

文章编号: 1001-3806(2011)05-0639-05

利用 MODIS 图像同时反演水色三要素的方法研究

麻金继¹, 李健², 宋姚¹

(1. 安徽师范大学 物理与电子信息学院, 芜湖 241000; 2. 安徽师范大学 国土资源与旅游学院, 芜湖 241003)

摘要: 为了建立水色三要素的反演模式, 根据 2003 年和 2004 年测量的珠江口区域水色数据, 采用中分辨率成像光谱仪(MODIS)图像水色通道的遥感反射率组合建立神经网络模型, 同时反演珠江口水域水色三要素(叶绿素、悬浮泥沙、黄色物质)的浓度, 并对模型进行验证分析。根据反演模型利用 MODIS 数据获取三要素的浓度图, 对形成原因进行了简要的分析。结果表明, 采用 443nm, 488nm, 531nm, 551nm, 667nm, 678nm, 748nm 通道遥感反射率组合作为输入时, 模型反演精度比其他输入组合要高, 该方法具有较理想的精度。

关键词: 大气与海洋光学; 中分辨率成像光谱仪; 三要素浓度; 遥感反射率; 神经网络; 珠江口

中图分类号: P733.3 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.018

Model on the chlorophyll, suspended matter and gelbstoff concentrations based on MODIS data

MA Jin-ji¹, LI Jian², SONG Yao¹

(1. College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China; 2. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China)

Abstract: In order to establish the mode of the concentration of three elements (chlorophyll-a, suspended matter and gelbstoff), several neural network models were established to retrieve the three element concentration simultaneously from remote sensing reflectance based on moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data. The measured ocean color data was obtained in Pearl River estuary in 2003 and 2004. According to the model, the map of the concentrations of the three elements was drawn and its forming reason was analyzed. The study demonstrates that the model can get the better prediction accuracy based on the reflectance at band combination of 443nm, 488nm, 531nm, 551nm, 667nm, 678nm and 748nm than the other band combinations. The algorithm has good accuracy.

Key words: atmospheric and ocean optics; moderate-resolution imaging spectroradiometer; three-element concentration; remote sensing reflectance; neural network; Pearl River estuary

引言

在水色遥感中, 通常把水体分为一类水体和二类水体, 而中国近海岸和珠江口水域的水体基本上属于二类水体^[1], 可以用水色三要素的浓度来描述它的光学特性。水域的水色三要素的浓度直接影响到水质和生物, 比如浮游植物的生产力、珊瑚生长、深沉水生植被生产力、污染物的传播等^[2]。因此, 水色遥感方面的研究, 已成为热门课题^[3-5]。但现有大部分方法都是

对三要素作单独反演, 建立单独反演模型, 另外, 由于二类水体光学特性的复杂性和大气校正精度的影响, 在一个区域得到的水色反演算法很难适用到其它水域, 因此, 得到通用的二类水体水色三要素的反演算法是很困难的。神经网络方法技术具有强大的学习和推广能力^[6], 国内外专家学者开始利用神经网络方法进行水体探测方面的研究^[7]。

作者针对珠江口水域基本上二类水体的特点, 利用 2003 年 1 月和 2004 年 1 月所测得的珠江口水色浓度数据和反射率数据, 根据中分辨率成像光谱仪 (moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 影像不同水色通道的遥感反射率组合, 建立同时反演珠江口区域水色三要素的神经网络反向传播 (back propagation, BP) 模型, 并利用 MODIS 影像获取水色三要素的浓度图。该算法的研究具有现实意义, 可以为相关职能部门提供技术参考。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40701132); 安徽省自然科学基金资助项目(070412042); 安徽师范大学博士启动基金联合资助项目

作者简介: 麻金继(1975-), 男, 副教授, 博士, 现主要从事遥感技术应用的研究。

E-mail: jinji_ma@yahoo.com.cn

收稿日期: 2010-10-07; 收到修改稿日期: 2010-12-09

1 研究区及数据

20世纪80年代以来,随着社会经济的快速发展,城市化和工业化带来的水体污染,使得珠江口水体的富营养化比较严重,初级生产力和生态系统结构受到影响。因此,珠江口水色反演算法的研究,具有现实意义,国内外学者对珠江区域的研究也比较广泛^[8]。

本文中研究实测数据是2003年1月和2004年1月所测得的36个站位的叶绿素、悬浮泥沙、黄色物质浓度以及多通道的遥感反射率数据,采集的数据全部来自于二类水体区域(见图1)。参与反演模型建立的水色数据基本情况如表1所示,叶绿素a(CHL_a)质量浓度在0.83mg/m³~57.814mg/m³之间,泥沙悬浮物(suspended sediment, SS)含量在4.26g/m³~126.60g/m³之间,400nm处的黄色物质(colored dissolved organic matter, CDOM)吸收系数在0.31m⁻¹~1.13m⁻¹之间。把实测的反射率数据按照MODIS专门水色通道对应的带宽计算相应MODIS水色通道的真实反射率(见表2)。

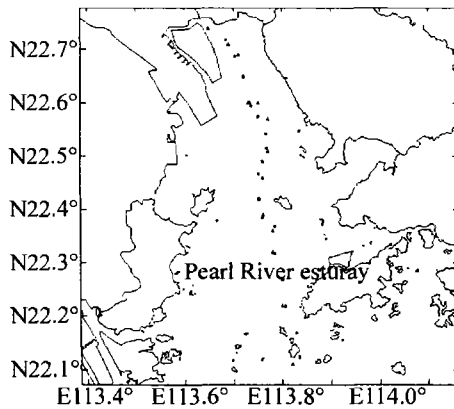


Fig. 1 Map of stations in the study area

Table 1 The information of CHL_a, SS, CDOM

	CHL_a/(mg·m ⁻³)	SS/(g·m ⁻³)	CDOM/m ⁻¹
max	57.8143	126.6000	1.1341
min	0.8303	4.2625	0.3121

Table 2 The information of remote sensing reflectance

band/nm	412	443	488	531	551	667	678	748
max/sr ⁻¹	0.0322	0.0417	0.0532	0.0664	0.0732	0.0718	0.0719	0.0364
min/sr ⁻¹	0.0094	0.0105	0.0133	0.0155	0.0167	0.0062	0.0063	0.0027

依据MODIS水色通道绘制珠江口区域部分站点的反射率光谱曲线如图2所示。由于水色三要素浓度的偏高,珠江口区域的遥感反射率的特征光谱曲线与一类水体相比具有明显的差异。从图2中可以看出,遥感反射率在550nm附近有一峰值。水体中的叶绿素具有特定的吸收和反射光谱,吸收峰一般在440nm附近,在550nm附近有一反射峰。HAN等人发现,在

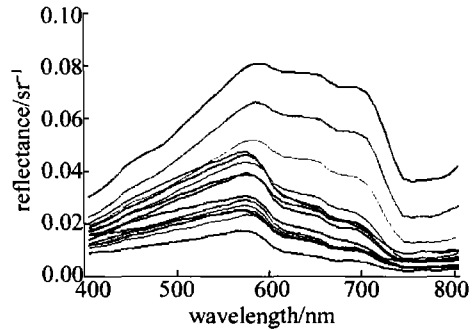


Fig. 2 Part of remote sensing reflectance spectral curve in the study area 550nm附近和690nm~700nm附近,叶绿素具有明显的反射峰^[9]。国内外研究表明^[10],可见光到近红外波段对悬浮泥沙的敏感性比较高,随着泥沙含量的增加,相应波段的反射率也会增加,反射峰位置由短波方向向长波方向转移,即产生“红移”现象。依据上述分析,利用不同通道的遥感反射率组合建立反演模型。

2 反演模式

2.1 反演方法

BP神经网络即误差反向传播神经网络。该算法主要包括两个部分:模式的正传播和模式的逆传播^[11]。在模式的正传播过程中,通过输入信息,由输入层经隐含层逐层处理并计算每个单元的输出值。如果在输出层得不到期望的输出,则进入模式的逆传播过程,逐层计算当前实际输出与期望输出的差值,调整网络的权值及阈值,不断更新学习模式,使误差控制在允许的范围之内。

本研究中建立3层BP神经网络模型(见图3),同时反演水色三要素的浓度。为了加快网络的收敛速度,先对实测的水色三要素数据和反射率数据做归一化处理,使数据的实测值在[0,1]区间内。将36个站点的实测数据分为两组,一组为训练样本,另一组为测试样本。其中24个站点的实测水色数据用来进行模式训练;剩余12个站点水色数据作为测试样本,对所建立的模式进行检验。依据对水色三要素吸收光谱的

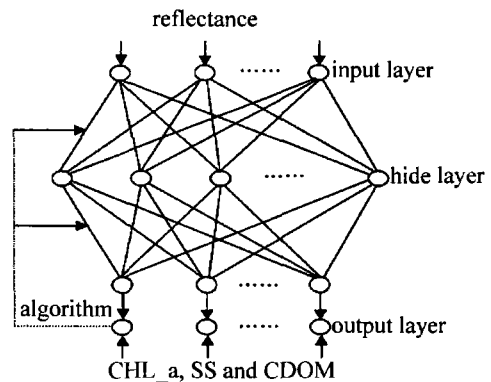


Fig. 3 BP neural network

分析,采用不同波段的遥感反射率组合作为模型的输入层,输入层根据不同的水色通道组合而拥有不同的节点数,输出层有3个节点,即水色三要素(叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质)的浓度。网络输入层至输出层、输出层至隐含层的传输函数都采用S型函数,利用样本的总误差测度 E 作为网络的性能函数,S型函数和 E 的公式分别为:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^m \sum_{k=1}^n (T[k] - O[k])^2, \quad (k \in [1, n], p \in [1, m]) \quad (2)$$

(2)式中, $O[k]$ 为输出层第 k 个节点的实际输出, $T[k]$ 为期望输出, n 为输出层节点数, m 为总的样本数。利用梯度下降法训练函数,在训练过程中不断改变学习因子和网络的隐含层节点数,使网络达到最优解,当网络的输出误差小于模型所设立的最大允许误差时训练结束。

2.2 测试结果与分析

利用剩余12个站点的数据作为测试数据检验反演模式,选取8组精度比较高的波段组合进行检验,计算实测值和反演值之间的平均相对误差,利用相关系数对实测值与反演值进行相关分析,平均相对误差和相关系数计算结果如表3和表4所示。从表3和表4

Table 3 Results of average relative error

band of input/nm				node	average relative error						
					CHL_a	SS	CDOM				
667,	678,	748		97	67.19%	41.68%	39.01%				
412,	443,	488,	531	55	39.84%	54.49%	51.46%				
412,	443,	667,	678,	748	87	56.30%	63.03%	35.43%			
531,	551,	667,	678,	748	35	69.61%	48.78%	21.07%			
488,	531,	551,	667,	678,	748	74	60.58%	69.82%	28.52%		
443,	488,	531,	551,	667,	678,	748	38	35.52%	34.07%	34.19%	
412,	443,	488,	531,	551,	667,	678	68	42.61%	53.71%	38.46%	
412,	443,	488,	531,	551,	667,	678,	748	64	56.70%	59.67%	45.05%

Table 4 Results of correlation coefficient

band of input/nm				node	average relative error						
					CHL_a	SS	CDOM				
667,	678,	748		97	0.810	0.579	-0.200				
412,	443,	488,	531	55	0.973	0.839	0.254				
412,	443,	667,	678,	748	87	0.947	0.485	0.445			
531,	551,	667,	678,	748	35	0.515	0.668	0.905			
488,	531,	551,	667,	678,	748	74	0.916	0.568	0.675		
443,	488,	531,	551,	667,	678,	748	38	0.982	0.877	0.689	
412,	443,	488,	531,	551,	667,	678	68	0.883	0.810	0.615	
412,	443,	488,	531,	551,	667,	678,	748	64	0.909	0.550	0.405

中可以看出,输入波段为443nm,488nm,531nm,551nm,667nm,678nm,748nm等7个波段的遥感反射率组合,隐含层节点数为38时,同时反演叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质的结果最理想,叶绿素平均相对误差为35.52%,相关系数为0.982;悬浮泥沙平均相对误差为34.07%,相关系数为0.877;黄色物质平均相对

误差为34.19%,相关系数为0.689,平均相对误差和相关系数在可接受的范围内。

利用443nm,488nm,531nm,551nm,667nm,678nm,748nm等7个波段的遥感反射率组合的测试结果绘制实测值与反演值对比图,如图4所示。从对比图中可以看出,水色三要素的反演值总体偏高,除

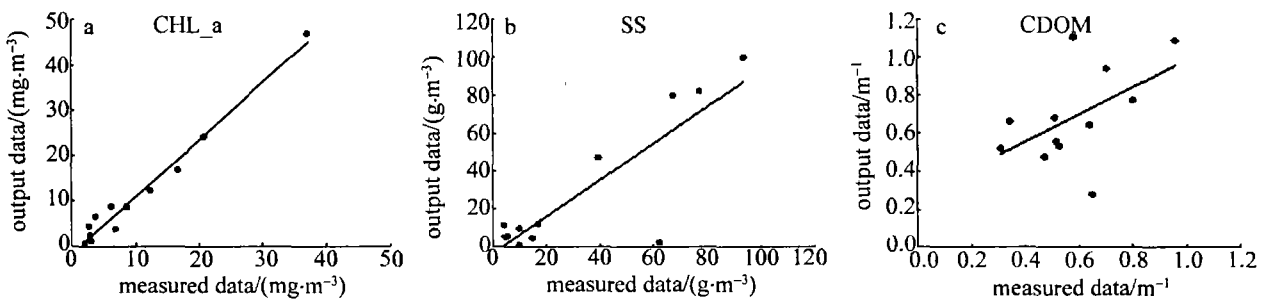


Fig. 4 Relationship between data estimated by models and measurements

部分样本点外,叶绿素和悬浮泥沙的实测值与反演值的对比效果较好,黄色物质不够理想,相关性不高。

2.3 模型验证

利用 MODIS 数据提取水色三要素的质量浓度来验证模型的准确性。研究所使用的 MODIS 1B 级数据均从 NASA 网站下载,获取 2004-08-03 珠江口区域的一景 MODIS 图像。主要是对 MODIS 图像进行预处理,然后进行大气校正,得到像元的真实反射率。大气校正的具体方法采用 MA 等人提出的方法^[12],具体步骤见下。

(1)统计气溶胶模式,用 Ahmad 辐射传输模型计算 6 个气溶胶光学厚度值(τ_a 分别为 0.0,0.2,0.5,1.0,2.0,3.0),16 个观测天顶角(θ_v 为 $1.5^\circ \sim 88.5^\circ$, 间隔为 6°),16 个相对方位角(ϕ_v 为 $0^\circ \sim 180^\circ$)以及 9 个太阳天顶角(θ 为 $1.5^\circ, 12^\circ, 24^\circ, 36^\circ, 48^\circ, 54^\circ, 60^\circ,$

$66^\circ, 72^\circ$) 在 MODIS 波段下的表观辐射率,最后构建查找表。

(2)对 MODIS 图像进行预处理,首先对 MODIS 图像进行几何校正和辐射定标,利用 NASA 网站提供的 MODIS Swath tool 软件对图像做几何纠正处理,然后利用阈值法进行云识别和去云处理^[13],利用经验方法对图像进行海陆像元的分类,提取海洋部分的二类水^[14]。用高斯方法对图像做去噪处理,提高图像的信噪比。

(3)在不同的风速和时间条件下,选择不同的所构建的查找表为基础,用最小二乘法使得光谱值与查找表中的辐射率得到最佳拟合,最后输出气溶胶光学特性,得到真实的反射率值。

将大气校正得到的反射率代入反演模型,提取叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质的质量浓度,如图 5 所

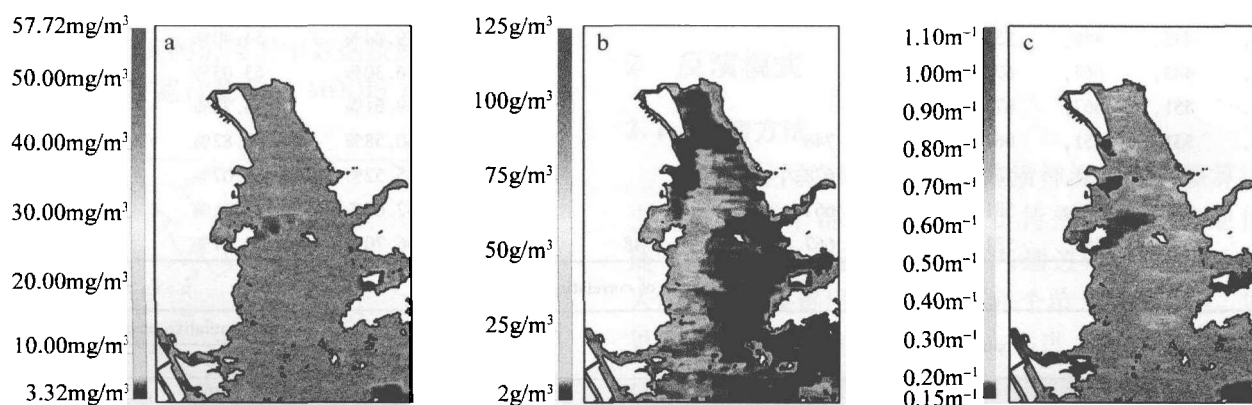


Fig. 5 a—the map of CHL_a b—the map of SS c—the map of CDOM

示,从 MODIS 影像得到的水色三要素质量浓度图可以看出,叶绿素的反演值在 $5\text{mg}/\text{m}^3 \sim 15\text{mg}/\text{m}^3$ 之间,黄色物质的反演值西岸比东岸略高,悬浮泥沙的含量具有明显的区域分布,西岸比东岸高,离岸低,呈现出由近岸海域向远海海域递减的趋势。形成这一现象的原因一方面是由于珠江口地处湿热多雨的亚热带海洋季风气候区,区域内化学风化作用强,水体中的物质更多地西岸沉积^[15-16];另一方面随着珠江三角洲地区工业化和城市化的发展,工业污水、生活废水的排入,使得这一区域的浓度值偏高。

3 结论

利用 MODIS 图像水色通道建立了同时反演叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质质量浓度的算法,通过检验表明,输入波段为 443nm,488nm,531nm,551nm,667nm,678nm,748nm 等 7 个波段的遥感反射率组合时,反演精度比其它波段反射率组合较为理想,误差在可接受的范围之内。通过 MODIS 图像所得到的叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质的质量浓度图,基本符合珠江口区域

三要素的实际分布规律,表明利用该方法反演水色三要素是可行的。本方法的建立有利于充分利用遥感技术资源,加强对海洋事业的管理以及海洋资源的开发,也有利于职能部门的查询和统计。

本模型的建立尚有许多不足之处,如算法训练的时间较长;由于大气校正的因素,反演的精度不够理想等等。在后续的研究中,主要研究将大气校正和水色三要素的反演有机结合,而不是单独分开处理,建立同时反演水色三要素和气溶胶光学厚度的模型,这样可减小由于大气校正误差带来的水色反演误差,从而提高水色三要素的反演精度,最终建立基于遥感平台的海洋水色管理可视化界面,方便数据的查询、统计和更新,增加模型的实用性。

感谢中国科学院南海海洋研究所陈楚群教授提供的珠江口实测数据。

参考文献

- [1] MA J J, CHEN H, JIANG X H. A method to identify case I and case II waters based on the MODIS images[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2009, 4(2): 201-205 (in Chinese).

- [2] RICHARD L M, BRENT A M. Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(1/2): 259-266.
- [3] DMITR P, ROBERT S B, KOROSOV A, *et al.* Operational algorithm for the retrieval of water quality in the Great Lakes [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(3): 352-370.
- [4] SWARVANU D, RAMENSH P S B, MENAS K. Comparison of global chlorophyll concentrations using MODIS data [J]. *Advances in Space Research*, 2009, 43(7): 1090-1100.
- [5] HELMUT S, ROLAND D. Neural network for emulation of an inverse Model operational derivation of case II water properties from MERIS data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(9): 1735-1746.
- [6] XIE G F, ZHAO B J, HAN Y Q. Chaotic weak signal detection in the long range laser rangefinders using neural network [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 449-451 (in Chinese).
- [7] TANG J W, DING J, TIAN J W, *et al.* Neural network models for the retrieval of chlorophyll, total suspended matter, and gelbstoff concentrations of case-II waters in Yellow Sea and East China Sea [J]. *Journal of High Technology Letters*, 2005, 15(3): 83-88 (in Chinese).
- [8] YANG J K, CHEN C Q. An optimal algorithm for the retrieval of chlorophyll, suspended sediments and gelbstoff of case II waters in the Pearl River estuary [J]. *Marine Science Bulletin*, 2009, 11(1): 13-23.
- [9] HAN L, RUNDQUIST D C, LIU L L, *et al.* The spectral responses of algal chlorophyll in water with varying levels of suspended sediment [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(18): 3707-3718.
- [10] DUBRAVKO R. Effect of suspended particulate-size distribution on the backscattering ratio in the remote sensing of seawater [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(33): 7092-7101.
- [11] YANG J G. Practical course on artificial neural networks [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2001: 41-62 (in Chinese).
- [12] MA J J, QIAO Y L, YANG S Z, *et al.* Using MODIS image to retrieve aerosol optical characteristic over coast of China [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2039-2045 (in Chinese).
- [13] WANG J C, YANG S Z, MA J J, *et al.* Automatic cloud detection applied to MODIS image in the southeast of China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(3): 270-273 (in Chinese).
- [14] MA J J, TAO A, WANG J C, *et al.* Determination of case II water from coast zone using MODIS image [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(1): 78-80 (in Chinese).
- [15] WANG P X. Global monsoon in a geological perspective [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(5): 535-556 (in Chinese).
- [16] JIA G D, PENG P A. Temporal and spatial variations in signatures of sedimented organic matter in Lingding Bay (Pearl Estuary), southern China [J]. *Marine Chemistry*, 2003, 82: 47-54.

(上接第 595 页)

测量的精度要求。

参 考 文 献

- [1] XING M L, LIU J P, LIN J M, *et al.* Distortion measurement of CCD camera with a large field, short focal length lens [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(3): 377-379 (in Chinese).
- [2] WANG H, MIAO X H, HUI B. The distortion correct of short focus wide angle optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(11): 1409-1412 (in Chinese).
- [3] ZHANG J, ZHU D Y, JIA X D. Camera lens distortion calibration with co-line points [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 221-224 (in Chinese).
- [4] WANG H, ZHAO J K, WEN D Sh. A distortion measuring method and distortion correct of superwide view field optical system [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(5): 599-603 (in Chinese).
- [5] MA T, SHEN Y B. Distortion detect of large field projection lithography lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(1): 46-49 (in Chinese).
- [6] GUO Y, YANG H, YANG Zh J, *et al.* Distortion measurement of lens in CCD camera system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(2): 279-282 (in Chinese).
- [7] ZHAO J K, ZHOU Y. High precision distortion measurement of NFOV long-focus lens [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(3): 380-384 (in Chinese).
- [8] WU X, FAN T Q, LUO M R, *et al.* Constraint least square optimization for distortion of an ultra-wide-angle optical lens [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(1): 26-28 (in Chinese).
- [9] WEI X G, ZHANG G J, JIANG J X. Subdivided locating method of star image for star sensor [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29(9): 812-815 (in Chinese).
- [10] GUAN B Zh, CHEN H Q, YE J X, *et al.* Model of beacon used in the air-borne adaptive optical system [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6): 613-615 (in Chinese).