doi:10.11988/ckyyb.20190455 2019,36(11):167-170

利用机载双激光测深反演近岸水体含沙量的方法

周丰年[1,2]
(1.长江水利委员会水文局 长江口水文水资源勘测局,上海 200136;
2.上海河口海洋测绘工程技术研究中心,上海 201306)

摘 要:为解决利用机载激光测深(Airborne LiDAR bathymetry, ALB)波形数据估计水体含沙量(Suspended Sediment Concentration, SSC)难题,提出了一种利用ALB三维点云数据反演水体含沙量的新方法。首先,基于绿激光水面点和红外激光水面点计算绿激光水面穿透量;其次,利用实测水体含沙量及对应绿激光水面穿透量构建SSC经验模型;最后,基于构建的SSC经验模型实现了利用ALB三维点云的水体含沙量估计。实验验证了该方法的有效性,取得了优于20 mg/L的SSC反演精度,为水体含沙量信息的高精度、大区域面获取提供了一种新途径。

关键词:水体含沙量;机载激光测深;红外激光;绿激光;水面穿透量;三维点云数据;水面不可靠问题
中图分类号:P229;TV148 **文献标志码**:A
文章编号:1001-5485(2019)11-0167-04

Retrieving Suspended Sediment Concentration by Using Water Surface Points of Infrared Laser and Green Laser in Airborne LiDAR Bathymetry

ZHOU Feng-nian[1,2]
(1. Changjiang River Estuary Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology of Changjiang Water Resources Commission, Shanghai 200136, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Estuarine and Oceanographic Mapping, Shanghai 201306, China)

Abstract: High-precision estimation of sediment concentration in water can be achieved by using the waveform data of airborne LiDAR bathymetry (ALB). However, waveform data is difficult to be obtained and utilized. In view of this, a simple method to retrieve the sediment concentration using ALB 3D point cloud data is proposed. Firstly, the green laser water surface penetration is calculated based on the green laser water surface point and the infrared laser water surface point. Secondly, the empirical model of Suspended Sediment Concentration (SSC) is constructed by using the measured SSC and the corresponding green laser water surface penetration. Finally, the sediment content of the lower water body is obtained conveniently by the constructed SSC empirical model. Experimental results validate that the method is effective and has the inversion accuracy of SSC better than 20 mg/L. The proposed method provides a simple and fast approach to estimate SSC.

Key words: Suspended Sediment Concentration (SSC); Airborne LiDAR Bathymetry (ALB); IR laser; green laser; near water surface penetration(NWSP); 3D point cloud data; water surface uncertainty

1 研究背景

水体含沙量(Suspended Sediment Concentration, SSC)是研究水质、侵蚀/沉积过程和水体生态系统所需的重要参数[1]。传统现场测量法通过现场采集水样并经实验室烘干、称重分析直接获取SSC,具有精度高的优点,但时空分辨率和效率低[2]。机载激光测深(Airborne LiDAR Bathymetry, ALB)通过发射激光脉冲并接收回波实现对水面、水体和水底的快速探

收稿日期:2019-04-22;**修回日期**:2019-06-20
基金项目:上海市科学技术委员会重点研发计划项目(17DZ1204900);上海市水务局(海洋局)科研项目(沪海科2018-04)
作者简介:周丰年(1963-),男,湖北鄂州人,教授级高级工程师,硕士,注册测绘师,主要从事海洋水文和海洋测绘研究。E-mail:cjkfnzhou@126.com

测,其设计初衷是高精度高分辨率测深[3-4]。此外,借助 ALB 波形数据可实现对水体含沙量高精度反演[5]。但 ALB 波形数据较难获取和利用,不方便工程应用。相比波形数据,三维激光点云数据较容易获取和利用。受激光频率和水表穿透影响,绿激光存在水面不可靠性问题。绿激光水面点很难准确地代表水面位置,而是穿透到水面下某一深度处,这种穿透深度称为绿激光水面穿透量(Near Water Surface Penetration,NWSP)[6]。若具备水面参考,利用绿激光实测水面回波,可容易计算得到绿激光的 NWSP。目前,NWSP 研究方法有理论分析法、统计分析法和经验建模法。Guenther[7] 理论分析了 NWSP 的产生机制并给出了主要影响因素。Mandlburger 等[8] 以红外激光水面点为参考,统计分析了绿激光 NWSP 在河道和池塘中的空间分布。赵兴磊[6]、赵建虎等[9] 采用逐步回归和参数显著性检验法构建了一种顾及表层 SSC、波束扫描角和传感器高度的 NWSP 经验模型,实现了对绿激光水面不可靠问题引起的单绿激光 ALB 点云高度偏差修正。NWSP 主要依赖于水体含沙量和 ALB 测量参数。反之,通过构建 SSC 和 NWSP 之间的经验模型可实现水体 SSC 估计。为此,本文提出了借助绿激光水面穿透量实现 SSC 简便反演的三维点云法。

2 含沙量反演方法

2.1 绿激光水面穿透量确定

ALB 系统根据采用的激光波长可分为双激光 ALB 系统和单绿激光 ALB 系统[6,10]。双激光 ALB 系统(例如 Optech CZMIL、AHAB HawkEye III、RIEGL VQ-880-G 和 Leica Chiroptera II 等)采用波长为 1 064 nm 的红外激光准确探测水面,波长为 532 nm 或者 515 nm(Leica Chiroptera II 系统)的绿激光探测水底。单绿激光 ALB 系统(例如 Fugro LADS-MK3、Optech Aquarius、USGS EAARL-B 和 RIEGL VQ-820-G 等)采用单一的绿激光探测水面和水底。由于绿激光存在水面不可靠问题,绿激光水面点并不能代表真实水面,而是穿透到水面下某一深度,如图 1 所示。以外部水面高为参考,绿激光 NWSP 即 Δd 可通过比较绿激光水面高和参考水面高获得,即

$$\Delta d = H^{s}_{\text{green}} - H_0 \quad 。 \tag{1}$$

式中 H^{s}_{green} 和 H_0 分别为绿激光水面高和参考水面高。对于双激光 ALB 系统,参考水面高可由红外激光水面点提供。

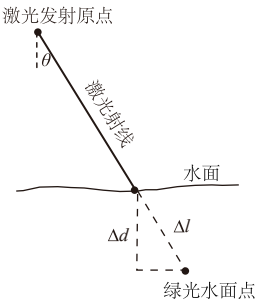


图 1 绿激光水面穿透示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water-surface penetration by green laser

若以红外激光水面高为参考,则 Δd 为

$$\Delta d = \Delta l \cos\theta \quad 。 \tag{2}$$

式中 θ 为激光发射角。

2.2 SSC 经验模型构建

利用获得的 Δd 可建立与实测 SSC 的经验关系模型来反演 SSC。因此,表层 SSC 可通过构建关于绿激光 NWSP 的经验模型来反演,即

$$\text{SSC} = f(\Delta d) \quad 。 \tag{3}$$

模型的具体形式可借助采样站实测 SSC 及对应绿激光 NWSP 来构建。相对于波形法,三维点云法不依赖于波形数据的提取和分析,因而更加简单易于实现。

考虑到 SSC 与绿激光的穿透深度紧密相关,因此构建穿透深度与 SSC 的关系模型采用式(4)函数形式,即

$$\text{SSC} = a(\Delta d)^{b} + c \quad 。 \tag{4}$$

式中 a,b,c 为模型系数,即模型的待估算参量。

借助实际 SSC 采样站提供的水体含沙量 SSC,以及对应位置的红外、绿激光束,根据式(2)计算得到的 Δd,联合构建式(4)方程。对式(4)的模型线性化,联合多站的 SSC 和 Δd,构建方程组,最后借助最小二乘$[\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{V}]=\min$(其中 $\boldsymbol{V}$ 代表误差向量,$\boldsymbol{P}$ 为权值),对组建的方程组求解,进而实现式(4)模型中参数 a,b,c 的确定,最终建立基于红外、绿激光的含沙量反演模型。

2.3 SSC 经验模型评估

利用未参与建模的 SSC 采样站上的红外、绿激光观测得到的水面点计算 Δd,代入建立的 SSC 反演模型计算 SSC,并与采样站位置的实测 SSC 比较,求取模型偏差(式(5)),进而评估模型精度。

$$\sigma_{\mathrm{f}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} (\Delta \text{SSC}_i)^2}{m-1}} \quad 。 \tag{5}$$

其中:$\Delta \text{SSC}_i = \text{SSC}_i - f(\Delta d_i)$ 。

式中：σ_f 为模型偏差均方根；ΔSSC_i 为模型偏差；m 为参与评估的红外、绿激光对个数。

3　应用及精度分析

为验证和评估三维点云法反演 SSC 的可靠性和精度，采用 Optech CZMIL 系统于 2014 年 12 月 27 日在江苏连云港沿海进行了 ALB 测量。测量水域约为 5 km×5 km，平均水深 2～5 m，含沙量变化范围 110～185 mg/L，测区、测线及 SSC 采样站分布如图 2 所示，红色区域表示 ALB 测量条带，黑色三角形表示 SSC 采样站。测量使用的飞机及机舱内部 CZMIL 系统安装如图 3 所示。

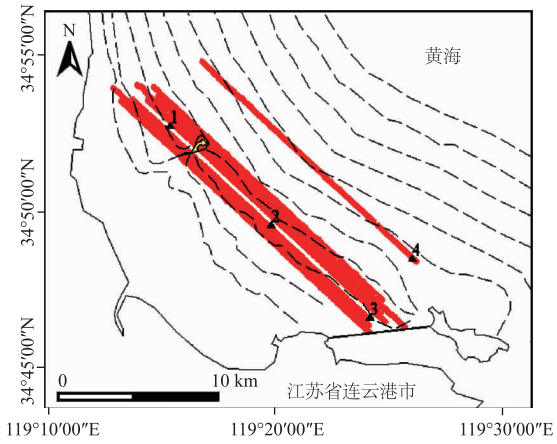


图 2　区域测量采样站布置

Fig. 2　Locations of ALB measurement area and SSC sampling stations



(a) ALB测量使用的飞机



(b) 机舱内部CZMIL系统安装

图 3　ALB 测量使用的飞机及机舱内部 CZMIL 系统安装

Fig. 3　Installation of CZMIL system in aircraft used for ALB measurements

CZMIL 系统是一款用来提供海岸带水面水下高分辨率三维信息的机载绘图系统[11]。CZMIL 系统采用一个主动的 Q-switched Nd:YVO4 激光发射器输出波长为 1 064 nm 的红外激光以及一个同步共线的、波长为 532 nm、能量为 3 mJ 的绿激光；脉冲重复频率为 10 kHz，脉冲宽度为 2 ns；采用重复频率为 27 kHz，固定天底角为 20°的圆形扫描方式。绿激光水面光斑直径约为 2.4 m。采用 Optech HydroFusion 计算并输出三维水面点云。Optech HydroFusion 是一款强大的针对 CZMIL 系统的后处理软件，能自动生成高分辨率的三维点云数据[11]。

在 ALB 测量的同时，还进行了含沙量采样，在测区内布设了 4 个 SSC 采样站（如图 2 所示）。采用横式水样采集装置采集了各测站表层水样，经实验室烘干、称重分析获得各测站表层水体 SSC。测站 1—测站 4 表层 SSC 分别为 122，134，110，185 mg/L。

以各 SSC 测站周边 100 m×100 m 范围作为各测站代表水域。滤波后，4 个代表水域内总共获得了 1 018 个绿激光水面点。以红外激光水面点高度为参考，利用式（1）计算绿激光 NWSP 值，即 Δd。表 1 给出了各测站计算获得的 NWSP 统计值，其代表水域内 NWSP 变化范围为 23.1～33.8 cm。

表 1　代表水域内 NWSP（Δd）统计值

Table 1　Statistical parameters of NWSP（Δd）

测站编号	脉冲数	Δd /cm			
		最大值	最小值	平均值	标准差
1	241	30.5	23.1	27.2	1.77
2	361	31.6	25.0	28.4	1.70
3	220	29.0	22.4	25.8	1.71
4	196	33.8	29.3	31.7	1.20

为削弱系统误差和随机误差对三维点云的影响，每一个代表水域被分为 4 个子区。图 4 给出了实测 SSC 和各子区平均 NWSP（Δd）的关系。

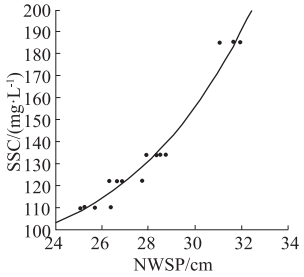


图 4　实测 SSC 与绿激光 NWSP 的关系

Fig. 4　Relation between measured SSC and green laser NWSP

由图 4 可以看出，NWSP（Δd）与 SSC 整体呈指数关系。由此表明本文给出的式（4）所示关系模式

是合理的。借助 3 个 SSC 测站(测站 1,3,4)上 2/3 的红外、绿激光数据和对应的 SSC 构建反演模型,解算得到的模型参数如表 2 所示。解算结果表明:SSC-Δd 模型决定系数 R^2 为 0.97,均方根误差为 5.26 mg/L。较高的模型决定系数 R^2 和图 4 表明所建 SSC-Δd 模型能很好地表示测量水域的 SSC 变化。

表 2 SSC-Δd 模型系数

Table 2 Coefficients of SSC-Δd model

a	b	c	R^2
3.173×10^{-8}	6.324	85.78	0.97

为绝对评估模型精度,将未参与模型计算的测站 2 的 361 个点对的红外、绿激光数据和测站 1、3 和 4 的剩余 1/3 红外、绿激光数据代入模型计算测站 2 和其余测站的 SSC,并以实测 SSC 为参考,评估 SSC 经验模型反演精度。反演结果表明 SSC 模型估计偏差均<20 mg/L,表明提出的基于红外、绿激光确定 NWSP 进而反演全区域 SSC 的方法是有效的。

4 结论及建议

本文针对 ALB 波形法反演 SSC 过程较为复杂、不便于工程应用的问题,提出了一种基于绿激光水面穿透量 NWSP 反演水体 SSC 的简便方法。借助参考水面点和绿激光水面点计算了绿激光 NWSP。结合实测 SSC,构建了关于绿激光 NWSP 的 SSC 经验模型,进而借助该模型实现了对 SSC 的有效估计。结果表明:以实测 SSC 为参考,取得了模型估计偏差均<20 mg/L 的反演精度。

本研究提出的方法克服了传统取样法费时费力、成本高、仅能获得单点位置含沙量的不足,实现了 SSC 的面获取;克服了波形法实现难度大、不便于工程应用的不足,实现了 SSC 的快捷、方便获取。研究成果为 SSC 的高精度、高分辨率、面获取提供一种新途径。

根据实测 SSC 与红绿激光信息建立 SSC 反演模型,SSC 测站的分布和密度直接影响着反演模型的精度。因此建议在实际应用中 SSC 测站的分布尽量均匀,同时选择在典型的含沙量分布区域,以确保 SSC 反演模型的精度和代表性。

参考文献:

[1] VOLPE V, SILVESTRI S, MARANI M. Remote Sensing Retrieval of Suspended Sediment Concentration in Shallow Waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(1): 44-54.

[2] GUILLÉN J, PALANQUES A, PUIG P, *et al*. Field Calibration of Optical Sensors for Measuring Suspended Sediment Concentration in the Western Mediterranean[J]. 2000, 64(4): 427-435.

[3] GUENTHER G C, CUNNINGHAM A G, LAROCQUE P E, *et al*. Meeting the Accuracy Challenge in Airborne Bathymetry[C]//Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR. June 16-17, 2000.

[4] 刘焱雄,郭 锴,何秀凤,等. 机载激光测深技术及其研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2017, 42(9): 1185-1194.

[5] ZHAO X L, ZHAO J H, ZHANG H M, *et al*. Remote Sensing of Suspended Sediment Concentrations Based on the Waveform Decomposition of Airborne LiDAR Bathymetry[J]. Remote Sensing, 2018, 10(2): 247.

[6] 赵兴磊. 机载激光高精度测深及水体含沙量反演研究[D]. 武汉:武汉大学, 2018.

[7] GUENTHER G C. Airborne Laser Hydrography:System Design and Performance Factors[R]. Rockville, Md: Charting and Geodetic Services, National Ocean Service,1985.

[8] MANDLBURGER G, PFENNIGBAUER M, PFEIFER N. Analyzing Near Water Surface Penetration in Laser Bathymetry: A Case Study at the River Pielach[J]. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2013, 1(2): 175-180.

[9] ZHAO J H, ZHAO X L, ZHANG H M, *et al*. Shallow Water Measurements Using a Single Green Laser Corrected by Building a Near Water Surface Penetration Model [J]. Remote Sensing, 2017, 9(5):426.

[10] 赵建虎. 海底地形测量技术现状及发展趋势[J]. 测绘学报,2017,46(10):588-596.

[11] RAMNATH V, FEYGELS V, KOPILEVICH Y, *et al*. Predicted Bathymetric LiDar Performance of Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar (CZMIL)[J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2010, 7695(97): 769511.

(编辑:罗 娟)

欢迎关注《长江科学院院报》微信公众号