向, 对应 λ_3 波段选取方向为 x'' 方向, 则多波段 θ 调制器的强度透过率可表示为

$$p_T(x) = p_{\lambda_1}(x)p_{\lambda_2}(x') + p_{\lambda_3}(x'') = a + (A-a)\text{rect}(x) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x+nT) + a + (A-a)\text{rect}(x') * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x'+nT) + a + (A-a)\text{rect}(x'') * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x''+nT), \quad (1)$$

其中 $\text{rect}(x)$ 表示一维矩形函数, “*” 表示卷积, $n = \pm 1, \pm 2, \dots$; T 为光栅周期; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为任意选

取的三个波段; x, x', x'' 对应光栅取向的空间坐标。

假定地物目标信号的函数表达式为

$$f(x, y) = f_{\lambda_1}(x, y) + f_{\lambda_2}(x, y) + f_{\lambda_3}(x, y), \quad (2)$$

其中 $f_{\lambda_1}(x, y), f_{\lambda_2}(x, y), f_{\lambda_3}(x, y)$ 分别为目标信号函数 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 波段的分量。

物函数通过 θ 调制器的物理过程是: 不同波段子光栅只能透过相应波长的物函数分量, 即水平方向透过 λ_1 波段信号, 垂直方向透过 λ_2 波段信号, 45° 方向透过 λ_3 波段信号。由此可知, 地物目标通过多波段 θ 调制器调制后, 其光强分布为

$$f'(x, y) = f_{\lambda_1}(x, y)p_{\lambda_1}(x) + f_{\lambda_2}(x', y')p_{\lambda_2}(x') + f_{\lambda_3}(x'', y'')p_{\lambda_3}(x''), \quad (3)$$

$(x, y), (x', y'), (x'', y'')$ 分别代表波段 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分量的空域坐标。该函数表明在一个感光介质或 CCD

探测器上同时记录了被调制的 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 目标的三个波段的图像信息。

3 由调制的多波段图像解调获得各单波段图像

对调制多波段图像作傅里叶变换, 可得到 θ 调制后空间信号的傅里叶频谱:

$$\begin{aligned} F'(u, v) &= F\{f'(x, y)\} = \\ &aF_{\lambda_1}(u, v) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n F_{\lambda_1}(u + nu_0, v) + \\ &aF_{\lambda_2}(u', v') + \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n F_{\lambda_2}(u' + nu_0, v') + \\ &aF_{\lambda_3}(u'', v'') + \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n F_{\lambda_3}(u'' + nu_0, v''), \quad (4) \end{aligned}$$

其中 $F_{\lambda_1}(u, v), F_{\lambda_2}(u', v'), F_{\lambda_3}(u'', v'')$ 分别为 $f_{\lambda_1}(x, y), f_{\lambda_2}(x', y'), f_{\lambda_3}(x'', y'')$ 图像信号频谱的傅里叶变换。

如果信号 $f(x, y)$ 为有限带宽函数, 即 $f(x, y)$ 有截止频率 p_m , 当 $\sqrt{u^2 + v^2} \geq p_m$ 时, $F(u, v) = 0$ 同时满足 $p_m \leq u_0/2$, 则在频率空间中, 对于任意的 n 值信号频谱 $F(u, v)$ 互不重叠。所以经过多波段 θ 调制后, 空间信号的频谱被调制到光栅的各衍射级上, 每一级频谱均包含了原图像的全部频谱信息, 因而可取任意一级频谱经傅里叶逆变换恢复原图像信号。

对 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 波段一级频谱分别使用空间滤波器进行频谱滤波。滤波后的图像频谱空间分布为 $C_1 F_{\lambda_1}(u, v), C_1 F_{\lambda_2}(u', v'), C_1 F_{\lambda_3}(u'', v'')$ 对滤波后的 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 波段一级频谱分别做傅里叶逆变换, 在图像空间可得 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 波段的解码图像:

$$\begin{cases} f_{\lambda_1} = F^{-1}\{C_1 F_{\lambda_1}(u + u_0, v)\} = \\ \quad C_1 \exp(-2\pi j u_0) f_{\lambda_1}(x, y), \\ f_{\lambda_2} = F^{-1}\{C_1 F_{\lambda_2}(u' + u_0, v')\} = \\ \quad C_1 \exp(-2\pi j u_0) f_{\lambda_2}(x', y'), \\ f_{\lambda_3} = F^{-1}\{C_1 F_{\lambda_3}(u'' + u_0, v'')\} = \\ \quad C_1 \exp(-2\pi j u_0) f_{\lambda_3}(x'', y''), \end{cases} \quad (5)$$

式中 $C_1 = (A - a)dsinc(\pi d)$ 。

由(5)式可以看出, 选择一级频谱通过频谱空间的滤波, 可以恢复出原 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 波段灰度图像, 与原目标 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 波段相比只差一个比例系数。

将这三个 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 波段解码灰度图像通过多通道彩色分量融合法^[8]和色调-明度-饱和度(HLC)融合法^[9,10]等方法, 可合成假彩色融合图像。

多通道彩色分量融合法是最简单的融合方法, 其步骤是将多波段 θ 调制解码图像分别指定为任意一种颜色分量, 然后在 RGB 颜色空间通过加色混色叠加原理, 直接叠加融合成一幅假彩色图像。

色调-明度-饱和度融合法的步骤为: 将多波段 θ 调制解码所得的 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 波段图像按逐个像素 p_i 的灰度 $I_1(p_i), I_2(p_i), I_3(p_i)$ 分别映射为 $L^* a^* b^*$ 空间的色调 $H(p_i)$ 、明度 $L(p_i)$ 和饱和度 $C(p_i)$, 然后通过颜色空间变换, 使 $L^* a^* b^*$ 颜色空间变换到 RGB 颜色空间, 然后在 RGB 颜色空间通过加色混色叠加原理合成为一幅假彩色图像。

4 θ 调制多光谱摄影的实验研究

根据多波段 θ 调制器的编、解码原理, 作了模拟实验。在设计多波段 θ 调制器时可以任意选取可见光中三个波段 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, 因此在实验中我们选取了 R(中心波长 $\lambda_1 = 700.00$ nm)、G(中心波长 $\lambda_2 = 546.1$ nm)、B(中心波长 $\lambda_3 = 435.8$ nm)三个波段。空间频率为 30 lp/mm。图 2 和图 3 为多波段 θ 调制器结构示意图和光谱透过率。

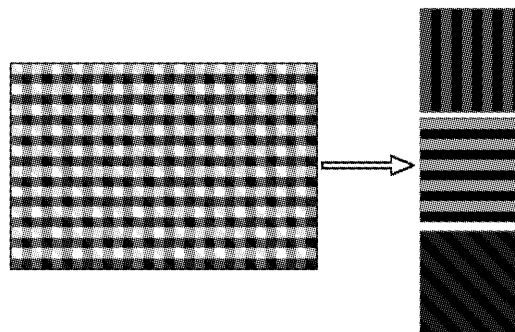


图 2 多波段 θ 调制器的示意图

Fig. 2 Sketch map of θ -multichannel modulator

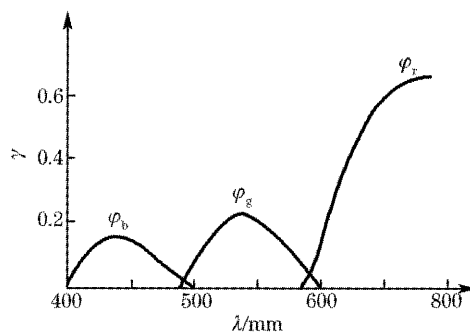


图 3 多波段 θ 调制器的光谱透射率

Fig. 3 Spectral transmissivity of θ -multichannel modulator

多光谱摄像系统装置中在照相机的像面上放置独特的光学多波段 θ 调制器, 对地物目标进行 θ 调

制,使用胶片或 CCD 面阵列探测器直接摄取图像,得到 θ 调制的多波段图像,如图 4(a)所示。编制了 θ 调制解调软件和假彩色融合软件。分别在频谱面作 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 波段频谱滤波,利用光学或数字傅里叶变换技术进行解码,即对 θ 调制的多波段图像解调,可分别得到目标的 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 波段灰度图像,如图 4

(b)~图 6(d)所示,然后通过假彩色融合,得到目标的多波段假彩色图像。

使用多波段 θ 调制相机对景物目标进行拍摄,得到景物的编码图,图 4 为使用多通道彩色分量融合法和色调-明度-饱和度融合法进行多波段 θ 调制融合实验得到假彩色图像的结果,如图 6(e)、图 6(f)所示。

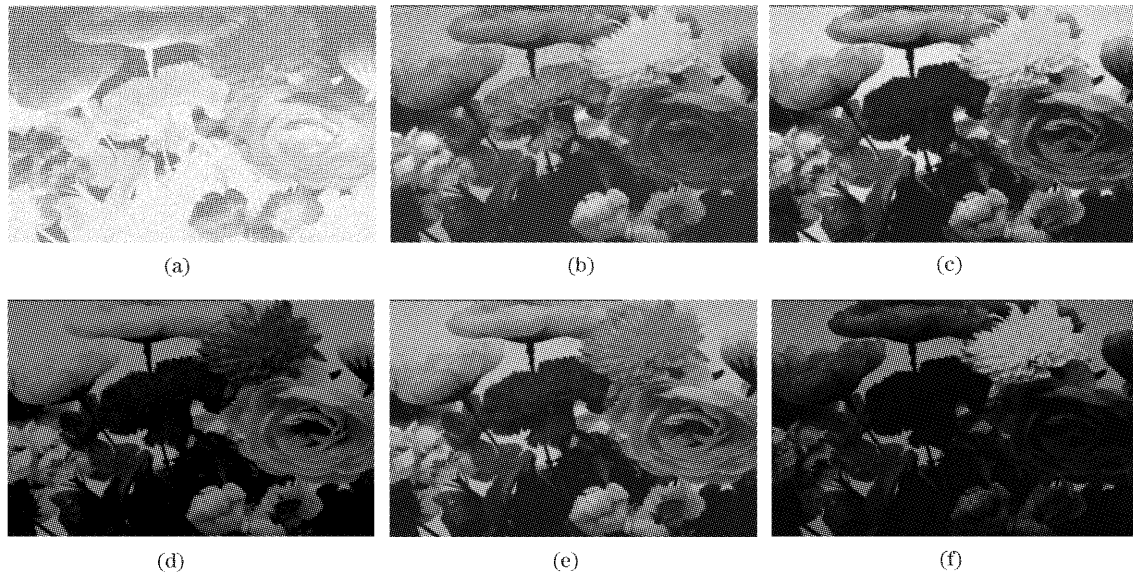


图 4 采用多通道 θ 调制器作彩色摄影的实验结果。(a) θ 调制编码图像,(b) λ_1 波段解码灰度图,(c) λ_2 波段解码灰度图,(d) λ_3 波段解码灰度图,(e) θ 调制多波段彩色分量融合法,(f) θ 调制色调-明度-饱和度融合法

Fig. 4 Experimental images of multispectral photography using θ -multichannel modulator. (a) θ -modulated encoding images, (b) decoding grey-scale map of λ_1 waveband, (c) decoding grey-scale map of λ_2 waveband, (d) decoding grey-scale map of λ_3 waveband, (e) θ -modulated color multichannel fusion method, (f) θ -modulated Hue-Lightness-Color fusion method

5 结 论

本文只限于对景物的可见光部分进行多光谱照相和假彩色融合,还没有作红外、远红外等波段的假彩色融合实验。在将来的研究中,我们将把 θ 调制多光谱照相系统和红外照相系统组成四波段二镜头多光谱相机,对可见光光谱和红外、远红外光谱进行假彩色融合,使目标更容易得到识别。还可进一步将多波段 θ 调制照相系统和全视场超光谱成像系统进行整合。利用多波段 θ 调制照相系统获取目标的高分辨率假彩色影像,利用全视场超光谱成像系统获取目标的高光谱分辨率影像,通过融合分析两种不同空间高分辨率影像,可同时实现普查和详查,达到及时、简便、准确地发现和识别地面感兴趣的目标。

参 考 文 献

- 1 C. Pohl. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1998, 19(5): 823~854
- 2 Qingxi Tong, Bing Zhang, Lanfen Zheng. Hyperspectral remote sensing technology and applications in China[C]. *Proc. SPIE*, 2001, 4548: 1~9
- 3 He Guojin, Li Kelu, Hu Deyong *et al.*. Information fusion of multisensor satellite remote sensing data: theory, methodology and experiment[J]. *J. Image and Graphics*, 1999, 4(9): 744~750 (in Chinese)
何国金,李克鲁,胡德永等. 多卫星遥感数据的信息融合:理论、方法与实践[J]. *中国图像图形学报*, 1999, 4(9): 744~750
- 4 Zhang Jiayou, Wang Jianshan. Infrared image fusion[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2000, 11(5): 537~539 (in Chinese)
张加友,王江安. 红外图像融合[J]. *光电子 • 激光*, 2000, 11(5): 537~539
- 5 White-light information processing group of Nankai University. The progress of technique on color photography with tricolor grating and black-white film[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(5): 546~555 (in Chinese)
南开大学白光信息处理课题组. 用三色光栅和黑白感光胶片作彩色摄影术的研究与进展[J]. *光学学报*, 1998, 18(5): 546~555
- 6 Luo Gang, Liu Fulai, Lin Lie *et al.*. Optical/digital color photography based on white-light information processing[J]. *Science in China (Series E)*, 2001, 44(2): 140~148 (in Chinese)
罗罡,刘福来,林列等. 基于白光信息处理的数字彩色摄影术[J]. *中国科学 E 辑*, 2001, 44(2): 140~148

- 7 Mu Guoguang. White-light optical information processing and its color photography[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2001, 12(3): 285~292 (in Chinese)
母国光. 白光光学信息处理及其彩色摄影术[J]. 光电子·激光, 2001, 12(3): 285~292
- 8 Zhao Wei, Mao Shiyi. A pixel-level multisensor image fusion algorithm based on false color[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(3): 368~371 (in Chinese)
赵 巍, 毛士艺. 一种基于假彩色的像素级多传感器图像融合算法[J]. 电子学报, 2003, 31(3): 368~371
- 9 Li Wei, Lin Xuemei. Color composite of multi-spectral images based upon perceptive uniform color space [J]. *Optical Technology*, 1997, 1(1): 10~12 (in Chinese)
李 为, 林雪梅. 基于均匀颜色知觉空间的多光谱图像彩色合成[J]. 光学技术, 1997, 1(1): 10~12
- 10 Zhang Zhimin, Zhang Tianqiao, Kang Dongzhou *et al.*. False color composite of multi-spectral RS images and its application in environmental geography[J]. *J. Imaging Technology*, 2002, (1): 33~36 (in Chinese)
张志敏, 张天桥, 康冬舟 等. 遥感图像多光谱假彩色合成处理及其在环境地学中的应用[J]. 影像技术, 2002, (1): 33~36



(上接封四)

3.7 参考文献 参考文献应是公开出版物,以便审者、编者、读者查证。文后参考文献以 GB/T 7714—1987 顺序编码制列出,每条内容应包括:作者(或译者,论文集编者,多于 3 人者用等或 *et al.*),文题,期刊名(或书名,会议名),出版年、卷、期(书或会议文集应相应列出版次、出版地、出版者、出版年、会议地点时间),起止页码。专利需列出专利性质及专利号。引用的网上出版物必须是固定的、可一直查阅的文献。中文参考文献应分别用中英文写出所有项目,并都须加上参考文献类型的标识:

参考文献类型	期刊	专著	论文集	学位论文	标准	专利	报告	报纸
文献类型标识	J	M	C	D	S	P	R	B

具体格式实例如下:

(1) 期刊:

Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Design of a new type interleaver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(12): 1424~1428 (in Chinese)
张 娟, 刘立人, 周 煜等. 一种新型的光交错复用器的设计[J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1424~1428

(2) 专著:

Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Metrology*[M]. Beijing: Science Press, 1998, 162~165 (in Chinese)
金国藩, 李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 162~165

(3) 译著:

Born M, Wolf E. *Principles of Optics*[M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press, 1978. 182~190 (in Chinese)
玻恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京: 科学出版社, 1978. 182~190

(4) 学位论文:

Zhang Jing. *LD Sensor for Weak Vibration Measurement and its Application in Muscle Vibration Measurement* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2000, 21~30 (in Chinese)
张 景. 激光二极管微振动传感器及其在肌肉振颤测量中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2000. 21~30

(5) 技术标准:

National Standardization Technical Committee. GB 3100~3102-93. *Quantities and Units* GB3100~3102-93[S]. Beijing: China Standard Press, 1994

国家标准化技术委员会. 量和单位 GB3100~3102-93[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994

为了避免漏引,并扩大您的论文及《光学学报》、《中国激光》、《Chinese Optics Letters》等中国光学类期刊的国际、国内影响,希望增引您自己和同行近二年在《光学学报》、《中国激光》、《Chinese Optics Letters》等中国光学类期刊上发表的文章作为参考文献。

3.8 基金项目: 所投文章项目受到资助的,应标明资助名称及批准号。

作者简介: 姓名(出生年~),性别,民族(汉族可省),籍贯,职称,学历,从事专业。E-mail(少于 60 字)

3.9 投寄要求 为了加速期刊的电子化、网络化,加快稿件处理速度,一律采用 E-mail 投稿。稿件需附一份显示来稿创新点的说明(附在文章后, 100~300 字);请不要交寄个人,以免延误稿件的受理时间。本刊收到稿件后在 2~3 个工作日内 E-mail 发出收稿通知告知其他事项。稿件录用后,须提供文章修改定稿后的电子版(包括图)。

3.10 本刊现已进入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《中国光学期刊网》等,不再另行通知作者,对版权有特殊要求者,请事先声明。

4 审稿程序 稿件收到评审费后分送两位同行评议、主编终审、择优录用;编辑部自收稿日起 4 个月内将初审意见函告作者,逾期,作者可另行处理原稿,但需告知编辑部。

5 版权转让 在审稿通过后,作者须转让著作权人作品著作权(包括各种介质、媒体的版权)给编辑部,并把全部作者签名附单位盖章的版权转让函。

6 录用与否 录用稿作者应遵照中国科协有关文件精神,支付适量版面费以聊补期刊的高额亏损。由于近年来来稿量猛增,为了缩短发表周期,请作者精炼文章内容,更不要加附录,否则,超过 4 页的文章将加收版面费。编辑部有权对录用稿件作编辑意义的增删加工。录用稿一经本刊刊登,本刊享有版权,并向作者酌付稿酬,寄送该期期刊一册和抽印本 10 份。

7 投稿及回复时,请告知作者的有效联系方式 除“姓名、通讯地址、邮政编码”外;E-mail、电话(办公室及家庭或宿舍)、手机等是必不可少的。并用 E-mail 回复修改意见和修改稿(修改部分请划线)。最好注明通讯作者(作者单位相对稳定)。

8 请推荐 3~5 位同行专家(包括海外华人研究人员)作候选审稿人 (给出他们从事研究的学科和课题,通讯地址和 E-mail)。