

# 机载三维信息获取地面扫描轨迹分析

胡以华

魏庆农

章立民

魏吴明

(中国科学院上海技术物理研究所 200083) (中国科学院安徽光学机械研究所 合肥 230031) (解放军电子工程学院 合肥 230037)

**摘 要** 该文根据机载三维信息获取中常用的扫描光学系统结构,导出了地面扫描采样点轨迹与光学系统结构参数之间的关系,获得了地面采样点坐标的定量表示,给出了实现特定扫描轨迹的地面测量时光学系统结构参数的选择方法和计算结果。

**关键词** 机载地面定位,三维信息获取,机载扫描测距,扫描轨迹

## 1 引 言

机载三维信息获取技术能够快速准确地获得地面的三维图形数据,其中主要采取扫描激光测距作为地面高度信息的获取手段<sup>[1]</sup>,由飞机的飞行提供机载光学系统视场的纵向扫描,由扫描转镜的转动提供光学视场的横向扫描,最后可以得到地面上按一定扫描轨迹分布的采样点的斜距数据<sup>[2,3]</sup>。通过这

的结构,因此,在求解地面采样点坐标之前必须找到该视场方向与扫描光学系统结构之间的定量关系,它一般以地面采样点组成的扫描轨迹表征。

## 2 扫描光学系统基本结构

基于曾经设计的试验系统并参考文献[2]所给出的实例,一个常用的转镜扫描光学系统机构如图1。图1中,2、3构成卡塞格伦望远镜的次、主镜,1为转折棱镜。扫描电机带动扫描转镜转动,当扫描转镜反射面朝天底方向的一个范围内时,触发激光器输出脉冲激光,扫描转镜将激光束导向地面上的不同点,同时将地面的后向散射回波转折到望远镜的主镜,再由次镜将其会聚到回波探测器上。如此结构的光学系统将安装在飞机底部的摄影窗口上,扫描转镜一方朝向飞机飞行方向,它与飞机之间可以是刚性连接,而由飞机姿态测量装置提供姿态数据供结果修正时使用,也可以采取惯性平台连接。从图中可以看出,当扫描转镜平面与电机转轴之间的夹角不同或电机转轴与水平方向的倾角不同时,激光测距的地面采样扫描轨迹显然不一样。

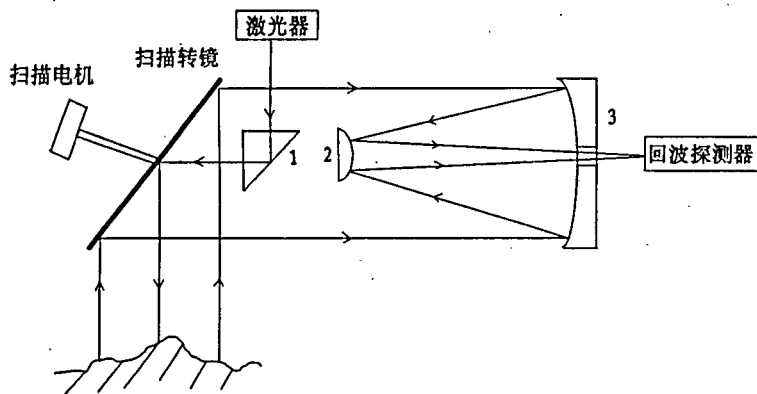


图1 扫描光学系统结构

Fig.1 The configuration of a scanning optical system

种方法所获得的地面采样点在地球上的绝对三维坐标由飞机的三维坐标、飞机的姿态(航向、俯仰、侧滚和加速度)、采样点到飞机的斜距、光学视场(比如说激光束)方向相对于天底方向的夹角共同决定<sup>[4]</sup>。其中飞机的三维坐标由GPS定位系统给出,飞机的姿态数据由姿态装置给出,斜距由扫描激光测距得到,而光学视场方向这一参数取决于机载扫描光学系统

## 3 地面扫描轨迹与光学系统结构参数之间的关系

将图1中的扫描光学系统放入一个空间坐标系

中, Y轴的负方向作为飞机的飞行方向, Z轴负方向作为天底方向(图2)。电机转轴 OA与扫描转镜平面 M交于 O点, OA与 M的夹角为  $\alpha$ , 激光束同时射向 O点。为了分析问题的方便, 不失一般性, 将 O作为参考坐标原点, 这时, 总可以选择一个空间参考坐标系, 让入射光束位于 Y轴之上而射向原点, 转轴 AO相对于 Y轴的倾角为  $\theta$ , 并且 AO位于 YOZ面上。当扫描转镜沿着图中所指方向转动而偏离 Y轴一个  $\gamma$ 角时, 转镜的反射激光束 OE在参考坐标系中的位置明显地取决于  $\alpha, \theta, \gamma$ 。显然, 飞机的运动会带来其姿态和位置的变化, 由此构成的参考坐标系与地球的绝对坐标系之间存在着差别, 反射激光束在地面上的轨迹也会不同, 但是, 可以通过 GPS系统提供的飞机定位数据对参考坐标系的原点进行修正, 由飞行姿态测量数据对参考坐标系的指向进行修正, 最终得到的地面采样点在地球绝对坐标系中的坐标总是一定的, 反射激光束在地面上的轨迹也总是确知的。下面的分析将基于已修正的理想情况, 即认为飞机作直线、匀速、平稳的飞行。

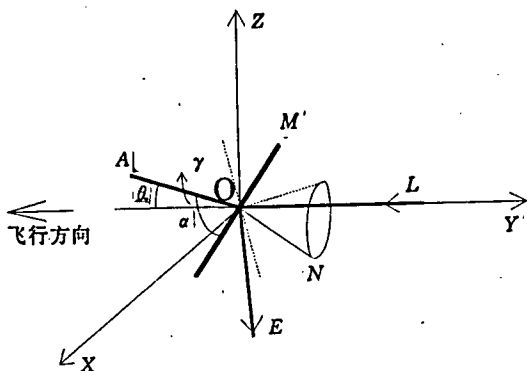


图2 扫描光学系统在参考坐标系中的表示

Fig.2 The expression of a scanning optical system in the reference coordinate system

对于平面镜 M构成的平面, 当它在空间由电机带动旋转时, 其法线 ON将在参考坐标系中形成一个锥面, 可以称之为法锥面, 其方程为:

$$x^2 + (y \sin \theta + z \cos \theta)^2 = (y \cos \theta - z \sin \theta)^2 \operatorname{tg}^2 \beta \quad (1)$$

其中  $\beta = 90^\circ - \alpha$ , 法锥面上任何通过原点的直线都对应于处于某一位置上的扫描转镜的法线。入射激光束 LO的方程为:

$$\begin{cases} x = 0 \\ z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

从而, 对于过 LO的平面束, 如果将其作为入射平面束, 即对应的法线与入射线应该在同一个平面上, 那么扫描转镜的转动就是该平面绕 Y轴的转动, 因此

该平面束的方程为:

$$x = z \cdot \operatorname{tg} \gamma \quad (3)$$

假定法线方程和反射线方程分别表示为

$$\begin{cases} x = a_1 z \\ y = b_1 z \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x = a_2 z \\ y = b_2 z \end{cases} \quad (5)$$

其法线应该满足方程(1), 从而将式(4)代入式(1)后有

$$a_1^2 + (b_1 \sin \theta + \cos \theta)^2 = (b_1 \cos \theta - \sin \theta)^2 \operatorname{tg}^2 \beta \quad (6)$$

根据几何光学中的反射定律, 入射光线、法线、反射线应该在同一平面上, 从而将式(4)、(5)分别代入式(3)中, 并考虑到实际情况时有  $z \neq 0$  而得到

$$a_1 = -\operatorname{tg} \gamma \quad (7)$$

$$a_2 = -\operatorname{tg} \gamma \quad (8)$$

求解方程(6)、(7)并考虑到实际上需要激光束射向 Z轴负方向, 可以得到

$$b_1 = \frac{-\sin \theta \cos \theta (1 + \operatorname{tg}^2 \beta) + \sqrt{f}}{\sin^2 \theta - \cos^2 \theta \operatorname{tg}^2 \beta} \quad (9)$$

其中

$$f = \operatorname{tg}^2 \beta - (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta \operatorname{tg}^2 \beta) \operatorname{tg}^2 \gamma \quad (10)$$

在正常工作情况下, 法线总是位于  $Y > 0$  和  $Z < 0$  处, 所以应该有  $b_1 < 0$ 。

同时根据入射线与法线的夹角等于反射线与法线之间的夹角, 可以给出

$$\frac{-b_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + 1}} = \frac{-a_1^2 + b_1^2 - 1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + 1}} \quad (11)$$

从而由方程(8)、(11)得到

$$b_2 = \frac{b_1^2 - (1 + \operatorname{tg}^2 \gamma)}{2b_1} \quad (12)$$

这样, 基于式(8)、(12)给出的系数而得到的式(5)就是反射激光束 OE的空间表示, 它量化地给出了反射激光束在空间参考坐标系中的位置, 它与扫描光学系统结构参数之间有着严格的关系。

反射激光束相对于 Z轴负方向(可以认为是天底方向)的夹角  $\phi$  满足

$$\operatorname{tg} \phi = \sqrt{b_2^2 + \operatorname{tg}^2 \gamma} \quad (13)$$

如果激光测距得到的地面采样点斜距为 S, 则地面采样点的高度坐标为  $z = -S \cdot \cos \phi$ , 在恒定高度平面上地面采样点轨迹方程为

$$\begin{cases} x = \operatorname{tg} \gamma \cdot S \cdot \cos \phi \\ y = -b_2 \cdot S \cdot \cos \phi \end{cases} \quad (14)$$

由以上各式可以看出,地面采样点的扫描轨迹受扫描光学系统的结构参数 $\alpha$ 、 $\theta$ 控制,同时随着扫描角度 $\gamma$ 而变化。在信息处理时可以利用上述结论进行数据转换。图3给出了不同 $\alpha$ 、 $\theta$ 时的扫描轨迹。图中曲线1—7分别代表不同的 $\alpha$ 、 $\theta$ 取值,当转镜处于 $\gamma = -22.5^\circ$ 到 $\gamma = 22.5^\circ$ 之间而输出激光时, $Z = -1$ 平面上的扫描轨迹,其中曲线2与 $X$ 轴重合,表明此时可以实现直线型扫描。

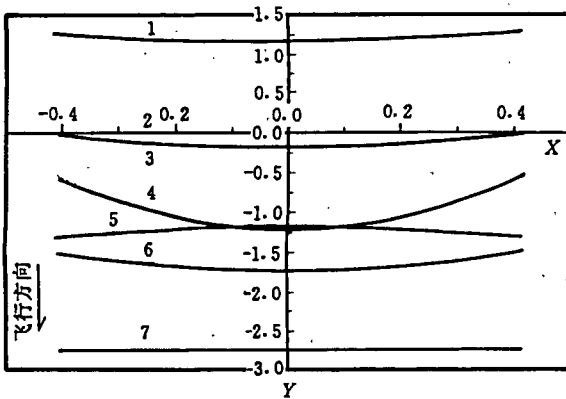


图3 地面扫描轨迹图

Fig.3 The scanning traces on the earth

- 1 为  $\alpha = 70^\circ$ ,  $\theta = 0^\circ$ ; 2 为  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\theta = 0^\circ$ ; 3 为  $\alpha = 70^\circ$ ,  $\theta = 30^\circ$ ; 4 为  $\alpha = 70^\circ$ ,  $\theta = 50^\circ$ ; 5 为  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\theta = 0^\circ$ ; 6 为  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\theta = 30^\circ$ ; 7 为  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\theta = 10^\circ$

#### 4 特定扫描轨迹的确定

根据上节分析,任何扫描轨迹情况下获得的数据都可以由转换公式而求得最后结果,但不同的扫描轨迹获得数据的效果存在着一定的差异,直线型扫描可以获得规则的地面采样点分布,不过由于波束倾角变化会带来测距误差,而等波束倾角圆弧扫描可以减少测距的非均匀性和误差,但由于采样点分布不规则会引起数据处理的麻烦,尤其在同步获取图象数据时更是如此,因而采用不同的扫描轨迹各有利弊。如果根据需要得到某一个特定的扫描轨迹,可以利用上述结论,通过选择适当的 $\alpha$ 、 $\theta$ 值设计扫描光学系统结构。

如果要获得直线型扫描,就要求在扫描转镜横向扫描一周时,地面采样点在 $Y$ 轴方向的坐标分量保持不变,即

$$\frac{\partial b_2}{\partial \gamma} = 0 \quad (15)$$

得到直线型扫描时 $\alpha$ 、 $\theta$ 必须满足如下关系

$$2\sqrt{f}b_1 + b_1^2 + 1 + \operatorname{tg}^2 \gamma = 0 \quad (16)$$

可变换为

$$1 + \sin^2 \theta - \cos^2 \theta \operatorname{tg}^2 \beta = 0 \quad (17)$$

(17)式的严格解只有一个结果

$$\begin{cases} \theta = 0 \\ \alpha = 45^\circ \end{cases} \quad (18)$$

这就是说,只有扫描转轴处于水平位置而扫描转镜与水平方向成 $45^\circ$ 夹角时才能实现直线型扫描。

如果要实现等波束倾角圆弧轨迹扫描,就要求选择一组合适的 $\alpha$ 、 $\theta$ ,使转镜扫描时对于任何一个扫描角 $\gamma$ ,扫描激光束与 $Z$ 轴负方向之间的夹角不变,即

$$\frac{\partial \phi}{\partial \gamma} = 0 \quad (19)$$

从而得到

$$b_1^2 - (1 + \operatorname{tg}^2 \gamma) = 2\sqrt{f}b_1 \quad (20)$$

方程(20)是实现圆弧扫描的限定条件,是选择扫描转镜结构参数的依据。由于 $\gamma$ 是转镜的扫描角度,它在一定范围内变化才能实现视场扫描,因而要求所选择的的光学结构参数 $\alpha$ 、 $\theta$ 对于扫描范围以内的任何变量 $\gamma$ ,都能够使方程(20)成立,所以,该方程的求解就是针对一定范围内变化的 $\gamma$ 而求得结构参数 $\alpha$ 、 $\theta$ 。但是,方程(20)的求解比较困难,通过数值方法解该方程可以发现,对于任何一个不为零的扫描范围( $\gamma$ 取值范围),均找不到一组可实现的 $\alpha$ 、 $\theta$ ,它能够使该方程对这一范围内的任何 $\gamma$ 都成立,也就是说,不论扫描转镜作多大范围的扫描,都不能实现绝对的圆弧扫描。所以严格意义上的等波束倾角圆弧扫描是不存在的,只能得到准等波束倾角圆弧扫描。

所谓准等波束倾角圆弧扫描就是地面扫描轨迹近似为圆弧,或者说是激光束倾角近似相等,其误差在一定的允许范围之内。它的设计方法是,首先在所要求的转镜扫描视场范围之内对 $\gamma$ 取值,然后去选择 $\alpha$ 、 $\theta$ ,如果在所有取值的 $\gamma$ 点上,由该组 $\alpha$ 、 $\theta$ 所决定的波束倾角 $\phi$ 的偏差在允许的范围之内(即 $\Delta\phi / \Delta\gamma < \epsilon$ ,  $\epsilon$ 是误差范围),则所选择的 $\alpha$ 、 $\theta$ 就是实现准圆弧扫描的转镜结构参数。通过数值计算发现,能够实现准圆弧扫描的结构参数 $\alpha$ 、 $\theta$ 与扫描视场角范围、所限定的误差大小以及 $\gamma$ 的取值间隔等3个因素有关,而且有时会有若干组 $\alpha$ 、 $\theta$ 都满足条件,这时要

参考其它要求,在众多结果中作最终选择。比如说,实际的波束倾角 $\phi$ 不要太大,以免因激光传播距离的过长而导致回波探测效率的降低。

这里给出一组设计实例。当要求扫描视角范围为 $45^\circ$ 、地面横向采样点数为40( $\gamma$ 取值间隔为 $45^\circ/40$ )、波束倾角 $\phi$ 的误差范围是 $\varepsilon = 0.4^\circ$ 时,就可以得到若干组 $\alpha$ 、 $\theta$ 设计结果,它们都能实现满足这3个条件的准圆弧扫描。当 $\alpha(\theta < \alpha)$ 取值较小时, $\phi$ 值的结果较大,如 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\theta = 15^\circ$ 时, $\phi \approx 60^\circ$ ;而当 $\alpha$ 大于 $80^\circ$ 时,激光束偏向Y轴正方向, $\phi$ 值也较大,如 $\alpha = 86.8^\circ$ 、 $\theta = 0^\circ$ 时, $\phi \approx 84^\circ$ ,以上两种情况均不宜采用。如果选择 $\alpha = 63.6^\circ$ 、 $\theta = 33.7^\circ$ ,会有 $\phi \approx 30^\circ$ ,基本可以采用。如若将扫描视角范围减少为 $30^\circ$ ,地面横向采样9点,则 $\alpha = 77.5^\circ$ 、 $\theta = 40^\circ$ 是比较理想的一个,此时 $\phi \approx 15^\circ \pm 0.3^\circ$ <sup>[2]</sup>。

## 5 结语

通过以上分析可以看出,在已设计一定的转镜扫描光学系统结构的情况下,只要已知其两个主要

参数 $\alpha$ 、 $\theta$ 的值,就可以根据(14)式的结果得到任何扫描轨迹上的地面采样点坐标。而在设计光学系统结构之前,可以选择适当的 $\alpha$ 、 $\theta$ 值而得到特定的扫描轨迹,以适应不同的需要。

## 参 考 文 献

- 1 James B. Garvin. Mapping new and old worlds with laser altimetry. *Photonics spectira*, 1993.
- 2 John Banic, Sebastian Sizgoria, Robert O'Neil. Scanning Lidar Bathymeter for Water depth Measurement. *SPIE, Laser Radar Technology and Application*, 1986, 1663.
- 3 M. F. Penny *et al.* Airborne laser hydrography in australia. *Applied Optics*, 1986, 25(13).
- 4 胡以华, 魏庆农, 章立民. 机载扫描激光地面测绘系统分析. 安徽地质, 1997, (1).

## 作 者 简 介

胡以华,男,生于1962年5月,讲师,理学博士,毕业于中国科学院安徽光学机械研究所光学专业,现在中国科学院上海技术物理研究所作博士后研究工作。曾负责过雷达、通信信号处理研究课题,现主要从事航空遥感中的信息获取研究并参加国家863计划项目,累计发表论文15篇。

## An Analysis of the Scanning Traces on the Earth in Airborne 3-D Information Acquisition

Hu Yihua

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of science 200083)

Wei Qingnong Zhang Limin

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences Hefei 230031)

Wei Wuming

(The Electronic Engineering Institute of the PLA Hefei 230037)

**Abstract** According to the general configuration of a scanning optical system for airborne 3-D information acquisition, the relation between the scanning trace of the sampled sites on the earth and the configuration parameters of the optical system is established and, the quantitative expression of the coordinates of the sampled sites on the earth is obtained. For some specific scanning traces, the selected methods and designed results of the configuration parameters of an optical system for terrain measurements are given.

**Key words** Airborne earth positioning, 3-D information acquisition, Airborne scanning range, Scanning trace.