

机载激光测深海面扫描轨迹计算与分析

任来平¹ 赵俊生² 翟国君¹ 黄谟涛¹

(1 天津海洋测绘研究所, 天津市友谊路 40 号, 300061)

(2 大连舰艇学院海洋测绘系, 大连市解放路 667 号, 116018)

摘要: 介绍了机载激光测深技术的椭圆扫描原理, 推导出在椭圆扫描方式下计算激光海面扫描轨迹的数学模型, 并进行了编程模拟运算、绘图和扫描特征分析。

关键词: 机载激光测深; 椭圆扫描; 扫描轨迹

中图法分类号: P225. 2; P228. 3

机载激光测深技术是近年来国际上悄然兴起的一项新型海洋测深手段, 一般用于浅海、岛礁或者船只无法进入的海区, 因其采用了快速扫描系统, 其测量效率远远高于传统的船载声纳测量, 因此受到了各国海洋测绘工作者的高度重视^{1~3}。

激光测深系统的扫描机构是通过扫描镜的局部运动, 以实现激光测深点的条带式展宽。目前激光扫描方式主要有直线扫描和圆扫描两种^{4,5}。直线扫描机械结构复杂, 但数据处理简单, 而圆扫描机械结构简单, 但数据处理复杂。为了提高测量效率, 需要扫描装置高速运转, 而机械结构越复杂, 扫描运行就越不易平稳, 但为确保测量点精确定位, 必须保证扫描机构的平稳运行。

不难想像, 如果反射镜法线与转轴平行, 则水平入射激光经反射后只有垂直向下一个方向。正因为反射镜法线与转轴之间存在 7.5° 夹角, 当反射镜在驱动电机的驱使下高速旋转时, 反射镜法线在空间形成一个顶角为 15° 的圆锥体。因激光反射方向位于由入射线和反射镜法线所决定的平面上, 所以随着法线空间位置的变化, 反射线空间位置也在变化。为计算方便, 设定当反射镜法线转到反射镜转轴所在的垂直面时, 反射镜转角 $\phi = 0^\circ$ 。可以想像, 这时法线与水平面的夹角为 37.5° 。另外, 还定义反射激光束与垂线之间的夹角为扫描角 θ (如图 1), 不难理解在 $\phi = 0^\circ$ 的垂面内, 扫描角为 15° 。如果飞机航高为 H , 则扫描带

1 椭圆扫描装置的机械结构

如图 1 所示, 椭圆扫描的机械结构比较简单, 只是在激光束的前面安装一个高速旋转的反射镜, 激光束经反射镜的反射后, 在海面形成不同的落点。将一个角度编码器与反射镜一起固定在反射镜驱动电机的转轴上, 以统计反射镜转过的角度 ϕ 。以反射镜为核心的扫描装置必须满足以下 3 个几何关系: ① 反射镜的法线与驱动电机转轴 (以下简称反射镜转轴) 呈一定夹角 (本文设定为 7.5°); ② 反射镜转轴呈 45° 倾角; ③ 激光水平入射且位于或者平行于驱动电机转轴所在的垂直面。这样水平入射的激光束经反射镜反射后会以不同的方向折向海面, 从而达到大范围扫描的目的。

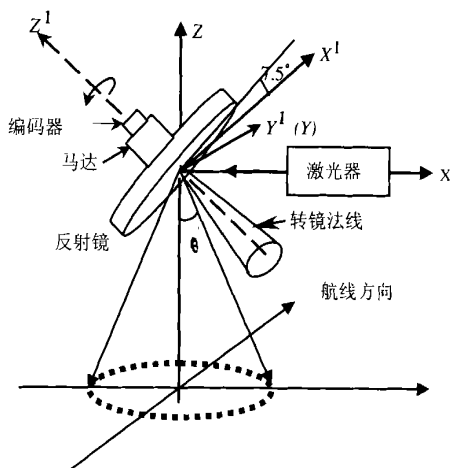


图 1 椭圆扫描原理示意图

Fig. 1 Sketch of the Ellipse-scanning Model

宽为 $s=2H\tan\theta$, 设 $H=500\text{m}$, 则单航线测量带宽为 268m , 这就是海面扫描宽度, 海底的带宽会由于海水的折射展得更宽。因此在飞机上安装激光扫描装置时, 使入射激光垂直于飞行航线(水深测线), 以确保达到 268m 的扫描带宽。

在飞行状态下为确保上述 3 个几何关系成立, 需要将扫描装置安装在一个陀螺稳定平台上, 这样, 飞机的俯仰和侧滚均不会影响扫描工作状态。下面计算入射激光经反射镜反射后的出射光束与海面相交点的位置, 即海面扫描轨迹。

2 建立坐标系

2.1 陀螺平台坐标系

以陀螺平台为参考建立一个地平直角坐标系(如图 1)。以反射镜的旋转中心为坐标原点 O , Z 轴垂直向上, X 轴指向激光水平射来的方向, Y 轴指向飞机的飞行方向, 这样, 反射镜转轴位于 XZ 平面上。显然, 陀螺平台坐标系 $O-XYZ$ 与常用的以北方向为参考的地平直角坐标系 $O-xyz$ (本文简称当地水平直角坐标系)存在以下转换关系:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, κ 为飞机上的电子罗盘测定的航线与北方向的夹角, 本文简称航偏角。

2.2 过渡坐标系

为计算方便, 建立过渡坐标系(如图 2)。将上面的陀螺平台坐标系 $O-XYZ$ 以 Y 轴为转轴反向转 45° , 使 Z 轴与反射镜转轴重合, 新的坐标系命名为 $O-X^1Y^1Z^1$ 。 $O-XYZ$ 坐标系和 $O-X^1Y^1Z^1$

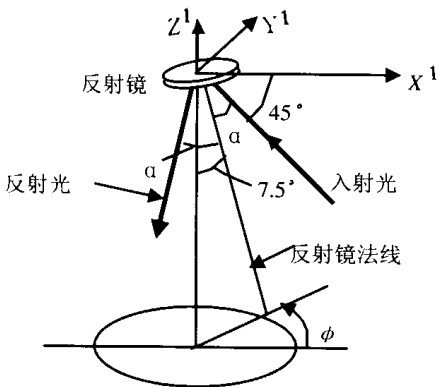


图 2 过渡坐标系

Fig. 2 Transitional Coordinate System

坐标系之间的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_{Y^1(45^\circ)} \begin{bmatrix} X^1 \\ Y^1 \\ Z^1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{其中, } R_{Y^1(45^\circ)} = \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & 0 & -\sin 45^\circ \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 45^\circ & 0 & \cos 45^\circ \end{bmatrix}$$

3 反射光方向向量的求定

当反射镜旋转时, 反射镜的法线在空间形成一个顶角为 15° 的圆锥体。为计算方便, 将法线圆锥体放大, 如图 2 所示, 其中, ϕ 为反射镜转角, 由码盘编码确定, 前已定义当法线与 X^1Z^1 面重合时, $\phi=0$ 。另外, 由于入射激光、反射转镜法线与反射激光 3 线共面, 定义这个激光所在的平面为“光径平面”, 其上的入射角和反射角均用 α 表示。由图 2 可以看出, 当反射镜围绕 Z^1 轴转动时, 法线也围绕 Z^1 轴转动, 射向海面的激光束也随之运动。在 $O-X^1Y^1Z^1$ 坐标系中求反射光的方向向量。

3.1 入射光的方向向量

在 $O-X^1Y^1Z^1$ 坐标系中, 入射光的方向向量为:

$$F'_1 = \begin{bmatrix} \cos 45^\circ \\ 0 \\ -\sin 45^\circ \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.2 反射镜的法向量

从图 2 可以看出, 反射镜的法向量为:

$$F'_2 = \begin{bmatrix} \sin 7.5^\circ \cos \phi \\ \sin 7.5^\circ \sin \phi \\ -\cos 7.5^\circ \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可得入射线与法线的夹角 α 为:

$$\cos \alpha = F'_1 \cdot F'_2 = \cos 45^\circ \sin 7.5^\circ \cos \phi + \sin 45^\circ \cos 7.5^\circ \quad (5)$$

当 $\phi=0^\circ$ 时, 由上式得: $\alpha=45^\circ-7.5^\circ=37.5^\circ$; 当 $\phi=90^\circ$ 时, $\alpha=\cos^{-1}(\sin 45^\circ \cos 7.5^\circ)=45^\circ 29' 17''$; 当 $\phi=180^\circ$ 时, $\alpha=45^\circ+7.5^\circ=52.5^\circ$;

3.3 反射光方向向量的计算

3.3.1 “光径平面”的法向量

“光径平面”的法向量为:

$$n = F'_1 \times F'_2 =$$

$$\begin{bmatrix} i & j & k \\ \cos 45^\circ & 0 & -\sin 45^\circ \\ \sin 7.5^\circ \cos \phi & \sin 7.5^\circ \sin \phi & -\cos 7.5^\circ \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \sin 45^\circ \sin 7.5^\circ \sin \phi \\ \cos 45^\circ \cos 7.5^\circ - \sin 45^\circ \sin 7.5^\circ \cos \phi \\ \cos 45^\circ \sin 7.5^\circ \sin \phi \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} F'_1 \cdot F'_3 = \cos 2\alpha \\ F'_2 \cdot F'_3 = \cos \alpha \\ (F'_1 \times F'_2) \cdot F'_3 = 0 \end{cases}$$

3.3.2 反射光方向向量

设未知的反射光单位方向向量为 $F'_3 = (x \ y \ z)^T$, 根据光学反射原理, 存在以下 3 个关系:

根据以上关系可列方程组:

$$AX = L \tag{6}$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & 0 & -\sin 45^\circ \\ \sin 7.5^\circ \cos \phi & \sin 7.5^\circ \sin \phi & -\cos 7.5^\circ \\ \sin 45^\circ \sin 7.5^\circ \sin \phi & \cos 45^\circ \cos 7.5^\circ - \sin 45^\circ \sin 7.5^\circ \cos \phi & \cos 45^\circ \sin 7.5^\circ \sin \phi \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 2\cos^2 \alpha - 1 \\ \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

解方程组(6), 得:

$$X = A^{-1}L \tag{7}$$

于是, 反射光在 $X_1 Y_1 Z_1$ 坐标系中的单位方向向量(因入射向量与法向量均为单位向量, 所以反射向量也为单位向量)为:

$$F'_3 = X \tag{8}$$

由坐标转换公式(2), 将 F'_3 转换到陀螺平台坐标系 $O-XYZ$ 中, 即

$$F'_3 = R_{Y^1(45^\circ)} F'_3 = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \cos \beta \\ \cos \gamma \end{bmatrix} \tag{9}$$

上式就是最后投向海面的激光束的单位方向向量, 且 $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$.

因反射光方向取决于反射镜法线的空间位置, 而法线位置与反射镜转角 ϕ 是一一对应的关系, 所以反射光方向是反射镜转角 ϕ 的函数。前已定义激光束与垂直向下方向的夹角为扫描角 θ (有些文献称为天顶角)(如图 1), 则 θ 也是反射镜转角的函数, 即

$$\theta(\phi) = 180^\circ - \gamma(\phi) \tag{10}$$

4 激光海面点坐标计算

4.1 数学模型

激光反射镜入射点 O 至海面的垂直距离 H 是由红外激光直接测定的, 由式(9), 则激光海面点 S 的空间坐标为:

$$\begin{cases} X_S = \frac{\cos \alpha}{\cos \gamma} H \\ Y_S = \frac{\cos \beta}{\cos \gamma} H \\ Z_S = -H \end{cases} \tag{11}$$

如果定义角度 $\Psi = \cot \frac{Y_S}{X_S}$ 为“海面扫描点中心转

角”, 显然 Ψ 也是反射镜转角 ϕ 的函数, 激光海面扫描轨迹也可表示为:

$$\begin{cases} X_S = H \tan \theta \cos \Psi \\ Y_S = H \tan \theta \sin \Psi \\ Z_S = -H \end{cases}$$

4.2 激光海面扫描轨迹试运算

4.2.1 飞机悬停状态下的扫描轨迹

激光器的脉冲重复频率是有限的, 国内现有性能稳定的激光器的重复频率不超过 200Hz, 因此激光测深点的的采样率最高为 200Hz。据了解, 国外激光测深设备采用的激光器一般为 168Hz。在这里不妨设反射镜旋转一周的激光扫描点数为 $m = 30$ 点/周, 反射镜转速为 $n = 5$ 转/s (这样相当于采样率为 150Hz, 比较符合实际), 另取航高为 $H = 500\text{m}$, 扫描起始点的反射镜转角为 $\phi = 0^\circ$, 利用模型(11), 经计算机编程模拟激光点的面扫描轨迹, 模拟效果如图 3 所示。

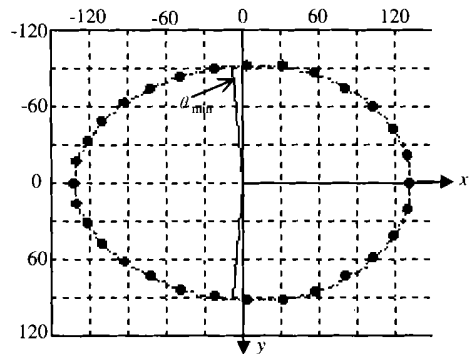


图 3 飞机悬停状态下海面扫描轨迹

Fig. 3 Laser Scanning Track on Sea Surface When the Helicopter Stops

4.2.2 飞行状态下的扫描轨迹

由于飞机不是静止不动的, 还必须考虑航速对扫描轨迹的影响, 即在平面位置中加入航速改正。

设飞机航速为 V (m/s), 反射镜的转速为 n (转/s)。根据设计, 旋转一周发射点数为 m (点), 所以扫描频率为 $m \cdot n$ (点/s)。设激光均匀发射, 则每点的航速改正为:

$$\begin{cases} X_V = 0 \\ Y_V = \frac{V}{m \times n} \\ Z_V = 0 \end{cases}$$

代入式(11)可得飞机飞行时激光海面点的三维坐标为:

$$\begin{cases} X_S = \frac{\cos \alpha}{\cos \gamma} H \\ Y_S = \frac{\cos \beta}{\cos \gamma} H + \frac{V}{m \times n} \\ Z_S = -H \end{cases} \quad (12)$$

取飞机高度 $H = 500\text{m}$, 航速 $V = 50\text{m/s}$, 其他参数如前。另外为了使航向前后的扫描点相互不重叠, 以增加测点密度, 使起始激光点的发射位置为 $\phi_0 = 3^\circ$, 代入式(12)试运算, 模拟效果如图4所示。

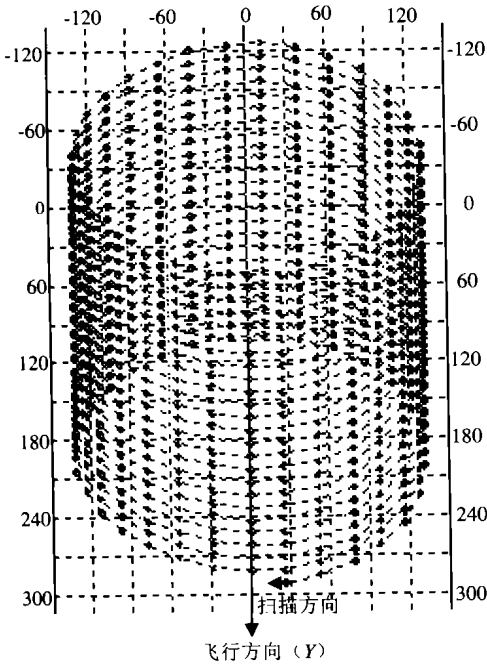


图4 飞行状态下激光海面扫描轨迹

Fig. 4 Laser Scanning Track on Sea Surface When the Helicopter Travels

4.2.3 扫描轨迹特征分析

如图3所示, 飞机悬停时的激光点海面扫描轨迹类似于椭圆, 但并不是严格的椭圆, 而是呈一头略大、一头略小的卵形, 所以椭圆扫描严格应为“类椭圆扫描”。图5为扫描角 θ 随反射镜转角 ϕ 变化的规律。从中可以看出, 如果反射镜均匀旋

转, 扫描角 θ 的变化类似于余弦曲线; 当反射镜旋转到 $\phi = 0^\circ$ 或 180° 时, 扫描角达到最大为 $\theta_{\max} = 15^\circ$; 当反射镜旋转到 $\phi = 90^\circ$ 或 270° 时, 扫描角达到最小为 $\theta_{\min} = 10^\circ 35' 29''$ 。所以扫描椭圆的长半轴与短半轴分别为:

$$\begin{cases} a = H \tan \theta_{\max} = H \tan 15^\circ \\ b = H \tan \theta_{\min} = H \tan 10^\circ 35' 29'' \end{cases}$$

在航高为 500m 时, 海面扫描宽度为 268m 。

另外, 应当注意到, 当扫描角达到最小时, “海面扫描点中心转角” Ψ 分别为 $95^\circ 19' 07''$ 或 $264^\circ 40' 53''$, 即 θ 的最小值不是出现在 y 轴方向。这时, 扫描点至椭圆中心的距离最近, 因此, θ 的变化不是规则的余弦曲线, 而且, 当反射镜匀速旋转时, “海面扫描点中心转角” Ψ 的变化并不匀速, Ψ 忽快忽慢, 有时滞后于 ϕ , 有时领先于 ϕ , 如图6所示。

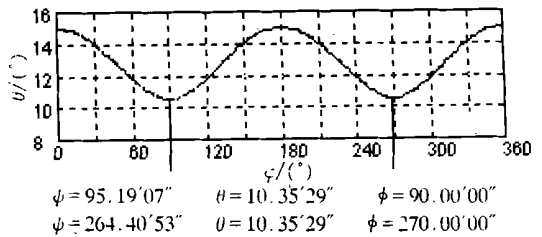


图5 扫描角 θ 变化曲线

Fig. 5 Curve of the Scanning-angle

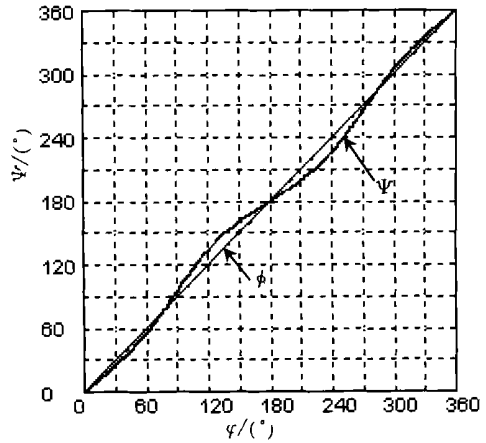


图6 海面扫描点中心转角 ϕ 变化曲线

Fig. 6 Curve of the the Center Rotation Angle of the Scanning Point

从图4可以看出, 在飞行状态下, 由于航速的影响, 海面扫描点呈螺旋线状向前延伸, 形成一条平行于测线(也是航线)的“激光测线”, “激光测线”上的点距受飞机航速控制, 而“激光测线”之间的间距却与激光发射时间(反射镜转角)有关。当反射镜均匀旋转、激光均匀触发时, 海面扫描点的

分布不均匀,中间稀,边缘稠。这样,中间区域的测深点分布密度有时难以满足测深密度要求,只有采用降低航高、调整激光发射频率、降低扫描频率(反射镜旋转速度)等措施,这样做是以牺牲测量效率为代价的。

5 结 语

与常用的直线扫描方式相比,椭圆扫描虽存在测点分布不均匀的缺点,但机械结构简单,运行平稳,适于高速旋转,有利于提高测量效率。本文导出的关于椭圆扫描的数学模型简单明了,适于自动化实现。在椭圆扫描方式下,激光反射镜转角 ϕ 与激光束海面落点存在一一对应的关系,扫描角 θ 和海面扫描点中心转角 Ψ 均由反射镜转角 ϕ 确定。通过控制反射镜转角,可以方便地控制激光落点。而 ϕ 是由固定在转轴上的“码盘”

编码确定的,因此,在实际工作中,微机控制系统可以根据测量需要,调用不同的码盘配置以实现特定的激光落点,极为灵活方便。

参 考 文 献

- 1 Compton J S Hudson M A. New Charting Technology in Australia—The Laser Airborne Depth Sounder. International Hydrographic Review, 1988(2): 145~156
- 2 Koppari K, Karlsson U, and Steinvall O. Airborne Laser Depth Sounding in Sweden. International Hydrographic Review, 1994 (2): 69~81
- 3 管 铮, 翟国君, 黄谟涛, 等. 机载激光测深系统的进展. 军事测绘, 1999(3): 58~61
- 4 汤晓涛, 胡广伦. 浅谈我国机载激光测深技术的发展前景. 军事测绘, 1998(2): 55~57
- 5 汪 凌. 机载激光地形测量. 测绘技术, 1997(3): 15~17

作者简介: 任来平, 硕士生。现主要从事海洋磁力测量研究。

Scanning-track Computation and Analysis for Airborne Laser Depth Sounding

REN Laiping¹ ZHAO Junsheng² ZHAI Guojun¹ HUANG Motao¹

(1 Tianjin Institute of Hydrographic Surveying and Charting, 40 Youyi Road, Tianjin, China, 300061)

(2 Dept. of Hydrography and Mapping, Dalian Institute of Naval Vessels, 667 Jiefang Road Dalian, China, 116018)

Abstract: Airborne laser depth sounding (lidar bathymetry) is thought to be one of the most promising techniques for rapid and high density sounding of shallow waters. As we know, there exist two types of scanning mode for airborne laser bathymetric system (ALBS). When running the first mode, the system gains good computation efficiency but loses its stability. Contrarily, when running the second mode, the system gains its stability but loses computation efficiency. Nowadays most of ALBSs have changed their line-scanning mode to the new ellipse-scanning mode due to the great advancement in the computer technology. On the basis of the ellipse-scanning mechanism, this paper deduces a series of mathematical models for ALBS's data-processing and evaluates the models' accuracy by analog-computation. Finally this paper analyzes the characteristics of the ALBS's sea-surface scanning track.

Key words: airborne laser bathymetry; ellipse-scanning; scanning-track

About the author: REN Laiping, master. He is engaged in the research of bathymetry and sea magnetic survey.