

文章编号: 0253-2239(2004)10-1406-5

机载激光测深系统的最小可探测深度研究*

姚春华 陈卫标** 臧华国 陆雨田

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 针对回波特性进行理论分析和数值模拟, 讨论影响机载激光测深系统的最小可探测深度的各种因素和解决的技术途径。采用窄激光脉冲, 高速探测器, 小接收视场角, 可以改善海表和海底反射信号的叠加。分析海表和海底反射脉冲的特征, 提出采用双高斯脉冲拟合方法, 从叠加的回波信号中分离海表、海底反射信号, 降低机载激光测深系统的最小可探测深度, 满足海岸带测绘应用。利用实验室模拟装置进行测量实验, 利用提出的方法分离表面和底部反射信号, 得到 0.4 m 的最小可探测深度。同时比较了雪崩二极管和光电倍增管的测量结果, 两者的测量精度相当。

关键词: 光学测量; 机载激光测深; 最小可测量深度; 双高斯脉冲拟合

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A

Study of the Capability of Minimum Depth Using an Airborne Laser Bathymetry

Yao Chunhua Chen Weibiao Zang Huaguo Lu Yutian

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 30 March 2003; revised 17 December 2003)

Abstract: Based on the theoretical analysis and data simulation of the characteristics of the return signal, the factors influencing the capability of minimum depth of an airborne laser bathymetry and the improved technical methods are discussed. The use of narrow laser pulse, high-speed detector and small field-of-view can decrease the overlap of the surface and the bottom reflected signals. Based on the analysis of the characters of the surface and bottom reflected pulse, a method using double-Gaussian pulses fitting to separate the surface and the bottom reflected signals from the overlapped returns and to improve the capability of minimum depth using an airborne laser bathymetry is proposed to meet the applications of coast measurement. A simulated experiment was conducted and a minimum depth of 0.4 m has been achieved with the proposed method. The measurement results of the avalanche photodiode (APD) and the photomultiplier tube (PMT) are compared, the similar accuracy was obtained.

Key words: optical measurement; airborne laser bathymetry; capability of minimum depth; double-Gaussian pulses fitting

1 引 言

在沿岸环境下获取精确的、高密度水深和地形是个艰巨的任务。传统的沿岸带调查采用船载声纳剖面仪、电子测距设备等手段, 并可覆盖极浅的海水

和干燥的沙滩, 但这些测量只能获得很少的数据点; 船载多波束声纳极大地改善了测量密度, 但测带宽度也只能局限于水深的 4 倍左右, 同时在极浅水域, 由于测量速度非常慢, 空间覆盖率大大减小。机载激光测深技术是集激光测距、飞机定位和导航为一体的三维水深测量系统, 其可以快速、高效地获取沿岸水深, 美国研制的 SHOALS 系统已经被成功地应用到沿岸带调查中^[1]。

* 国家 863 计划(2001AA613010)资助课题。

** 通信联系人。E-mail: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2003-04-30; 收到修改稿日期: 2003-12-17

对海岸带测绘应用来说,机载激光测深系统的一个重要指标为最小可探测深度。能够获得小于 0.5 m 的水深,对研究沿岸带变化,沙滩变迁等具有重要作用。目前,国际上已有的机载激光测深系统的最小可测量深度均可小于 1 m^[2,3],澳大利亚的 LADS MK-II 已经达到 0.5 m^[4]。目前,用于机载激光测深的激光光源基本是相对成熟的、固体 Nd:YAG 激光器的倍频光,脉冲宽度小于 10 ns。由于有限窄的脉冲宽度,加上激光在海水中的脉冲宽度展宽,使得鉴别激光在海表反射信号和浅水海底反射信号变得非常困难。为了有效降低激光在海水中的脉冲展宽,常采用分离测量信道的办法,即利用小接收视场、低灵敏度探测器的通道进行浅水水深测量^[2]。即使如此,对水深 1 m 以下的海底信号,由于激光脉冲宽度的限制以及近海表区域后向散射信号的叠加,导致海表和海底信号“混叠”在一起,无法从波形中直接得到海底的深度信息。

本文提出一个鉴别浅水水深的新方法,从测量的“混叠”回波信号中分离海表反射和海底反射。首先,针对回波特性进行理论分析和数值模拟,讨论影响机载激光测深系统中最小探测深度的因素;然后,建立了一套实验装置,并开展实验研究。本文的研究可为正在研制的机载激光测深系统的扩展应用提供理论和实验依据。

2 测量原理

机载激光测深系统的回波信号是由海表反射、海水散射以及海底反射信号叠加组成,强海表反射信号叠加在海水散射信号上,当水深很浅时,海底反射信号也叠加在海表反射和海水散射信号上,使得海底反射信号被淹没在混叠信号中。激光的脉冲特性可以用高斯函数进行有效的近似描述,对静止海表的反射脉冲特征与发射脉冲一致。如果海水是均匀的,海水散射信号可以用一个指数衰减函数来表示,则回波信号是高斯函数与衰减指数函数的卷积,并表示为^[5]

$$y_w(t) = f_s(t) \otimes f_w(t), \quad (1)$$

式中 $f_s(t)$ 为海面反射的高斯函数,即有 $f_s(t) = h \exp[-(t-t_0)^2/2\sigma_t^2]$, h 为幅度, t_0 为峰值位置, σ_t 为标准偏差,可以认为是激光脉冲的半峰全宽; $f_w(t) = (1/\tau) \exp(-t/\tau)U(t)$ 是海水的衰减指数函数, τ 为衰减因子,与海水透明度有关, $U(t)$ 为阶跃函数, $t > 0, U(t) = 1, t \leq 0, U(t) = 0, \otimes$ 表示两个

函数的卷积。

海底反射信号特征受到如海水混浊度、海底反射率、水深以及海况等因素的影响,不同海底地质对海底的反射脉冲的展宽程度不同,同样可以简化成高斯函数。倾斜海底的反射脉冲实际上是不对称的,主要受激光脉冲的弥散和入射角度的影响;脉冲弥散会使峰值位置左移(短距离);而相对增大的入射角会使峰值位置右移(长距离),如果认为两者的综合影响造成的深度偏差很小的话,采用对称的高斯函数表述是可行的,则海底函数表示为

$$y_b(t) = A \exp[-(t-t_{\max})^2/2\sigma^2], \quad (2)$$

式中 A 为最大回波幅度, t_{\max} 为峰值位置, σ 为标准偏差。因此,机载激光测深的信号可以表示为

$$y(t) = y_w(t) + y_b(t). \quad (3)$$

图 1 模拟了不同海底深度对应的回波特征,可以看出当海底深度浅到一定程度,海表和海底的反射脉冲已经完全混叠了,不能直接区分两个分量。而如果能够区分出不同两个反射信号时,可以采用微分技术得到距离间隔。图中不考虑海底反射脉冲的各种展宽机制,激光的脉冲宽度假设为 7 ns。

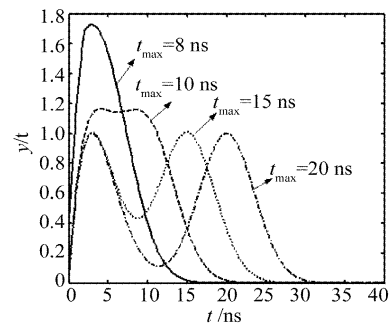


Fig. 1 Characteristics of return signals of different positions of sea bottom

图 1 不同海底深度的回波信号特征示意图实际海面存在不同程度的海浪和粗糙度,因此,海面反射脉冲并不是与发射激光脉冲的特征完全一样,存在一定脉冲延时和展宽,对入射角为 ϕ 的机载激光测深系统,海面反射脉冲的宽度表示为^[6]

$$\begin{aligned} \overline{\sigma}_i^2 = & (\sigma_i^2 + \sigma_h^2) + \frac{4z^2}{c^2 \cos^2 \phi} \tan^2 \theta_i + \\ & \frac{4\sigma_s^2}{c^2 \cos^2 \phi} \left[1 - \lambda_3^2 \left(1 - \frac{2 \tan^2 \phi}{S^2} \right)^2 \right] + \\ & \frac{4z^2}{c^2 \cos^2 \phi} \tan^2 \theta_i \tan^2 \phi, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 σ_i, σ_h 分别为发射激光脉冲宽度和接收器的相应宽度, σ_s 为表面粗糙度, θ_i 为发射脉冲的发散角($1/e^{1/2}$ 点), S 为海浪斜率谱分布, λ_3 为海面倾斜度, z 为飞行

高度。海表粗糙度和海浪斜率谱均与海面风速有关,文献[7,8]给出了海面风速与海浪斜率谱和粗糙度的经验公式。对机载激光测深来说,激光的发散角很小,激光入射到瞬时海面的海表倾斜度可以忽略,即 $\lambda_3 = 0$ 。图2计算了不同海表粗糙度与海面风速对应的海表反射脉冲宽度变化,图中假设飞行高度为500 m,入射角为 15° ,发散角为1 mrad,发射激光的脉冲宽度为8 ns,仪器响应宽度为2 ns。图中看出,只要在相对平静的海况下测量,海表反射脉冲的宽度增加不大,可以近似为于发射脉冲一致。

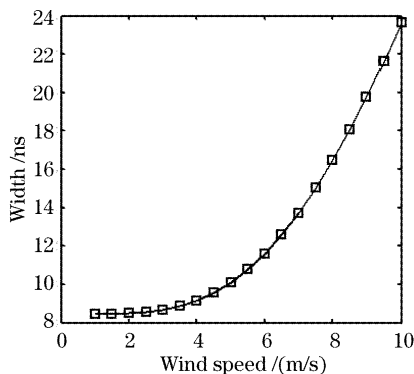


Fig. 2 Pulse width of surface reflected signals vs wind velocity of sea surface

对于极浅水深的海滩来说,水体散射分量的贡献不大,影响最小可分辨距离的主要因素为:激光脉冲宽度、海表反射脉冲的展宽程度、海底反射脉冲的展宽程度。减小发射脉冲宽度,降低海表反射脉冲的展宽均为可行的途径。发射激光脉冲受到机载激光器件和功率的限制,一般局限于 ns 量级。降低海表反射脉冲宽度可以根据(4)式,提高接收系统的带宽,降低激光发散角和入射角,但是过小的入射角会减小测带宽度,降低机载测绘效率。总之,从硬件角度出发,利用窄脉冲激光器,高速探测器,小的接收视场角,以及诸如偏振接收等技术,都可以降低海表反射信号的强度和脉冲宽度,有利于分辨海表和海底反射信号。由图1可知,只从硬件角度出发总是有限的,难于满足0.5 m的最小可探测深度要求。

因此,本文提出从信号处理的角度入手,提取海表和海底反射信号。提出采用双高斯脉冲拟合技术,从极浅海水的回波信号中分离海表和海底反射脉冲,从而得到两者的距离间隔。由(1)式和(2)式可知,忽略水体散射贡献的回波信号可以用两个高斯函数叠加表示,这样(3)式可以近似为

$$y_m(t) = \sum_{i=1}^2 A_i \{ \exp[-2(t-t_i)^2/2\sigma_i] \}, \quad (5)$$

式中 A_i 为高斯幅度, t_i 为峰值位置, σ_i 为半峰全宽。这样海底深度可以从两个高斯脉冲的峰值位置得到。由于海表反射脉冲的基本特征是有先验的,即把脉冲宽度,峰值位置固定。波形分解的任务是求出4个参量。根据比较(5)式和(3)式,产生误差函数 $e(t)$ 为

$$e(X,t) = y(t) - y_m(t). \quad (6)$$

通过变化参量序列 X ,使得 $e(t)$ 的平方和最小,即采用最小二乘技术,使得参量序列 X 最优。本文方法与文献[5]不同处在于直接利用海表反射脉冲的特征和两个高斯函数拟合,算法根据直接和简单。在本文中,参量提取是利用数学分析软件 Origin 进行的。

3 实验结果与分析

图3为最小可探测距离的模拟实验装置示意图,其中,激光器为半导体抽运、调Q倍频Nd:YAG激光器。输出激光经衰减器衰减后,入射到模拟海水的水池中,水池长2.5 m,宽0.6 m。水池中有一可移动的木板,作为模拟海底。望远镜接收的回波信号先通过一个大小可调的视场光阑,本实验采用的接收视场角为3 mrad。采用一个正交偏振片,对信号进行衰减,同时,可以在一定程度上减小海表的反射信号。窄带滤光片的带宽为0.5 nm,可以有效的消除背景杂散光。

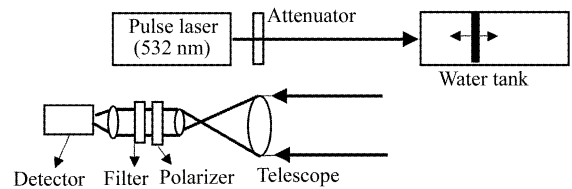


Fig. 3 Experimental setup

实验过程中,先后采用两种探测器进行对比,一种是EG&G的C30902雪崩二极管(APD),另一种为滨松(Hamamatsu)的H6780光电倍增管模块(PMT),两种探测器的主要性能如表1所示。

Table 1

Detector	C30902	H6780
Photosensitive area /mm	0.5	8.0
Sensitivity	65 A/W	20 A/mW
Rise time /ns	0.50	0.78
Dark current /mA	15.0	2.0
Working voltaz /V	217	15

H6780是金属封装的光电倍增管模块,内置高压,只需外部提供低电压即可,体积小,使用方便。对于浅水测量,由于灵敏度过高,可能会导致探测器饱和;雪崩二极管的灵敏度低,但是工作电压随温度

变化而变化,灵敏度不稳定,容易造成信号起伏,适合于浅水测量,但是不能兼顾中等水深。

首先将模拟海底移到模拟海表处,并记录下此时波形作为海表回波信号。图 4 为测量的海表和高斯拟合的结果,可以看出静止海表的反射波形可以用高斯函数来表示。并可以看出海表反射信号的宽度接近 7 ns,峰值位置在 2.6 ns 附近。移动模拟海底,在不同位置处记录各自波形,图 5(a)为光电倍增管模块获得的深度在 2 m, 1.5 m, 1 m, 0.8 m, 0.5 m 对应的接收波形,图 5(b)为雪崩二极管获得的波形。对雪崩二极管接收的波形,水深 1.0 m 以下的海底回波中的海表和海底信号已经叠加在一起;光电倍增管模块获得的波形,水深 0.8 m 以下不能从波形中直接区别海表反射和海底反射波形。可

以看出,虽然雪崩二极管的响应速度比光电倍增管模块快,但是附带的放大器等电子线路则降低了整体的接收带宽。因此,提高接收线路的电子带宽对极浅海水的测量是非常重要的。

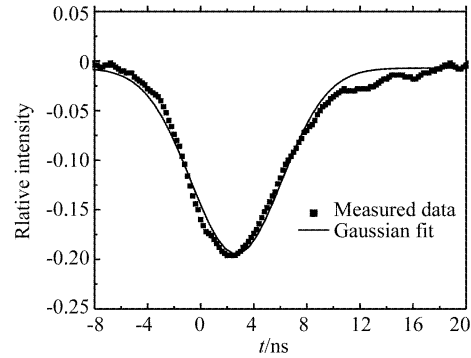


Fig. 4 Surface reflected signal and its Gaussian fit curve

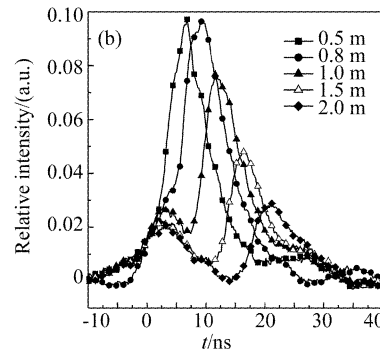
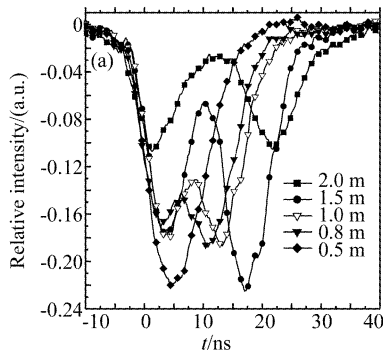


Fig. 5 Return signals of different positions of bottom using MPT (a) and APD (b)

图 6 为 0.5 m 深度的接收信号,利用上述方法,从混叠的信号中提取海表和海底反射信号,即图 6 中的两个高斯函数,图中实线为高斯函数的和信号。根据这种方式,本文获得的最小可探测深度 0.4 m。图 7 比较了雪崩二极管和光电倍增管模块获得的水深与实际深度的比较。雪崩二极管获得的深度均比实际深度小,但总体上,两者得到的结果相当,其标准偏差分别为 0.13 m 和 0.10 m,可以看出,两种探

测器获得水深精度基本相当。

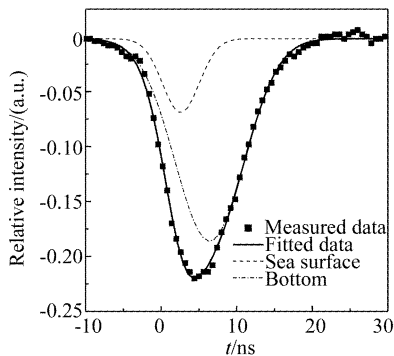


Fig. 6 Signal of 0.5 m and the decomposed the reflecting of simulated surface and bottom

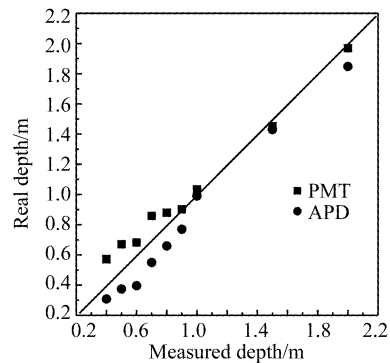


Fig. 7 Comparison of measured depth by PMT and APD vs real depth

结论 本文讨论了影响机载激光测深系统的最小探测深度的因数和解决途径。采用窄激光脉冲,高速探测器,小接收视场角,窄带干涉滤光片和正交偏振方式接收,可以改善海表和海底反射信号的叠加。对海表、海底以及叠加信号进行理论分析,并提出利用波形分解方法,分离叠加信号中的海表和海底反

射信号,降低机载激光测深系统的最小可探测深度,满足海岸带测绘应用。利用实验室模拟装置,进行了测量实验,并利用提出的方法分离表面和底部反射信号,得到0.4 m的最小可探测深度,并报道了不同探测器获得测量结果。

参 考 文 献

1 Irish J L, White T E. Costal engineering application of high-resolution lidar bathymetry. *Costal Engng.*, 1998, **35**(1~2): 47~71
 2 Irish J L, Lillycrop W J. Scanning laser mapping of the costal zone; the SHOALS system. *ISPRS J. Photogram. & Remote. Sen.*, 1999, **54**(2~3): 123~129
 3 Steinvall O, Koppari K, Karlsson U. Airborne laser depth

sounding; system aspects and performance. *Proc. SPIE Ocean Optics* **ⅩⅢ**, 1994, **2258**: 392~412
 4 Sinclair M. Australians get on board with new laser airborne depth sounder. *Sea Technology*, 1998, **39**(6): 19~25
 5 Wong H, Antoniou A. Characterization and decomposition of waveform for LARSEN 500 airborne system. *IEEE. Trans. on Geos. and Remote Sens.*, 1991, **29**(6): 912~920
 6 Tsai B M, Gardner C S. Remote sensing of sea state using laser altimeter. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(21): 3932~3940
 7 Derr V E. Remote Sensing of the Troposphere. Boulder, NOAA & University of Colorado, 1972. 12.1~12.6
 8 Cox G, Munk W. Measurement of the Roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter. *J. Opt. Sci. Am.*, 1954, **44**(11): 838~850



(上接封四)

3.6 计量单位 严格执行国家标准 GB3100~3102-93 规定。在光学论文中常见的如 Å, 毛(Torr), 高斯(G 或 GS)等已废止, 必须折算成现行标准。1Å=0.1 nm, 1 毛=1 mmHg=133.3 Pa, 1G(GS)=10⁻⁴ T, wt%→质量分数 w , vol%→体积分数, mol%→摩尔分数 x 或 y , at%→原子数分数 x 或 y 。数字: 处理后的数字的精度或有效数字位数不可能超过原始数据的精度或有效数字位数。

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: 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. 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)
- (2) 专著: 金国藩, 李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社. Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Metrology*[M]. Beijing: Science Press, 1998, 162~165 (in Chinese)
- (3) 译著: 玻恩, 沃尔夫. 光学原理[T]. 杨葭孙译. 北京: 科学出版社. Born M, Wolf E. *Principles of Optics*[T]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press, 1978, 182~190 (in Chinese)
- (4) 学位论文: 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. 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)
- (5) 技术标准: 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. National Standardization Technical Committee. GB 3100~3102-93. *Quantities and Units* GB3100~3102-93[S]. Beijing: China Standard Press, 1994

为了避免漏引, 并扩大您的论文及《光学学报》、《中国激光》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》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: 出生年月, 出生地, 职务/职称, 熟悉的学科和课题——不超过 3 个。

此两项置于文章首页页脚。

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, 从 2003 年 5 月 1 日起一律采用 E-mail 投稿。稿件需附一份显示来稿创新点的说明(100~300 字); 标明“稿件内容不涉及国家机密”、“此稿无一稿两投”、“作者排名不再随意更改”的证明件(盖章), 挂号寄往: 201800 上海 800-211 信箱光学学报编辑部(请不要交寄个人, 以免延误稿件的受理时间)。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》和《万方数据数字化期刊网》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版权(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。并请用 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)。