# 遥感图像对地定位研究

李树楷　编著

测绘出版社

056474

P283.8
001

0050 9404

# 遥感图像
# 对地定位研究

李树楷　编著

200306150

长安大学图书馆

测　绘　出　版　社

(京)新登字 065 号

内容简介

本书是著者多年研究成果的汇集。从遥感图像的几何机理入手,分析了遥感图像的几何特征及影响几何精度的多种因素。以卫星 MSS、TM、航空 MSS 的未经几何粗纠正的数据为主要研究对象。对比分析了多种几何模式,确定了最佳模式。涉及到理论、模式、实验验证、精度分析的全过程。阐述了与几何处理有关的 TM 双向扫描误差改正,地形高差引起的投影差改正,遥感适用 DEM 生成方法,地学编码图像的生成技术,三景连续图像处理技术等。本书也包括了新一代动态 GPS 遥感图像对地定位系统的论文和最新试验研究成果,开发了系统的软件包。

**遥感图像对地定位研究**

李树楷 编著

*

测绘出版社出版

北京朝阳大地印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 787×1092 1/16 · 印张 11.5 · 字数 246 千字

1991 年 12 月第一版 · 1991 年 12 月第一次印刷

印数:0001—1000 册 · 定价:12.00 元

ISBN 7-5030-0517-3 / P · 195

# 序　言

遥感图像对地定位是遥感应用技术的重要组成部分。定位、定性的密切结合组成了遥感应用技术系统。

遥感图像对地定位的理论基础,主要是遥感图像的几何学或称之为遥感图像计算几何学。主要研究遥感图像数据获取过程中的几何特征、四维空间分布规律、空间分辨率、数学模式、地学编码化理论与方法、处理技术、遥感数据的空间分布规律、数学模型与遥感数据复合匹配模式。

遥感图像对地定位技术的发展包括两个方面:遥感器几何保真度及对地定位性能的进展(MSS→TM→SPOT→ERS-1);遥感图像对地定位模式研究进展(系统纠正→射影变换(二维)→共线条件+DEM(四维)→立体图像模型→多景连续模型→地学编码图像)。以地面控制点作为遥感图像对地定位技术的基础是以往研究的共同特点。

遥感图像对地定位的研究是应用基础性研究,在国家自然基金委员会、所长基金的资助下及其它渠道资助下,前后历数年之久陆续完成的。

本书共收录论文12篇,是著者关于遥感图像对地定位问题研究的专辑。以应用最广泛的多种遥感图像为研究对象,从分析图像数据获取时的几何特征入手,包括了几何模式、数据格式、处理技术、试验验证、可信度检验等完整的论文系列。开发了较之国外图像处理设备中的软件具有特色的应用软件系统。

随着GPS技术的出现,遥感图像对地定位的研究在理论、模式及处理技术方面将出现翻天覆地的变化。为两个发展阶段的承上启下,该书中收录了作者追踪动态GPS对地定位高技术发展的试验研究报告和发展动态GPS遥感图像对地定位系统的方向性研究论文。

本书在出版前作为项目的评审中,得到王之卓教授,郑威、李志荣、张晋研究员,周启光、朱成麟、张新、杨德麟教授,蒋景瞳高级工程师的高度评价和热情支持,在此表示感谢。国家自然基金委员会和中国科学院遥感所对项目的经费支持,在此出版之际也一道表示谢意。

项目组主要成员还有刘彤、周丽华。刘彤还负责全书编辑工作(文字输入、文字排版、图表整理和校对修改等)。

由于时间仓促,书中不当之处在所难免,热诚欢迎批评指正。

著者　　1991年9月1日

# 目　录

1、遥感行扫描图像数据的几何特征…… (1)
2、遥感图像的几何模式研究 …… (14)
3、卫星多谱段扫描图像 MSS 的定位问题 …… (37)
4、卫星 MSS CCT 数据的再采样 …… (52)
5、多幅连续卫星图像的几何纠正 …… (66)
6、航空扫描图像几何模式的研究 …… (76)
7、遥感适用 DEM 生成模式的研究 …… (96)
8、资源卫星 TM CCT 精纠正高差引起的投影差改正的实验研究 …… (109)
9、LANDSAT TM 双向扫描误差改正模式研究…… (121)
10、遥感信息对地定位技术的变革性进展 …… (130)
11、GPS 在遥感信息对地定位应用中的试验研究 …… (137)
12、遥感应用技术系统的技术支柱—动态 GPS 遥感信息对地定位系统 … (145)
附:各篇文章的英文摘要 …… (156)
主要应用程序目录…… (163)
试验样片 13 张 …… (164)

# 遥感行扫描图像数据的几何特征

李树楷

[摘要]:遥感图像对地定位模式主要有两类：一类是多项式法；一类为共线方程式法。实际应用中多用几何粗处理后的图像数据。本文从行扫描传感器运行参数的设计特点和结构分析入手，分析了数据流的形式，探测器排列，采样时序，位置误差,扫描镜运动方程，波段匹配精度，TM 的扫描线重叠改正，TM 双向扫描误差，以及外部因素中的地球自转，地形高差，卫星高度变化，传感器位置与姿态变化等对遥感图像对地定位的影响。这是根据应用目的研究相应几何模式的基础。以 A 数据为处理对象，以带有附加参数的共线方程式的模式是实现高精度对地定位的最佳模式。

[关键词]:几何特征,多中心投影,共线方程式。

## 前　言

遥感图像中包含着丰富的信息。应用这类图像数据作分类，分析，判断各种专题要素，分析印证各种生物地学规律之际，首要的是清楚地了解各类遥感图像数据的生成机制。主要包括空间几何机制和物理机制。为了更方便使用这些数据，尚需了解数据的记录格式，以此确定应用时的数学物理处理过程。

遥感图像数据是一种波谱能量数据。遥感技术发展至今，仅据一种波谱能量数据去分辨出千万种专业要素是不可能的。多时相、多平台、多波段、遥感与非遥感数据、生物地学规律知识和多种判据的介入和复合分析已成为遥感数据处理的主流。这种复合分析同样必须研究各种数据的机理，数据的格式标准化，并在统一的几何空间和统一的物理尺度的基础上才有意义，使这种复合分析能够揭示自然界的本来面目或得出接近于符合自然的结果。

遥感图像数据的种类随着遥感器的发展，已从使用了近百年的全色摄影图像发展为图像数据系列：多光谱、彩红外、彩色全息图像；数据载体由感光片发展到磁带、光盘；数据表达形式已由模拟信号发展到数字记录；数据覆盖的波谱范围，从可见光到紫外、红外、微波；数据通道由原来的一种发展到 1～200 个通道系列；平台高度从地面直至太空；数据重复获取周期由一次获取发展到几天到二十几天的重复观测周期。

遥感图像数据种类繁多，相应于各种应用目的，各具有不同的应用潜力，其数据生成机制各具特点。分辨率、光谱段、带宽、光谱响应特性、能量的物理与几何的传输过程均不相同。研究数据生成时的几何与物理过程是正确地复合分析这些数据的关键。

适于宏观地学分析沿用至今的目视识别、目视转绘是根据专家已有的地学知识和人们生活经验、工作经验的积累。这种经验积累多为可见光范围的知识。对于具有上百个波段的成象光谱仪图像、全息图像、雷达图像等，人们尚无"目视识别"这类图像的经验，这类图像往往应用于更具体的目标识别,采用的方法以复合分析方法居多。波段匹配精度，波谱响应特性的标准化更显得重要。

本文仅就常用的资源卫星行扫描图像，航空行扫描方式的图像数据生成时的几何特征模型分以下方面加以阐述。

## 一、 LANDSAT MSS 图像的空间几何特征模型

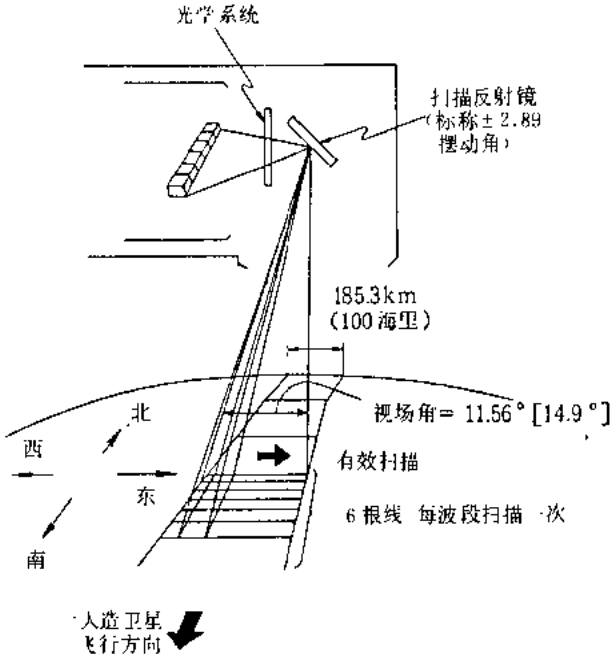



图 1 MSS 地面扫描模型

MSS 搜集数据时的地面扫描模型如图 1 所示。MSS 是沿轨道垂直方向从 920km 高空[705km]对地表 185.3km 宽的地面连续扫描的传感器。扫描是在与卫星飞行方向的垂直方向上由振动式扫描反射镜完成的。从西向东扫描时为实效扫描（取得数据）。每个波段 6 个探测器，4 个波段共 24 个探测器，一次扫描过程（从西向东）每个波段各得 6 根扫描线的数据。这样随卫星的前进从北到南顺次获取数据，对于任一波段而言，均成为由 6 根扫描线为一个单元的连续数据带。

LANDSAT 4.5 号的 MSS 与 1，2，3 号基本相同，只是卫星高度[705km]比 1，2，3 号低，地面分辨率作了改进，括号[ ]内的数字是 4，5 号卫星的数据。

MSS 的波段范围如表 1 所示。

表 1

| 波段 | 波长($\mu$m) | | 应用范围 |
|---|---|---|---|
| | LANDSAT1，2，3 | LANDSAT 4，5 号 | |
| 4 | 0.5～0.6 | 0.495～0.605 | 仅 3 号上使用 |
| 5 | 0.6～0.7 | 0.603～0.698 | |
| 6 | 0.7～0.8 | 0.701～0.813 | |
| 7 | 0.8～1.1 | 0.808～1.023 | |
| 8 | 10.4～12.6 | | |

4～7 波段各有六个接收元件。由具有正方形的输入截面的光导纤维将入射到 MSS 的焦面上的光能引导到接收元件上。在接收元件的前面有光学滤波器予以分光。图 2 表示接收元件搜集数据时的地面情况。各接收元件的瞬时视场 IFOV（Instantaneous Field of View）是由望远镜的组合焦距，标称卫星高度，光导纤维的截面积来决定的。星下点为 79m × 79m[83m × 83m]. 振动式扫描反射镜由西向东扫描时搜集数据。由东向西扫描时不搜集数据，由旋转快门遮蔽地面光的入射。公称扫描频率为 13.62Hz。也即周期为 73.42msec，扫描时间和返回时间各 36.71msec。搜集数据的时间，考虑到扫描速度的非线性，限于 33.0msec 范围内。

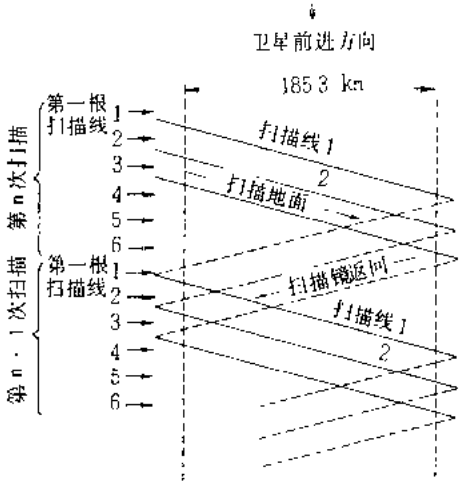



图 2　各探测器的地面扫描模型

这样一来振动式扫描反射镜从西向东扫描一次所得到的四个波段各 6 根扫描线数据，其在地面上的长度相当于卫星飞行方向的 474m[498m]。为了以这样的间隔获取地面上连续的图像，也即使下一次扫描的第一根扫描线与前一次扫描的第六根扫描线间地物连续，则卫星的地速必须是 6.456km / sec[6.783km / sec]. 卫星上传感器 MSS 的光学系统的焦距，光导纤维的截面积，振动式扫描反射镜的周期以及卫星的高度，速度等均按满足上述条件设计的。

MSS 从各个接收元件连续搜集数据形成一个数值化数据流。图 3 是 MSS 的接收元件的排列及搜集数据的顺序图，图中方框表示安置在 MSS 焦面上的正方形光导纤维的配置，$S_i$ 是相应的探测器件，$i$ 代表采样顺序号。

振动扫描反射镜频率是 13.62Hz，各探测器相当于一个通道。24 个探测器相当于 24 个通道。各探测器的模拟信号，以一字符 6 比特编码之，各字符相当于一个像元，每个探测器的采样时间是 0.3983$\mu$sec。25 个探测器（包括 8 波段一个探测器，图 3 中

未绘出）共需 9.958μsec 的时间。

实际获取图像数据的时间,从西到东一次扫描是 33msec，采样开始与结束时，振动扫描镜的角度由 2 个角度探测器测出并调整之。振动扫描镜以 5.612m / μsec[6.82m / μsec]的扫描速度前进。每个探测器的瞬时视场是 79m × 79m[83m × 83m]，每个像元数据，探测器需采样时间 9.958μsec.在这段时间里，振动扫描镜又向东移动了（相当于地面距离）5.612m × 9.958 = 55.88m[67.9m]。这时这一像元数据采集完毕，后一像元数据开始采集。后一像元数据中实际上将包含前一像元的 23m × 79m 的地面信息以及 56m × 79m 的新的地面信息。等价处理之相当于地面上是 56m × 79m[68m × 83m]的格网块的采样。未经纠正的 MSS 数据以一个像元面积作为 56m × 79 × [68m × 83m]处理，在测定地面专题要素面积时，可认为像元间的旁向重叠是可以忽略的。

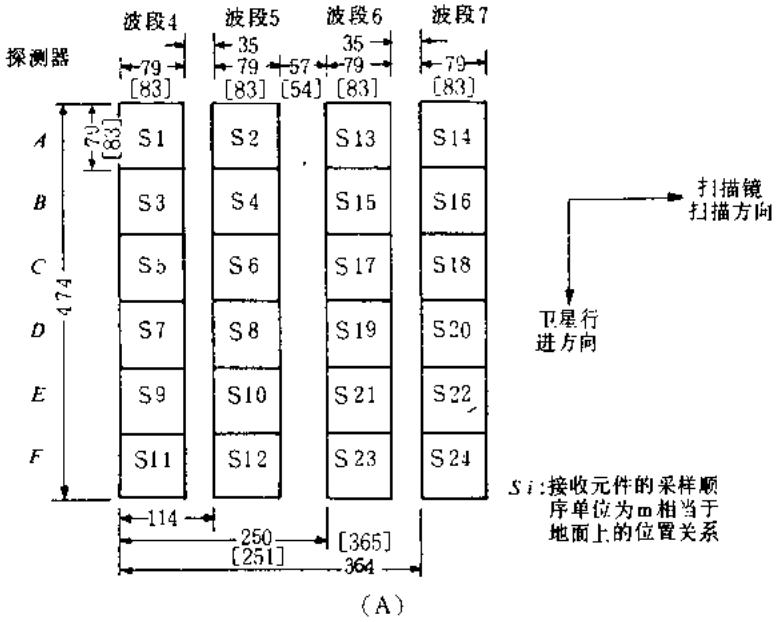



图 3　接收元件的配置及采样顺序

探测器采样按图 3 所示顺序进行的结果，使同一波段的第一个探测器与最后一个探测器间采样时间隔为 3.983μsec。这相当于地面上 22.3m（未考虑地球自转的影响）。这样的位移只能在几何处理中消除。

由图 3 可知，各个波段的检测器配置均相当于地面上相距一定的间隔，如 5 波段与 4 波段错开 114m；6 波段与 4 波段错开 250m 等。在制作 MSS CCT 时分别要在 5，6，7 波段数据前加上空白像元数据填充之。5 对 4，6 对 4，7 对 4 分别填以 2，4，6 个空白像元数据。这些像元宽度与图 3 上相应波段间距离之差可得出波段配准精度。

探测器获得的模拟信号经增强及 A／D 变换后，形成数据流，经 A／D 变换后以 6 比特作为一个字符，第七波段分成 0～63（其它波段为 128 灰阶）共 64 灰阶与传感器的其他数据以 15Mbps 的速率向地面处理中心传输。

## 二、 LANDSAT TM 图像的空间几何特征模型

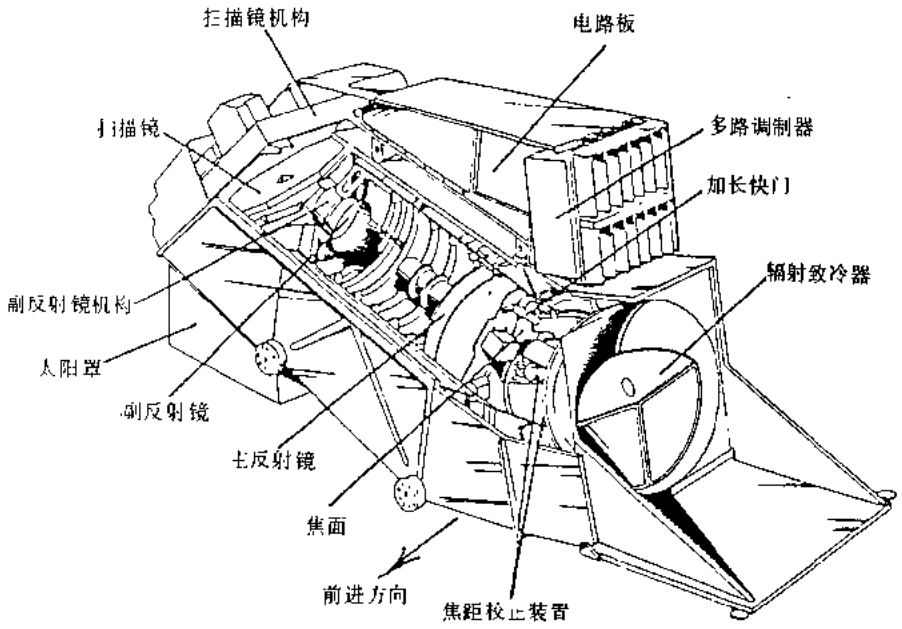



图 4 TM 传感器结构图

LANDSAT 4，5 号上搭载的 TM 传感器是 MSS 传感器的改进型。与 MSS 比较，在分辨率、波段数、几何精度以及辐射测量精度、辐射分辨率等方面均有改进，称之为第二代资源卫星传感器。换言之 TM 是一种改进型的多光谱扫描仪。同时扫描地面搜集七个波段的数据。其中 1～5 及 7 波段其瞬时视场为$0.425^{-4}$弧度,卫星高度 705km，其瞬时视场相应的地面尺寸为 30m。第 6 波段（热红外波段）瞬时视场相应地面 120m。各波段范围瞬时视场相应的地面尺寸如表 2 所示。

TM 传感器的外貌如图 4 所示。TM 传感器上安有太阳罩，太阳罩开口孔的上方安置有扫描镜及其驱动机构、控制部件、扫描监测器等。光学系统的主镜组的后面安置有扫描线改正器。1～4 波段的探测器位于主焦面上，每个波段有 16 个探测器件。中红外的 5 和 7 波段，其探测器件位于致冷系统的焦面上，也各有 16 个探测器件。热红外（6 波段）有 4 个探测器。扫描镜一次扫描得到 1～5，7 波段各 16 根扫描线

的数据及6波段的4根扫描线的数据。共100条扫描线的数据量。

表2

| 波段 | 波段范围 | 瞬时视场 |
|---|---|---|
| 1 | 0.45～0.52 | 30m |
| 2 | 0.52～0.60 | 30m |
| 3 | 0.63～0.69 | 30m |
| 4 | 0.76～0.90 | 30m |
| 5 | 1.55～1.75 | 30m |
| 6 | 10.4～12.5 | 120m |
| 7 | 2.08～2.35 | 30m |

扫描镜在扫描过程中有一个扫描角探测器在扫描镜前扫时（西→东称前扫，东→西称后扫）产生“开始”、“中间”、“结束”信号；后扫时产生同样性质的信号以送往多路调制器的时间控制器中，扫描“结束”信号表示数据格式的末端。依此信号，位于主焦面前面的扫描线改正器动作以改正重叠。这样扫描角探测器产生的脉冲成了扫描改正器等（校正快门、滤波快门及直流电路复原）的同步信号。

扫描改正器是由一对平行镀镜构成。与光轴成45°角安装。与扫描镜同步作齿状反向运动。以辅助扫描线前后扫的重叠部分。使所得到的扫描线数据与卫星轨迹方向成直角平行排列。图5即是有扫描线改正器与没有扫描线改正器时扫描线间的关系图。

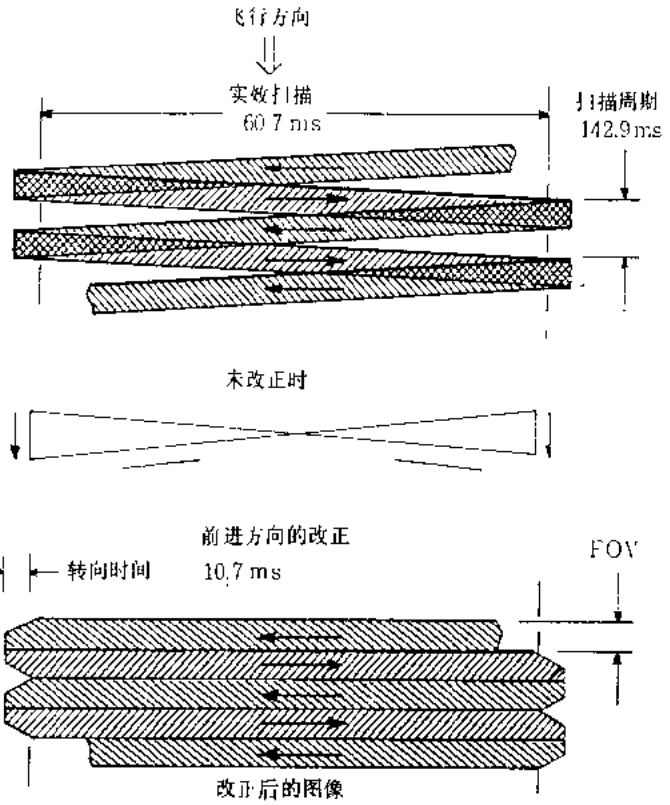
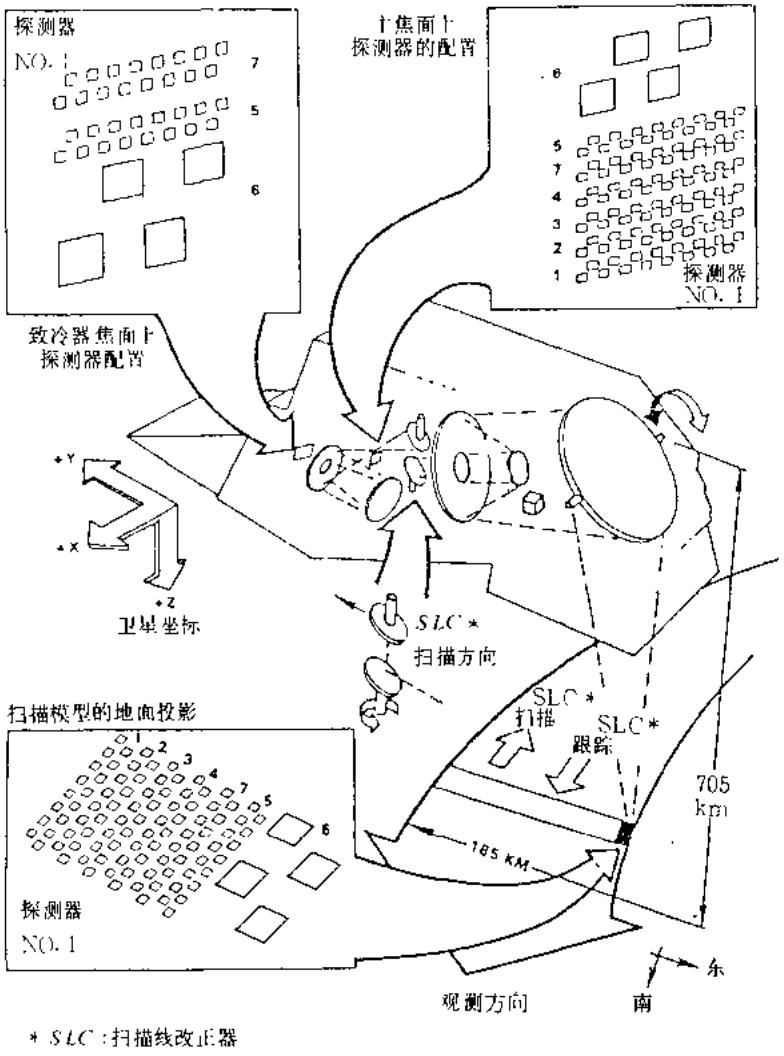



图5 扫描线改正

主镜系统的主焦面上安置有1～4可见光波段的硅探测器件。各波段间探测器件间隔2.5mm。每个波段各由16个硅探测器件作为数据采集元件使用。奇数号的探测器件沿与扫描垂直的方向成一列排列之，偶数号探测器件在卫星前进方向上保持与奇数探测器件一个IFOV的位置差。图6表示探测器件的位置关系及在地面坐标系中的投影略图。

扫描镜的扫描角是7.7°，总视场为15.39°。每个瞬间视场为$0.425^{-4}$弧度，每个像元数据的采集需9.611微秒，在实效扫描的60.743±0.3毫秒的时间里共采集6320个像元的数据。




* SLC：扫描线改正器

图 6　探测器件配置及在地面投影

上述偶数号探测器件比奇数号探测器件晚半个采样周期采样（4.81 微秒），各波段 8 个探测器的信号被光电倍增器读取，作 A／D 变换后输出数据串。这样，时刻 T 得到的奇数号探测器的数据，时刻 T+4.81$\mu$sec 得到的偶数号探测器数据以及与此有关的遥测数据一起组成 8 位字码 256 阶的数据流，以 84.9Mbps 速率向地面传输。波段内奇偶探测器间的位移在地面站制作 CCT 时得到消除。波段间配准最大误差如表 3 所示。

波段匹配最大误差　　表 3

| 项目 | | 数值（最大剩余匹配差） |
|---|---|---|
| 扫描线方向上 | 主焦面（1～波段） | 0.1IFOV 以下 |
| | 第二焦面（5～7 波段） | 0.08IFOV 以下 |
| 飞行方向上 | 主焦面（1～4 波段） | 0.13IFOV 以下 |
| | 第二焦面（5～7 波段） | 0.10IFOV 以下 |

上述可知，TM 传感器对每个波段都同时采样，仅在每个波段内是按奇偶两次采样，即每次各波段各采集 8 个探测器的数据，隔半个采样周期再采集另 8 个探测器的数据。在各个波段间不存在采样先后（如：MSS）的问题。这是由于 TM 的电子器件中有一个 100 通道的多道调制器，与 TM7 个波段的 100 个探测器件相对应。这就大大降低了波段间顺序采样期间，作为时间 T 的函数的各种几何误差的影响和波段配准误差的影响。应该说是 TM 数据较之 MSS 数据几何保真度高的原因之一。

TM 前扫和后扫均采集数据与 MSS 单向扫描采集数据的情况不同。在一次前扫（或后扫）中 16 根扫描线的相同号数的像元可认为是同一时刻采集的，这样的 16 根扫描线称为一个扫描带。即一个扫描带内相应的地面的地物影像是连续的。由于前扫与后扫扫描面的差异造成了奇数扫描带与偶数扫描带相应的地面上地物的不连续。这种位移经统计为 45 ± 10 像元的量级，其中的 ± 10 像元是一种高频成分。也可以说具有一定的随机性。这与 MSS 数据显然不同。有关这种情况可参阅本文集中“TM 双向扫描误差改正”一文。

## 三、 LANDSAT 数据的对地定位特征模型

相对于上述的传感器内部结构等引起的数据几何特征而言，本部分主要分析影响到其对地定位的各种因素及其数学模型。包括：地球的自转，传感器的位置与姿态，地面高差，扫描方程等。

1.地球自转的影响

LANDSAT 是一种以行扫描方式为主搜集地球表面的反射辐射能量数据的资源卫星。每次扫描获取各波段各 6[16]根扫描线的数据，称这样的 6[16]根扫描线为一条扫描带。一条扫描带数据搜集时间为 73.42[60.743]毫秒，尽管由于 MSS 探测器件其采样时间顺序有先后之别，使得同一波段第一根扫描线与第六根扫描线相同像元号数的像元在地面上尚有 22.3m 的位移，仍可暂认为 6[16]根扫描线上像元数相同的 6[16]个像元是同一时刻获取的。作为一景 CCT 而言，由 390[358]个扫描带组成，历经 28.6[25.6]秒的时间完成数据搜集。在这 28.6[25.6]秒的时间里，地球自转量是 13.3[11.9]km（地球半径＝6400km，一天按 24 小时计）。平均每条扫描带因地球自转引起的位移是 34[33]m。也即一景 390[358]条扫描带在地面上的排列呈阶梯状（图 7）。

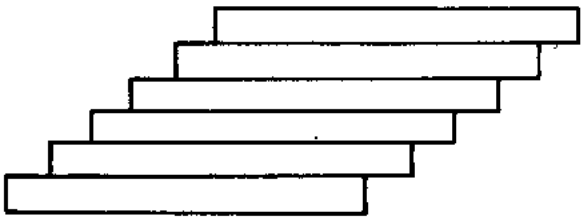


图 7 地球自转引起的带偏移

卫星轨道方向与地球坐标系间有一个因地球自转引起的偏移角$r$。每条扫描带的位移量可按下式标出：

$$\triangle u = \triangle v \cdot tan\ (r)$$

式中△v：扫描带宽度，$r$角在 CCT 辅助数据中可读得。

2.振动扫描反射镜运动方程

振动式扫描反射镜的运动方程非直线方程。造成实际地面采样角度间隔不等。探测器的数据采集是等时间间隔进行的。由于扫描反射镜的非匀速、非线性的运动方程，使得在同样时间间隔里，反映在地面上瞬时视场角的个数不等。将其图形化表示于图 8 中。其结果造成地面对象物间的挤压或拉伸(在扫描方向上)。图 8 中 $\beta_1 / 1 \neq \beta_3 / 3$ 等。

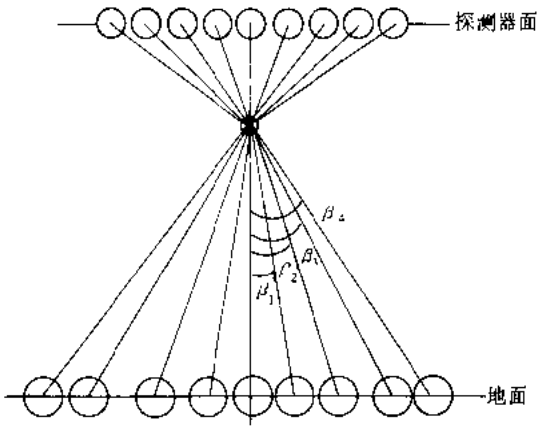



图 8　扫描不等速示意图

一般的 MSS CCT 中不提供振动扫描镜的瞬时速度，但提供计算每个像元号所对应的视角 $\theta$ 的多项式系数。对于 2、3 号卫星而言，其方程式为：

$$y = P_x - \frac{L+1}{2}$$

$$\theta = \frac{M_a}{L} y + K_0 + K_1 y + K_2 y^2 + K_3 y^3 \qquad (1)$$

其中：

$M_a$：最大扫描角度

$L$：一条扫描线的长度（用像元数表示）

$P_x$：$P$点的像元号数

$K_0, K_1, K_2, K_3$：扫描反射镜模型系数。

4，5 号卫星其表达式为：

$$\theta = 2Aexp\ (-\beta\ (P_x - 1) \cdot t_s) sinW(t_0 + (P_x - 1)t_s \qquad (2)$$

其中：

$A$：是正弦函数的振幅

$W$：扫描镜的角速度

$t_0$:扫描开始时刻

$t_s$:采样时间

$\beta$:衰减系数(=0.00739/秒)

这些参数($K_0$,$K_1$,$K_2$,$K_3$,$A$,$W$,$t_0$,$t_s$,$M_a$,$L$)均由 MSS CCT 中的相应文件中给出。

由(1),(2)式可知，振动扫描反射镜的运动是非匀速的，而是一种非线性运动。但是这种影响对于同一台传感器在不长的时间间隔内，例如：若干景的范围内，其对每一根扫描带的影响是相同的。一般处理而言是一种固定的模式，尤其在一景范围内可用一种模式处理全景每一条扫描带。

实际上也可用取样本点拟合的方法求得运动方程。如：在扫描方向上大致等间隔地取不少于 9 个样本点，分别读取像元号和相应地理坐标用最小二乘法等拟合出运动方程。其通式为:

$$v=\Phi\ (I) \tag{3}$$

其中$I$为像元号数。

(3)式也可在对地定位模型的迭代收敛计算中计算得出，通常用三次多项式也可得出结果，但已是各种误差配赋的综合结果。

这项对于对地定位的影响不可低估,经实验验证其量级可达 5 个像元。

3.地面高差引起的投影差

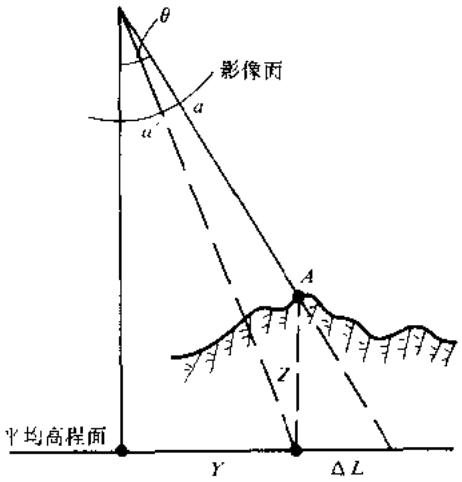



图 9　投影差原理图

资源卫星数据是一种反映生态与资源环境的宏观规律的数据。近年来多元、多维复合分析逐渐成为遥感应用的主流分析方法。这就要求各种遥感与非遥感数据要参与

复合分析。其可比性在于取用一个统一的地理基础和一个可比的物理量度。仅就地理基础而言，有多种投影方式和坐标系统。在航空摄影测量学中，由于一张航空像片覆盖的范围是有限的，多采用高斯投影的平面直角坐标系统。只要取定一个平均高程面，即可确定因地形起伏引起的投影差改正方案。资源卫星一景图像的覆盖范围为185×185km。地球表面地形高差引起的投影差显然也随取用的坐标系统不同而各异。但其基本原理是共通的。现以直角平面坐标系中地形高差引起的投影差为例简单地分析之。

其原理图示于图 9。$aa'$是高差$Z$引起的影像位移或称投影差。$\triangle L$ 是 $a$像元的地面坐标改正量,$\triangle L=\frac{Z}{H-Z}r$或$\triangle L=Z\cdot tan\theta$

资源卫星行扫描图像是多投影中心的中心投影图像，其投影差均发生在扫描方向上，而在卫星前进方向上的投影差可以忽略。这与航空像片上投影差的方向是以天底点为中心的辐射方向是不同的。

与航空像片一样，图像扫描方向上的两个边缘部份，投影差反应明显；扫描线的中间像元附近反应很弱。对于 TM 图像而言当左右边缘有 1000m 高差时投影差可达 4.3 个像元，这是不能忽略的。

4. 卫星高度变化的影响

卫星平台的实际运行高度，也会因地球自转轴线的挠动，太阳、月亮的作用，卫星轨道与地球椭球体的不一致性以及地球引力场的不均匀而发生变化，1，2，3 号卫星设计高度为 918.592km，实际上是在 900～950km 高度范围内运行，4，5 号卫星以及将来的 6 号、7 号卫星同样有这种变化。这种变化带来的影响是卫星图像比例尺的变化。换言之即使卫星传感器的瞬时视场固定不变，那么由于卫星高度的变化，同样大小的瞬时视场其地面采样面积不等。如图 10 所示。

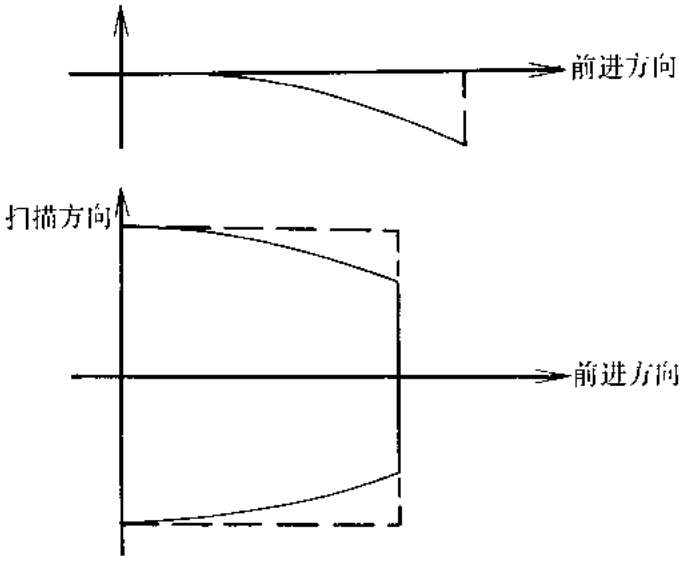



图 10　卫星高度变化的影响

卫星高度的变化是一种缓慢地单调地变化。在一景范围内认为是直线变化。这种误差的消除显然也是容易的，尤其使用附加参数的共线方程式建立几何纠正关系式时，卫星高度变化的影响已经包含在其中了。一般表达式为:

$$H = A_0 + A_1 L$$

式中$A_0$,$A_1$是待定系数,$L$为扫描带数。

5.传感器的位置与姿态变化的影响

传感器的位置与姿态对于遥感图像对地定位的影响与航空摄影测量中的情况相似。这里仅将其区别加以说明。

(1) 方形面积与条带的区别。航空摄影测量中传感器位置与姿态对航空像片对地定位的影响属航空摄影测量学中的经典理论的组成部分，多种教科书中均有明确阐述。航空像片是框幅式相机一次曝光成象，曝光时间 1／150～1／500 秒。这么短时间内认为框幅式相机具有一组位置与姿态参数（称外方位元素）。一张航空像片覆盖地面约成方形的面积。行扫描方式遥感图像是由一条条连续的扫描带组成一景幅图像，如前所述一景幅图像约需 28.6 秒（MSS）的扫描成象时间。每扫描一带约需 36.71 毫秒。扫描图像能作为具有一组位置与姿态参数的极限单元，就是一条扫描带。即可认为一条扫描带内的 6[16]根扫描线具有同一组外方位元素。这样的一条带相当于地面上约 474[480]m × 185000m 的长条带。一景有 390 条扫描带组成，那么就有 390 套位置与姿态参数。这与一张方形航空像片具有一组位置与姿态参数是不同的。

(2) 以景幅为单位考虑。一景幅扫描图像的 390 套位置与姿态参数的变化是扫描时间（T）的函数。由于传感器内扫描线数据的记录是等时间间隔进行的，那么也可以说 390 套位置与姿态参数的变化是扫描带数（S）的函数。

卫星在太空中的运行其位置与姿态变化较之航空平台而言要缓慢平稳得多,尤其是位置参数的变化是一种单调的低阶函数。根据这一论点出发经实验验证，在一景幅范围内位置变化可以直线函数，姿态变化可以一元三次多项式描述其变化轨迹；在连续多景范围内可用复杂的多项式或富里叶级数这样的周期函数描述其变化轨迹。

(3) 每条扫描带为地面上 474 × 185000m 的条带。其位置与姿态变化显然在条带的长边方向，即扫描方向上的两端影响要大；在短边方向，即卫星轨迹方向上影响的实际量级要小。这与航空像片外方位元素影响最大是在像片四个角方向是不同的。

综合上述遥感行扫描图像对地定位的模型与框幅式像片相同处，因属成熟的摄影测量学中的经典理论的组成部分，本文不再赘述。仅从上述三个与经典摄影测量不同的方面的论述中可知，遥感行扫描图像对地定位模型是一个较之框幅式像片更复杂的模型。

## 四、几点看法

(1) 遥感行扫描图像在扫描方向上是一种具有最大到 5 个像元量级的畸变图像。在不改正这项误差前不能认为遥感行扫描图像与地面具有标准中心投影对应关系。

(2) 传感器内部结构和性能决定了遥感行扫描图像几何保真度比框幅式图像差。实际上是一种多维图像。包括数据采集时间先后、同一扫描带中 6 个相同像元号数的像元的位移、波谱匹配精度（波段间采集数据的时间差）等,严格而论，是时间 T 的复杂函数集合。用简单的方式作行扫描图像的对地定位是缺乏严谨的理论根据的。

(3) 经典摄影测量学中各种外部因素对图像位移及定位的影响的理论，大部分适用于遥感行扫描图像，但遥感行扫描图像也确有自己的一些特殊规律。分析研究这些特殊规律以有效的方法处理之，是遥感应用技术发展到现阶段的需要。要实现提供准确数据，多元、多维复合分析处理技术必然成为遥感图像应用处理技术的主流。而准确地对地定位是实现这一目标的基础。

(4) 分析和掌握遥感图像成像几何机理是根据应用目的研究不同的处理模式的基础,也是采用各种处理方法的尺度,以保证遥感应用技术水平提高一步。带有附加参数的共线方程式法（以 A 数据为处理对象）是实现高精度遥感图像对地定位的最有利模式。

## 参考文献

[1]地球观测データ利用ハンドブック。[日]宇宙开发事业团。1986 年 10 月。

[2]王之卓：摄影测量原理，测绘出版社，1979 年。

# 遥感图像的几何模式研究

李树楷

[摘要]:在遥感图像的几何模式研究中,作精纠正时,地面控制点数据是必须的,其模式主要包括:共线程方式、多项式、复合匹配模式等。在建立及阐述了单景空间扫描图像的几何模式的特性之后,构造了三景连续空间扫描图像和航空 MSS 影像的几何模式,控制点上残差的中误差为 1 个像元。

但是,用一种方式去解决各种不同遥感图像的几何模式问题是困难的。采用全球 GPS 定位系统及导航定位系统,可及时得到高精度传感器投影中心的位置、姿态数据,展现出遥感图像几何学发展的新的前景。

## 前　言

遥感图像应用的主要问题:定性(回答是什么),定位(回答在何处,数量)是遥感应用技术的两大支柱。定位与定性的密切结合组成了遥感应用技术系统。定位问题是图像处理、信息系统的基础,是量化的依据,是多种数据复合分析的关键,是应用分析结果(图化、数据)的表达手段。

定位的理论基础主要是遥感图像的几何学或叫遥感图像计算几何学。主要研究遥感图像数据获取过程中的几何特征、空间分辨率、几何模式、处理技术、遥感数据的四维空间分布规律、图化理论与方法、非遥感数据的四维空间分布规律及与遥感数据的匹配复合模式。

遥感图像几何模式的研究是遥感图像几何学的重要组成部分,是遥感应用技术系统的重要环节。以往的遥感图像几何模式的研究以空间对地二者关系而论可分为正变换和逆变换。

正变换:即根据传感器的空间位置、姿态参数(是已知,足够精度),将遥感信息依上述已知数据在地面坐标系统中定位。这是人们早已期望的方式,但以往的航天航空传感器平台这类参数的精度满足不了常规定位要求,尚未能实用。近期发展起来的 GPS 全球定位系统(及其它类似系统)的复合应用技术的利用,实现这种定位方式已是可能的了。

逆变换:即依靠地面控制数据建立地面坐标与遥感信息坐标系间的对应关系,也包括依地面控制数据反推传感器的空间位置与姿态。这是迄今为止国内外普遍采用的方式。

按遥感数据获取时的几何特性而论,可分为:

利用遥感数据获取时的几何特性(过程)的方式。遥感数据获取时波谱信息的传输过程与通常的框幅式相机的几何光学过程类似。这种方式通常采用中心投影的共线方程式为基本模式,是一种四维空间数据模式。

黑匣子方式:即不考虑遥感数据获取时的几何过程。将遥感信息的几何变形作为简单的扭曲、比例不一等影响的结果。一般采用多项式的方式作为几何处理的基本模

式。

影像相关匹配的方式也属此类。因耗时多,一般不采用影像相关匹配这种方式。

上述两种方式的复合方式,即系统纠正后采用多项式建立变换关系式。

以上三类方式在地形起伏很大的地区均需引入 DEM 数据以改正因地形起伏引起的投影误差影响。对航天遥感图像而论均可达到对地定位目的。

遥感信息获取方式很多，通常有:

[1]行扫描方式。如卫星 MSS，TM，航空 MSS，成像光谱仪等;

[2]CCD 推帚式。如 SPOT 等;

[3]波束式。如雷达等;

[4]框幅式。如 LFC，航空测量像机等;

[5]全景扫描摄影式。如国土卫星等。

迄今应用最广泛的是[1]和[4]。[3]方式由于具有全天候、全时域及特殊的波谱效应等特点,将成为重要的数据获取方式而得到广泛应用。[2]方式有好的几何保真度的特点，不仅对遥感信息获取，且是实时数据获取系统的雏型，三维自动识别(机器人视觉)的数据也将由这类方式获取,如三行线性阵列扫描仪,而三维自动识别的软件研究是对硬件发展的强有力配合。

这些遥感器的数据获取方式不同，数据载体及辅助数据的精度、数量各异。遥感图像数据量相差悬殊,带来了大量的对地定位模式研究、处理技术研究、智能化研究、规格化标准化研究及图化技术研究等。本文仅就行扫描遥感图像的几何模式问题及遥感图像几何学的发展，从下述六个方面予以阐述。CCD,波束式、全景摄影方式的遥感图像的几何模式及图化等问题另文介绍。

## 一、遥感图像的几何特征

航空航天行扫描图像的数据采集过程大体相同，数据采集系统由反射镜(摆动式或旋转式)、光学系统和位于光学系统焦面上的探测器件组成。物质经阳光照射后的反射能、物质本身的辐射能经大气传输(吸收、散射、衰减等过程),由反射镜引入遥感器的光学系统。在光学系统中经分光棱镜等分光系统到达探测器(图 1)。

航天航空行扫描方式遥感器其数据采集过程如图 2 所示。地面物质的反射、辐射能由旋转棱镜的旋转使与遥感器天底方向具有不同入射角度的电磁波进入遥感器的光学系统。实现一条扫描线上连续像元数据的采集，完成一维扫描。遥感平台推进( 卫星或飞机等)完成二维扫描。其几何特征有如下五个方面。

### 1、多个投影中心的投影影像

航空行扫描方式以 25 圈／秒计算，每条扫描线需时 0.04 秒，航天 MSS 以扫描频率 13.62HZ 计算，每条扫描带需时约 0.07 秒。一景卫星 MSS CCT 约 390 条扫描

带，则需时约 28 秒。这个时间段遥感平台在前进，位置、姿态在发生连续变化。因此，航空 MSS 的每个像元，卫星 MSS 每条扫描带中像元号数相等的六个像元，TM 每条扫描带中像元号数相等的 16 个像元，各有一个投影中心。严格说来，一景扫描图像中有多少个像元，就应有同样数量的投影中心(卫星 MSS 为像元数的 1／6、TM 为 1／16)。

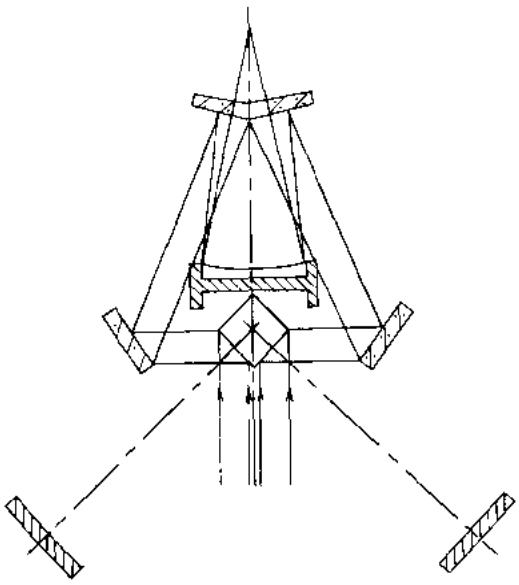


图 1

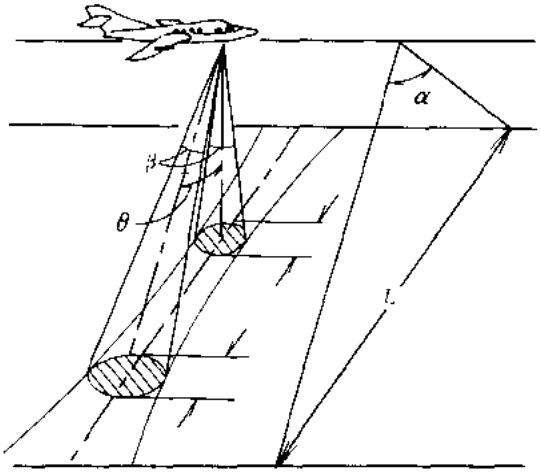



图 2

**2、像元间、扫描线间(或扫描带间)重叠、遗漏、交叉现象的存在是行扫描图像的第二几何特征**

扫描图像的每根扫描线上的像元在数据采集时的轨迹是时间 T 的函数。“像元数值是等时间间隔记录的，平台姿态、位置随时间非匀速变化时，像元所对应的地面瞬时采样面积间的距离变化轨迹是非等间距的或者是非等角度的变化。出现重叠、遗漏、交叉现象。如：卫星 MSS 是摆动式反射镜，反射镜不等速所产生的地面采样面积间的不等角度差可达 5 个像元。

**3、采样面积的全景式畸变**

行扫描方式是位于扫描仪等效主距处的探测器获取像元数据。是一种全景扫描方式。从图 2 可知，地面瞬时采样面积距光学系统的投影中心在地面上的垂足愈远愈大。若瞬时视场为圆锥的话，垂足处为圆,愈远处渐成扁率愈大的椭圆形。瞬时视场角虽相同，地面实际采样面积却可相差很大。以航空扫描仪而论，航高为 3000m，瞬时视场为 3 毫弧度时，边缘的地面瞬时采样面积为 192m$^2$，垂足处为 63.6m$^2$。几乎为

3:1。其计算公式为:

$$\frac{\partial A}{\partial \theta} = \frac{1}{4}\pi H^2 tan\beta \cdot sin\beta(5\theta - 4\theta^3) \tag{1}$$

式中:$H$为航高，$\theta$ 为入射角。

**4、类中心投影的几何关系**

仅考虑行扫描图像的扫描断面可见图 3。图 3 中$P_1P_1$为假定平面，$PP$为实际扫描断面。图中所示为遥感器面向正下方，等角速度地收集地面数据时的理想状况。设假定平面的等效主距为$f$,与主光轴成$\theta$角的光线在 $PP$ 上投影的坐标为$(I,J)$。其中$J$为扫描线号，$I$为像元号。其在假定平面$P_1P_1$和$PP$上的投影坐标$(x,y)$与$(J,I)$坐标间有如下关系(以卫星 MSS 为例):

$$y = f \cdot tan\theta \qquad x = f \cdot tan\delta / cos\theta$$

这里: $\theta = \{I - (n+1)/2\}\Delta\theta \qquad \delta = (K - 3.5①)\Delta\delta$

$$K = MOD(J - 1,6) + 1②$$ (2)

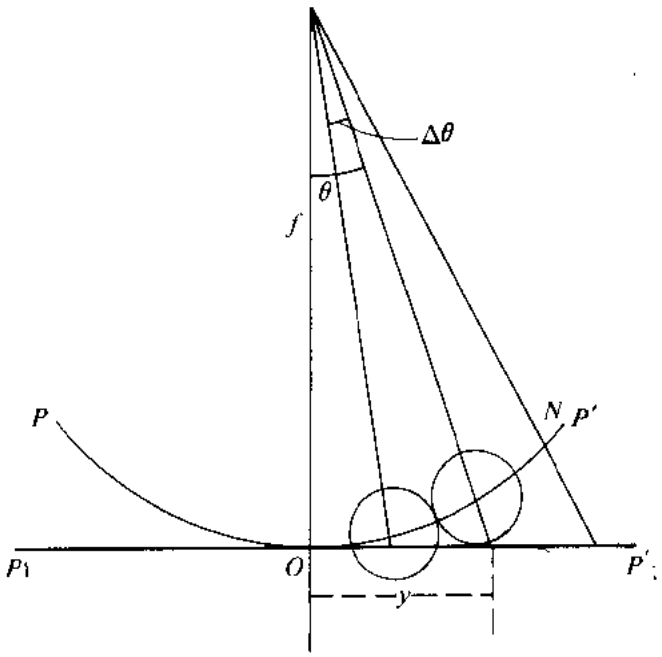



图 3

其中: $\Delta\theta$ 为扫描方向 ($y$方向) 的瞬时视场角，$\Delta\delta$ 为平台前进方向 ($x$方向) 的瞬时视场角，$N$为一条扫描线所包含的像元数，$K$为探测器号。

①TM图像时比值为8.5,以下同。

②MOD 为FORTRAN 语言的求余函数。

这个过程即所谓的正切改正过程。是行扫描图像的几何特征。TM 与 MSS 在投影关系方面的区别是：$\Delta\theta$，$\Delta\delta$，$N$，$K$值的差异。航空 MSS 图像中，$x$永远为 0。

类中心投影的几何关系也决定了地形高差引起的投影差问题的客观存在。如图 4 所示。由图不难看出：

$$aa' = f \times [arctan((NA' + A'A'') / H) - arctan(NA' / H)]$$

$$A'A'' = \frac{\Delta h}{H} \times NA''$$

$aa'$即为图像上的投影差改正量。而$A'A''$即为地面上$a$像元的地面坐标投影差改正量。

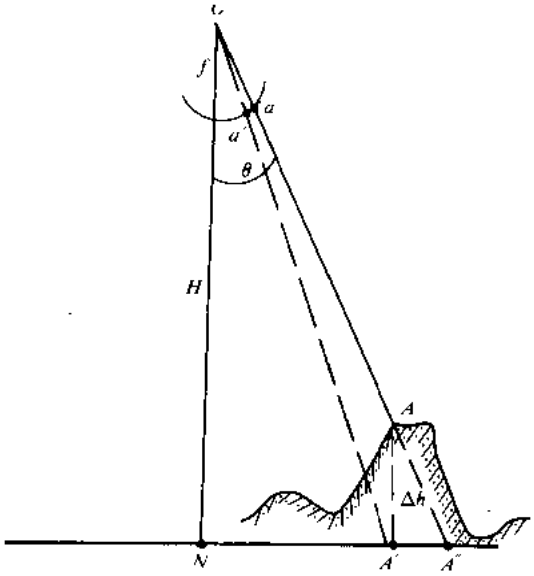



图 4

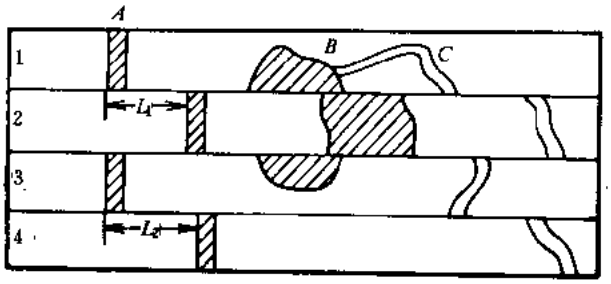



图 5

**5. TM 双向扫描误差引起的图像上地物的不连续**

LANDSAT 4，5 上搭载的专题制图仪(简称 TM)与 MSS 不同，是双向扫描均采集数据。由于正、反向扫描间的误差存在，使得图像上奇偶扫描带上的相同地物不连续。如图 5 所示。

图 5 中 1,2,3,4 表示扫描带号,每个扫描带由 16 根扫描线组成。图中 A 为一道路,B 为一湖泊,C 为河流。偶数带上的道路影像均较奇数带上同一道路影像偏离一定的值 L。经验证$L1 \neq L2$，统计 200 个扫描带大致规律为，$L$的值为 45 ± 10 像元。摆动量是随机的。这类数据是 TM 的 A 数据。没有加任何几何与辐射校正(见试验样片 10)。

一般用户索取的数据是已改正了双向扫描误差，进行了系统几何校正和辐射校正的"粗纠正"后的数据。甚至为满足一般用户"直观感觉"的需要，作了某些反差增强、滤波等像质改善的处理。实际上这样的数据中已经有了过多的人为"躁声",依此图像

去作解译，计算机分类，其结果的可信度如何评价，却成了一个新的课题。

## 二、遥感图像辅助数据的获取

### 1、航天遥感行扫描图像的辅助数据

航天遥感行扫描图像提供与几何有关的辅助数据主要是星历、姿态、地球自转引起旋角、公称一条扫描线的像元数、瞬时视场角、扫描频率、光学系统反射镜的运动方程等数据。这些辅助数据应由地面站处理后按 CCT 产品的级别及格式记录在 CCT 的有关文件中。

星历和姿态数据按国际标准格式在未经几何粗纠正的 CCT 中应在有关文件中记录并向用户提供详细格式书。如 LANDSAT 1-3 号卫星 MSS CCT 是从一景图像中心起算每隔 3.45075 秒和 5 秒提供 9 个点和 5 个点的星历及姿态数据。LANDSAT 4 应提供每隔 4.096 秒一个，一景有 7 个点的星历和姿态数据。TM 的 CCT 应在未经几何粗纠正的一景 CCT 的倒数第二个文件中的第三个记录里记有变形改正系数。

这些辅助数据随不同的星体，不同的遥感器，不同的格式(BIL，BSQ 及最早的 BIP2)记录在不同的文件中。由于这些位置与姿态参数是用陀螺系统、惯性测量系统测量的，精度比较低。以此数据作系统纠正处理只可达到几百米至千米的精度。这些数据在地面站作粗处理时使用。在使用共线条件作精纠正时作为初始值使用。其他数据对于准确计算分景范围，考察图像内部几何关系是必不可少的。

### 2、航空行扫描遥感图像辅助数据的获取

相对于航天行扫描图像而言，由于航空平台的不稳定，航空行扫描遥感图像的几何处理更需要利用辅助数据。当前辅助数据获取方式主要有两种：

(1) 惯性导航系统记录数据

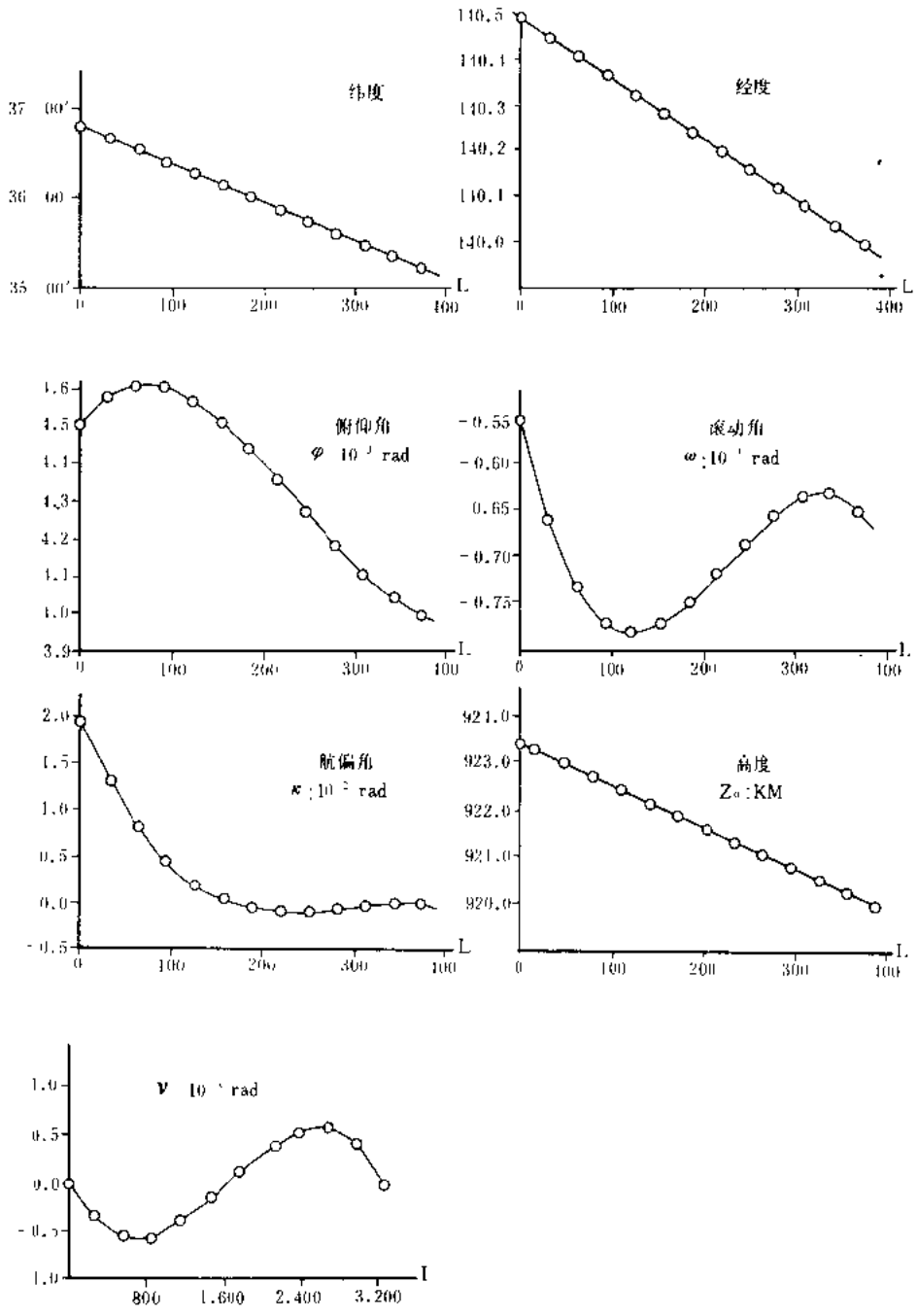
现在遥感飞机上已装备的惯性导航系统与航空行扫描仪匹配。即以惯性导航系统记录的位置与姿态数据作为同一时刻扫描图像的位置姿态参数。惯性导航系统 $X,Y$ 值的精度在地面控制点上初步试验结果分别为 ±12.9m 和 ±17.1m(1:5000 比例尺)，尚不能用于精确定位。惯性导航系统可以 0.1 秒间隔连续记录。对于 25 圈／秒和 8 圈／秒的扫描仪而言，可分别作到每 10 根扫描线和每 2 根扫描线一组位置与姿态数据记录。

(2) 航空摄影相机与扫描仪匹配

扫描仪固定时间间隔发出脉冲启动航空摄影机快门曝光。在航空摄影图片上选取地面控制点，空中后交求得像片投影中心的内外方位元素。以此作为同一时刻扫描线的位置与姿态数据。航空相机可使用廉价的小像幅相机。对于 25 圈／秒和 8 圈／秒的扫描仪而言可分别做到每 50 根和每 16 根扫描线一组位置与姿态数据。初步试验研究结果表明利用这类辅助数据可明显提高扫描图像定位精度①。

---

①李树楷、刘彤，周丽华："航空扫描图像几何模式的研究，"第十届亚洲遥感会议论文，1989年11月。




图六　卫星位置与姿态变化曲线

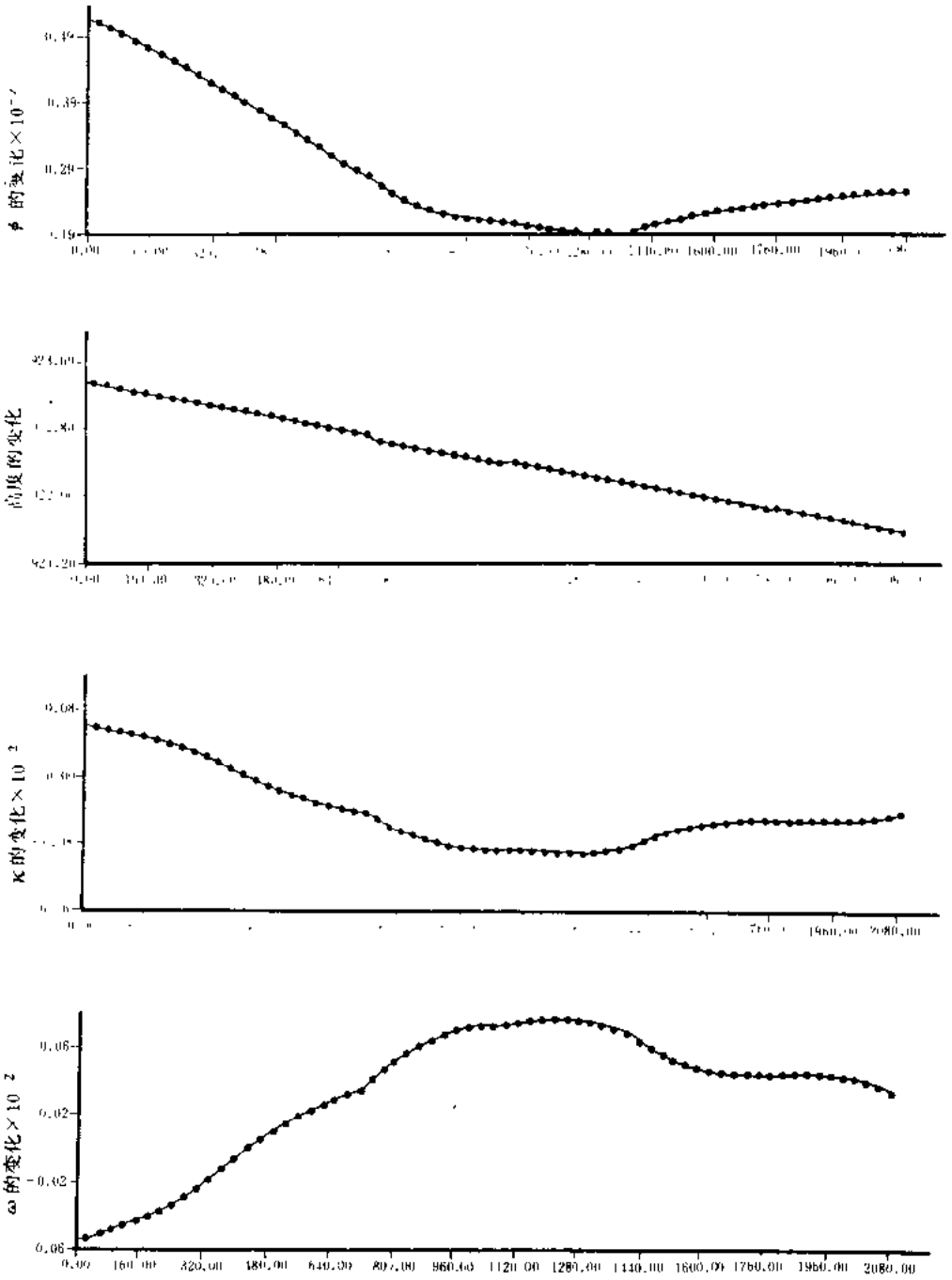


图 7　连续六景卫星姿态及高度变化曲线

以上两类数据均需作拟合以求得每根扫描线投影中心的位置与姿态数据。获取数据时要考虑遥感器间的刚性平台结构。

关于利用 GPS 全球定位系统的复合技术高精度获取遥感器位置与姿态数据的问题是研究的方向。有待进一步研究逐步形成实用系统。

## 三、航天遥感图像几何模式及试验研究

卫星平台在轨道上的运行较之飞机平台而言，在一定范围内其位置变化是近乎线性的，其姿态变化是缓慢的简单函数曲线变化。一景范围而言，其位置变化轨迹是直线，姿态变化可以一元三次多项式描述(图 6)。六景范围内根据卫星 MSS CCT 的有关文件中提供的星历及姿态数据其变化曲线如图 7 所示。三景范围内由于使用粗纠正后的卫星 MSS CCT 作实验，其位置变化取用一元三次多项式，其姿态变化取用一元五次多项式，振动扫描镜不等速取用一元三次多项式，依此取得了收敛计算结果。

### (一) 单景几何模式

1. 黑匣子方式

主要考虑到卫星位置与姿态变化是一种随时间的缓慢地简单函数变化，其图像变形也是简单的扭曲，比例尺纵横方向的变形等等。采用的模式为二元三次多项式:

$$\begin{cases} X = c_0 + (c_1 x + c_2 y) + (c_3 x^2 + c_4 xy + c_5 y^2) + (c_6 x^3 + c_7 x^2 y + c_8 xy^2 + c_9 y^3) \\ Y = d_0 + (d_1 x + d_2 y) + (d_3 x^2 + d_4 xy + d_5 y^2) + (d_6 x^3 + d_7 x^2 y + d_8 xy^2 + d_9 y^3) \end{cases} \tag{3}$$

其中：$c_i(i=0,1,\cdots 9), d_i(i=0,1,\cdots 9)$为多项式系数，$x,y$由(2)式求得。在地面(一般是地形图)和影像上选取影像获取日期至地图作成日期间变化不大的道路交叉点，水库大坝端点等易于识别准确判读、量坐标的明显地物点作为控制点。以 1 像元和图上 0.1mm 的精度读取控制点的影像坐标($I$，$J$)和地理坐标($X$，$Y$)作为输入值。地理坐标用经、纬度单位时要读到秒。控制点分布要均匀，点位分布不均则造成图像上位置精度不一。从(3)式可知，未知数有 20 个,至少需 10 个点才可得解。一般使用时地面控制点不少于 20 个，采用最小二乘法平差以提高精度。

二元三次多项式的模式用于几何处理可得到点位中误差为±1 像元以内的对地定位精度。

2. 共线方程式

考虑到行扫描图像获取时的几何特征，按(2)式可将遥感行扫描图像作为中心投影方式的图像处理(图 8)。

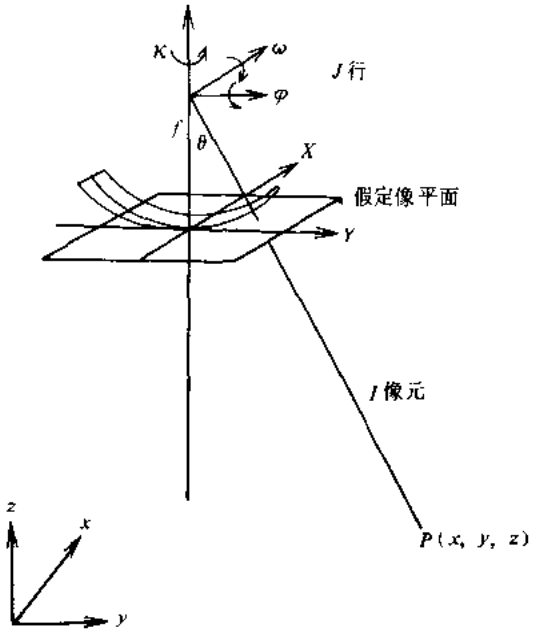



图 8

遥感器的位置与姿态是卫星运行时刻 T 的函数（或扫描带），其关系式为:

$$\begin{cases} \varphi = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \\ \omega = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \\ \kappa = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 \\ X = d_0 + d_1 t \\ Y = e_0 + e_1 t \\ Z = f_0 + f_1 t \end{cases} \tag{4}$$

其中: $a,b,c,d,e,f$为待定系数。

$$\begin{cases} x = -f \cdot \dfrac{a_1(X-X_0) + b_1(Y-Y_0) + c_1(Z-Z_0)}{a_3(X-X_0) + b_3(Y-Y_0) + c_3(Z-Z_0)} \\ y = -f \cdot \dfrac{a_2(X-X_0) + b_2(Y-Y_0) + c_2(Z-Z_0)}{a_3(X-X_0) + b_3(Y-Y_0) + c_3(Z-Z_0)} \end{cases} \tag{5}$$

式中: $a,b,c$为方向系数。

卫星 MSS TM 的遥感器的反射镜是摆动方式，反射镜的运动方程必须予以考虑。其最大可影响到 5 个像元量。一般采用的有两种公式:

$$V = g \cdot I(1 - N/2)(1 - N) \tag{6}$$

$$V = g_0 + g_1 I + g_2 I^2 + g_3 I^3 \tag{7}$$

式中：$g$为待定系数，

$I$为像元号数，

$N$为一条扫描线中的像元个数。(6),(7)式对于同一景图像是通用的计算公式，仅仅是像元号数的函数。

地面控制点的分布原则是:沿飞行方向和扫描方向布点要考虑到两个方向均不少于 5 个点。点位确定原则与"1"中相同。(4)与(6)式的待定系数为 19 个，(4)与(7)式的待定系数为 22 个，即地面控制点至少要 11 个才能满足求得待定系数的要求。试验研究结果表明，选点正确及坐标读取精度在 ± 1 像元和 0.1mm 以内时，使用 20 个控制点与使用 11 个控制点其几何处理精度没有明显差别，均可达到中误差 ± 1 像元以内的精度。

3. 系统纠正后采用仿二元一次多项式

利用卫星星历和姿态数据对原图像系统纠正后采用仿二元一次多项式作二次纠正。仅作系统纠正时由于卫星星历及姿态数据精度不高只能达到千米级精度。仅用二元三次多项式则待定系数较多，要用到三次幂的运算。这类模式实际上是综合方式。它考虑到遥感图像数据获取时的几何特征(系统纠正)，最后采用黑匣子方式的模式。

系统纠正采用的主要公式为:

(a) 摆动式扫描镜不等速引起的扫描角度的变化按(7)式求得。坐标关系式为:

$$\begin{cases} y = f \cdot \tan(\theta + v) \\ x = f \cdot \tan\delta / \cos\theta \end{cases} \tag{8}$$

其中:$f = 1/\Delta\theta$

(b) 卫星高度可按(4)式中之第六式求得每扫描带的卫星高度$H_i$与平均高度之差为 ΔH,则关系式为:

$$y = \frac{f(H_0 + \Delta H)}{H_0}\tan\theta, \qquad x = \frac{f(H_0 + \Delta H)}{H_0}\frac{\tan\delta}{\cos\theta} \tag{9}$$

(c) $\varphi$ 角按(4)式中之第一式求得每扫描带的值，考虑 $\varphi$ 角对卫星前进方向,即$x$方向影响值为:

$$\delta = \varphi + (J - 3.5)\Delta\delta \tag{10}$$

坐标式为: $x = f \cdot \tan\delta$

(d) $\omega$ 角按(4)式中第二式求得，考虑其对 y 方向的影响:

$$\theta = \omega + (I - (N+1)/2)\Delta\theta \tag{11}$$

(c) $\kappa$角按(4)式中第三式求得，考虑 $\kappa$ 角是绕铅垂点旋转。铅垂点在以扫描带中心为坐标原点的坐标系中,其 y 坐标为$\mu_0$,则$\mu_0 = f \cdot tan\omega$。第$i$ 点上 $\kappa$的影响为:

$$\begin{cases} \Delta y = (\mu_i - \mu_0)cos\kappa \\ \Delta x = (\mu_i - \mu_0)sin\kappa \end{cases} \tag{12}$$

经上述及其他系统纠正之后的图像假平面坐标与地理坐标间的变换式为:

$$\begin{cases} X = a_1 xy + a_2 x + a_3 y + a_4 \\ Y = b_1 xy + b_2 x + b_3 y + b_4 \end{cases} \tag{13}$$

如前所述如有足够数量的地面控制点，一般不少于 10 个，即可纠正精度达到±1 像元以内，但要求地面控制分布均匀。

4. 其它类型的纠正方式

以上三种模式均可对整景行扫描图像作几何处理。实际应用中尚有另外两种方式: 一种是把一景像分成 7×16=112 块分别用纠正仪或其它类型纠正设备纠正也可达到±1 像元的纠正精度。另一种是仿射变形纠正方法。一景图像分成四块作仿射变形纠正可达中误差为±135m 的精度。

**(二)多景连续卫星行扫描图像的几何模式**

卫星位置与姿态变化是一种缓慢的简单函数图形变化的轨迹。卫星图像数据的获取是连续的，只是为了便于利用人为地分成一景景的图像。图 7 所示为六景连续图像位置与姿态数据的变化曲线，可以看出$X$、$Y$、$Z$的变化是近乎线性的，$\varphi$、$\omega$、$\kappa$的变化是简单的曲线变化。将单景模式中位置与姿态变化是时间 t(或扫描带) 的函数的概念加以扩充应用,多景连续卫星图像的几何模式可以确立。试验研究结果证明,三景连续卫星图像的几何模式为(14)式,正切改正及共线方程式与(2),(5)式相同。

三景扫描线数重叠数的计算采用两种方法: ①根据每景图像中心时刻及扫描频率计算。②上述数据得不到时可以用输出前一景的最后 512×512 与后一景最前面相应的部位相同数量灰阶图像，用人工方式依明显地物读取重叠扫描线数。

试验研究结果为控制点上残差中误差为±1.08 像元。由于只得到粗纠正后的图像，地面站的粗纠正一定程度上破坏了图像内部及景与景之间的几何关系。上述精度不是理想精度。三景六个方位元素的变化曲线如图 9。其中卫星高度的变化曲线由于使用已经过粗纠正的图像及其它未顾及误差的影响比之于$X$、$Y$曲线稍复杂些。

$$\begin{cases} \varphi = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + d_4 t^4 + a_5 t^5 \\ \omega = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5 \\ \kappa = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 + c_5 t^5 \\ X = d_0 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3 \\ Y = e_0 + e_1 t + e_2 t^2 + e_3 t^3 \\ Z = f_0 + f_1 t + f_2 t^2 + f_3 t^3 \\ v = g_0 + g_1 t + g_2 t^2 + g_3 t^3 \end{cases} \tag{14}$$

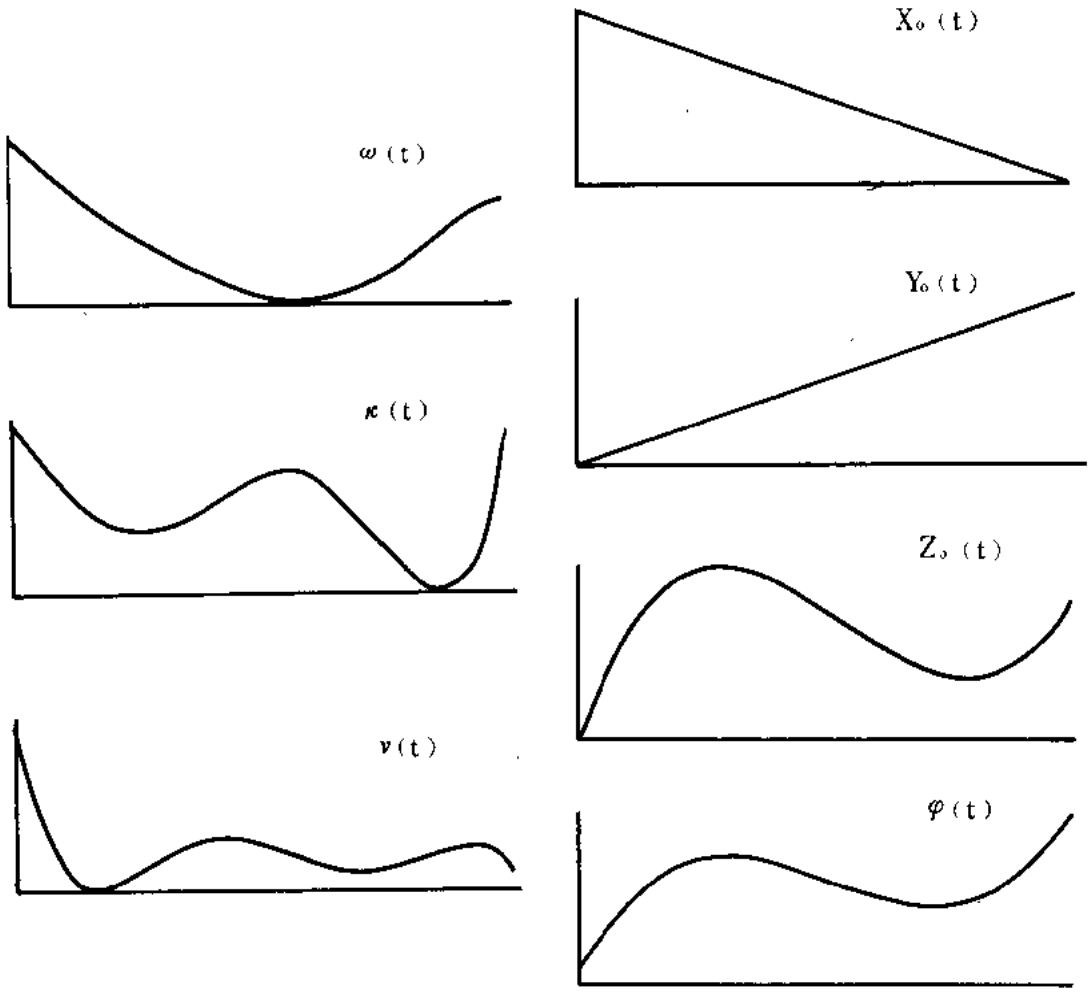



图 9　连续三景卫星平台位置与姿态变化曲线

## 四、航空行扫描图像的几何模式

航空遥感平台的位置和姿态变化远比卫星平台剧烈。试验研究证明，直接仿卫星行扫描图像几何模式中的(3)式得不到正确的纠正效果。航空遥感器位置与姿态变化函数比(4)式复杂[1]。直接应用(4)式也是不可能的（图 10)。航空行扫描图像的几何模式要考虑飞行平台位置与姿态变化剧烈这一特点。

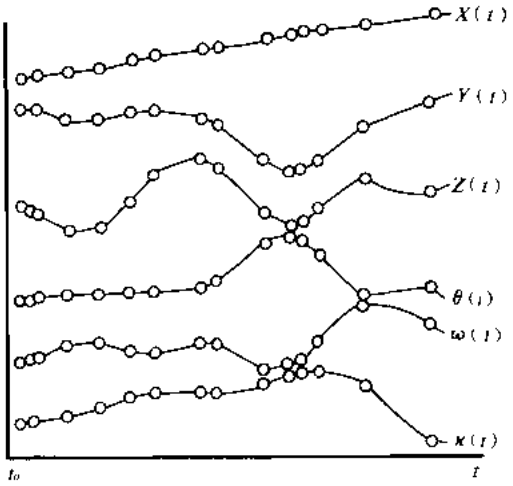



图 10　航空平台位置与姿态变化

1、分块多项式

$$\begin{cases} X = a_0 + a_1 X + a_2 X + a_3 Y + a_2 XY \\ Y = b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_2 XY \end{cases} \tag{15}$$

式中：$X$、$Y$ 为按(2)式正切改正后的假平面坐标。$X$、$Y$ 为地面坐标，$a$、$b$ 为待定系数。

航空行扫描图像分成若干“块”,每块由三个控制点组成的三角形。每个三角形中依三个控制点的地面坐标和假平面坐标按(15)式建立对应变换式。其纠正过程为：每

[1] 李树楷、刘彤、周丽华：航空扫描图像几何模式的研究，第十一届亚洲遥感会议论文，1989年11月。

个三角形的三个顶点按 $X$ 方向排队，各个三角形中具有 Xmax 的顶点间再次按 $X$ 方向排队，列出多个边界条件，即可自动搜索地面任意点所应在的三角形,继而用这个三角形的变换系数求得假平面坐标，再求得扫描图像坐标。

试验结果表明，这些控制点的间隔要在 25 条扫描线、25 个像元以内。这个条件是很苛刻的①。

2、综合模式

使用航空相机与扫描仪匹配取得了五秒间隔一组位置与姿态参数。位置与姿态参数按(5)求得。每根扫描线投影中心的位置与姿态参数，以上述 5 秒间隔一组的值作为时间 t 的函数，用三次参数样条函数求得。三次参数样条插值函数形式如下:

$$\begin{cases} X = X_j(t) = \begin{bmatrix} f_0(t) & f_1(t) & g_0(t) & g_1(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta S_{j+1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta S_{j+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_j \\ X_{j+1} \\ b_{xj} \\ b_{xj+1} \end{bmatrix} \\ Y = Y_j(t) = \begin{bmatrix} f_0(t) & f_1(t) & g_0(t) & g_1(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta S_{j+1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta S_{j+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_j \\ Y_{j+1} \\ b_{yj} \\ b_{yj+1} \end{bmatrix} \end{cases} \tag{16}$$

其中:

$S_1 = 0;$

$S_2 = S_1 + S_2;$

$S_i = \sum_{i=2}^{j} \Delta S_i = \sum_{i=2}^{j} \sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2};$

$t = \dfrac{S - S_j}{\Delta S_{j+1}};$

$\Delta S_{j+1} = S_{j+1} - S_j;$

$b_{xj} = \dfrac{dx}{ds}\Big|_{s=s_j};$

$b_{yj} = \dfrac{dy}{ds}\Big|_{s=s_j};$

$b_{xj}, b_{yj}$ 可由下式求得:

① 李树楷、刘彤、周丽华：航空扫描图像几何模式的研究，第十一届亚洲遥感会议论文，1989年11月。

$$
\begin{cases}
\begin{bmatrix} 2 & u_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \lambda_2 & 2 & u_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_{n-2} & 2 & u_{n-2} \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & \lambda_{n-1} & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{x,1} \\ b_{x,2} \\ \cdots \\ \cdots \\ b_{x,n-1} \\ b_{x,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{x,1} \\ D_{x,2} \\ \cdots \\ \cdots \\ D_{x,n-1} \\ D_{x,n} \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} 2 & u_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \lambda_2 & 2 & u_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_{n-2} & 2 & u_{n-2} \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & \lambda_{n-1} & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{y,1} \\ b_{y,2} \\ \cdots \\ \cdots \\ b_{y,n-1} \\ b_{y,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{y,1} \\ D_{y,2} \\ \cdots \\ \cdots \\ D_{y,n-1} \\ D_{y,n} \end{bmatrix}
\end{cases} \tag{17}
$$

其中:

$$\lambda_j = \frac{\Delta S_{j+1}}{\Delta S_j + \Delta S_{j+1}};$$

$$u_j = 1 - \lambda_j \frac{\Delta S_{j+1}}{\Delta S_j + \Delta S_{j+1}} \quad (j = 1,2\cdots n-1);$$

$$D_{x,j} = 3(\lambda_j \frac{x_j - x_{j-1}}{\Delta S_j} + u_j \frac{x_{j+1} - x_j}{\Delta S_{j+1}});$$

$$D_{y,j} = 3(\lambda_j \frac{y_j - y_{j-1}}{\Delta S_j} + u_j \frac{y_{j+1} - y_j}{\Delta S_{j+1}})。$$

式中的$X_i$、$Y_i$可用扫描线号分别与方位元素中的$X_i$、$Y_i$、$Z_i$及姿态参数中的$\varphi_i$、$\omega_i$、$\kappa_i$代替。

求得每根扫描线的位置与姿态后可按(8)~(12)式分别改正图像的影像坐标值后用(3)或(15)式的逆变换式建立影像的假平面坐标与地面坐标间的变换关系式。

试验研究表明航空行扫描图像5秒一组位置与姿态数据是不能详细描述航空遥感平台位置与姿态变化的真实轨迹的。研究结果表明其时间间隔不得超过2秒。即使如此按本方法仅用$X$，$Y$，$Z$对航空行扫描图像改正的试验结果其几何精度得到了改善。

3、利用地面直线状地物的几何模式

一般说来平原发达地区，公路、人工渠道、乡村路等直线状地物较多。航空行扫

描图像上这类地物的变形影像坐标值可以取得。地面坐标可在地形图上量取。影像变形可用(16)、(17)式拟合并插出每根扫描线上的变形像元量。与地面直线方向对应方向的较差作为每根扫描线的像元改正量。以此变形改正后的数值代入(3)式，求得变形改正后的影像假平面坐标与地面坐标间的变换关系系数。

这类模式的试验结果表明，是一种局部地区应用的精度尚可的方法。控制点上残差的中误差为±0.9像元。

由上述可知航空行扫描图像迄今为止尚无大范围确定其变换关系的实用几何模式。综合模式是最有希望的模式，但要有足够密度、足够精度的辅助数据。

## 五、遥感图像的地图化－再采样

包含有多种变形的遥感图像(包括粗纠正后的图像)在定位应用中是困难的。尤其是航空遥感图像其几何变形较之卫星图像为甚。直接影响到与高精度定位有关的方面。如多种数据的复合分析，动态监测的计算，不同时相不同遥感器图像，遥感与非遥感数据的匹配等。遥感图像的地图化或再采样(暂以地形图作为归算的标准)是遥感图像应用的重要步骤。

遥感图像一般数据量很大。如：一景卫星MSS CCT约30兆数据，一景卫星TM CCT约300兆字节的数据。遥感图像再采样中的重要问题是：

再采样的模式应简单;有足够的几何精度保证；数据组织和算法。

### (一)再采样的主要模式

1. 随机型正变换

按"三"、"四"中的模式计算一个个像元点的地理坐标。把相应像元的"灰度值"搬到相应的地理坐标位置上，形成按地理坐标分布的新文件。逐线逐像元"搬家"的结果，原等间隔排列的影像像元其"搬家"后分布在非等间隔的地理坐标位置上。同一条扫描线上的像元"搬家"后却不在同一地理坐标格网线上。结果，在地理坐标格网上"像元"分布是不规整的，一般遥感应用分析中很难使用这类文件。这里不再详细讨论。

2. 应用扫描函数、像元函数的地图化型逆变换

如前所述遥感图像经正切改正后，即将影像坐标($I$，$J$)正切改正为影像平面坐标($x$,$y$)后，使用(3)~(5)式，(13)式等，建立($x$,$y$)与地面坐标($X$，$Y$)间的变换关系式。但($x$,$y$)与($I$，$J$)间的逆变换很难找到简单的关系式。地图化逆变换是指：由一组($X$，$Y$)找出其相应的($I$，$J$)，将($I$，$J$)的"灰度值"按($X$，$Y$)的增量变化方向排列，形成新的数据文件。这个文件输出的图像在定位关系上具有影像地图的性质。

如前所述,基于卫星平台位置、姿态的变化是单调地缓慢变化这一认识出发，扫描线号应是$X$坐标的函数，即：$J=f(X)$。

以此确定地面坐标($X$, $Y$)所对应的扫描线号。为便于搜索又利用一次射影变换建立影像平面坐标($x$,$y$)与地面坐标间的近似关系，找到精度为±10个像元的近似区域，在此区域内采用最近邻内插法求得扫描线号。扫描函数由于姿态、卫星高度等因素的影响，每条扫描线的扫描函数的系数均不同。因而一景CCT若包含2400条扫描线的话,则就将有2400套系数。其关系式为(图11a):

$$y = c_1 + c_2 x \tag{18}$$

使用一次式(18)近似的中误差为±2.5m，最大误差为5m。按(18)式确定了扫描线号的基础上这条扫描线上的像元号是标准化后的$x$坐标的函数，这函数式主要是振动扫描镜及旁向倾角$\varphi$等对扫描方向影响较大而引起的。对于同一个遥感器，同一次运行期间可认为这种影响是相同的。即一景有一套系数满足一景处理的需要，其函数形式为（图11b):

$$I = g_j(X) = d_0 + d_1 X + d_2 X_2 + d_3 X_3 \tag{19}$$

其中$X$坐标要标准化处理。在已确定的扫描线内用$X$按(19)式求出相应的像元号。这种逼近方法本身的精度为±0.02像元，最大误差为±0.08像元。

3. 分小区地图化型逆变换

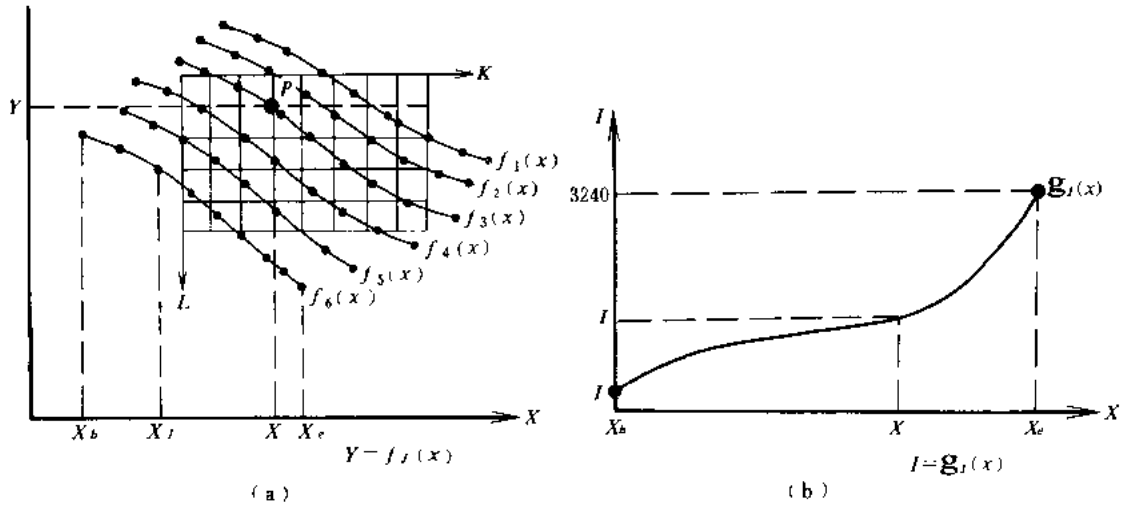



图11　像元函数,扫描线函数示意图

一景卫星遥感图像用线性变换的方式由($X$,$Y$)求得($x$,$y$)其精度是很低的,这是众所周知的。对于航空遥感图像而言，线性变换方式几乎无应用价值。对于卫星影像而言，把线性变换的范围从一景缩小到一景的若干分之一的话，线性变换的可能性是存

在的。即把一景图像按扫描线数、像元数分别等间隔地划分形成一个个的四边形作为小区，这小区每个顶点的影像坐标($I$，$J$)已知，正切改正后的影像平面坐标($x$,$y$)可求得。按"三"、"四"中的关系式即可求得每小区四个顶点的相应地面坐标($X$，$Y$)。将每小区四个顶点的($I$，$J$)与($X$，$Y$)按(20)式(航空 MSS 用)建立射影对应关系:

$$I = a_1 X + a_2 Y + a_3 \qquad J = b_1 X + b_2 Y + b_3 \tag{20}$$

在每个小区内，依最小二乘法求得$a$,$b$系数。有一组($X$，$Y$)即可按(20)式求得一组($I$，$J$)，每小区一组$a$,$b$系数，一景分成多少个小区就应有相应数的$a$,$b$系数。

间隔取多大，射影变换的精度如何，软件上如何实现是重要问题。

试验研究证明卫星 MSS CCT 的间隔为 78 条线 350 像元(图 12)。航空 MSS CCT 的间隔为 50 条线，50 个像元(图 13，系数求解按 25 条线，50 个像元)。卫星 MSS CCT 小区射影变换精度为±0.2 像元。航空 MSS 小区变换的精度为±0.12 像元。

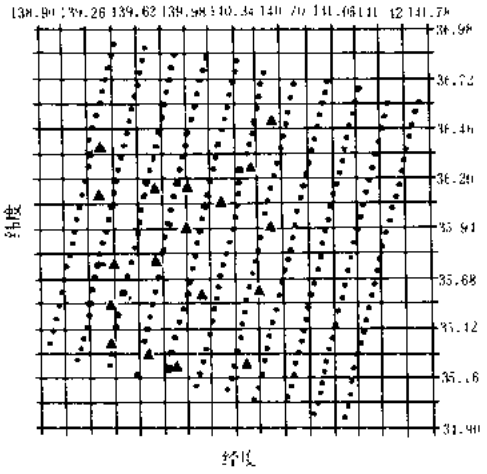



图 12

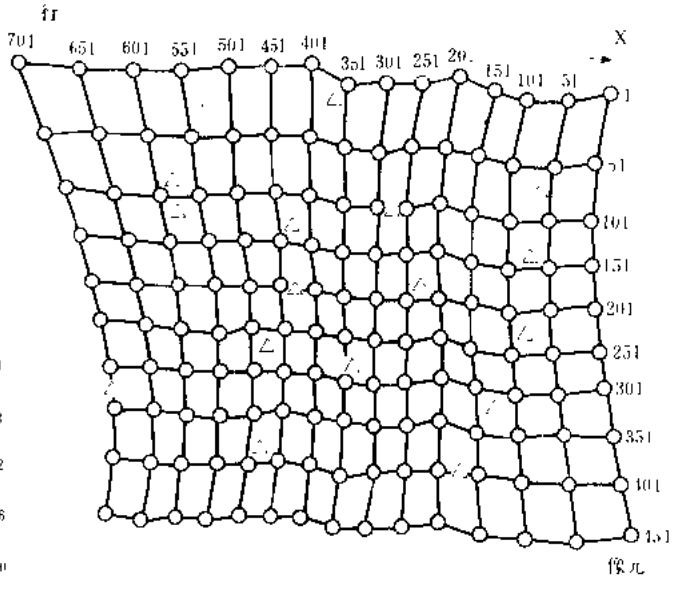



图 13

**(二)灰度值内插方法**

卫星 MSS 像元尺寸为地面上 57×79m，TM 为 30m，航空 MSS 的瞬时视场角按 3 毫弧计算，航高为 3km 时，地面尺寸为 9m。各种遥感图像分辨率相差很大。遥感图像的地图化过程中，地图坐标增量一般与遥感图像的像元地面坐标间隔不匹配。一组($X$，$Y$)对应的不一定是整数($I$，$J$)，这就存在一个灰度值的内插问题。

般有三种:

1. 三次卷积法

辛克函数的近似形式为:

$$f(x)=\frac{sinx}{x}=\begin{cases}1-2|x|^2+|x|^3 & (0\leqslant|x|<1)\\ 4-8|x|+5|x|^2-|x|^3 & (0\leqslant|x|<1)\\ 0\end{cases} \tag{21}$$

则:

$$P=\begin{bmatrix}f(y_1) & f(y_2) & f(y_3) & f(y_4)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14}\\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24}\\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34}\\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}f(x_1)\\ f(x_2)\\ f(x_3)\\ f(x_4)\end{bmatrix} \tag{22}$$

这里$x,y$是要算出的$(I, J)$周围的16个像元的坐标值:

$$x_1=1+\Delta x,\quad x_2=\Delta x,\quad x_3=1-\Delta x,\quad x_4=4-\Delta x$$
$$y_1=1+\Delta y,\quad y_2=\Delta y,\quad y_3=1-\Delta y,\quad y_4=4-\Delta y$$

$P$为所求灰度值，$\Delta x,\Delta y$为距四周四个点的$x,y$差值，$P_{ij}$为周围16个像元的灰度值。

2. 双线性内插法

公式形式为:

$$P=(1-\Delta x)(1-\Delta y)P_{ij}+(1-\Delta x)\Delta y P_{i+1,j}+(1-\Delta x)\Delta y P_{i,j+1}+\Delta x\Delta y P_{i+1,j+1} \tag{23}$$

这里$P_{ij}$为周围四个像元的灰度值。利用周围四个点的灰度内插出该点的灰度值$P$。

3. 最近邻内插

其影像坐标为:

$$I=IFIX(x+0.5),\qquad J=IFIX(y+0.5) \tag{24}$$

取用最近一像元的灰度值作为该点灰度值。

以上三种内插方法中按精度划分顺序：三次卷积法的精度最高。但双线性内插法，三次卷积法均使得原图像像元的"灰度值"与经内插得到的新的灰度值之间发生了"值"的变化，且耗费机时较多。这对于图像的细化是有必要的。后继的工序图像处理是否需要用前一工序细化的图像则要视应用分析的目的而定。作为几何处理阶段等分辨率纠正时采用最近邻内插方式内插精度足够而且耗机时少，不破坏原图像灰度值。

**(三)数据组织**

遥感图像几何处理中的难点之一是海量的数据与计算机容量之间的矛盾。如何充分利用计算机的容量于所需要数据的处理,不需要处理的数据尽可能少地进入计算机缓冲区成为重要问题。

1. 截取方法

按再采样范围的 4 个边从左至右，从上到下搜索计算 4 个边范围，将需再采样的数据放入缓冲区，暂不需要再采样的数据跳读。其计算是按(20)式或其它方法进行。这一过程由程序自动进行。一次在采样块的大小按计算机分配给的容量及再采样密度简单计算可得，若需再采样的范围很大（数据量很大）则分块由程序自动进行。

2. 以字为单位的处理方法

一般遥感图像数据是多波段数据，每个波段作一次几何纠正处理是相当耗时的。但把几个波段相同的线，像元号的数据归为"字"单位，则一次几何纠正可同时把 4 个波段一次完成。归并为"字"所耗机时相对于几何纠正而言是很少的。即把 1,2,3, 4 波段的第 i 个像元（原各占一个字节）作为一个"字"(4 个字节)，内的 4 个字节的排列。几何处理时即以这样的"字"为单位。即一次"搬家"搬走 4 个波段的数据。拆"字"运算也很简单。

3. 一维存入方法

遥感图像数据是二维数据，影像坐标与地面坐标轴一般是不平行的。二维数据进入计算机势必在数组中有相当的空数据位。这是非常浪费的。一维存入的基本方法是:

$$N = IFF(I) - ISS(I) + 1; \qquad LS(I+1) = LS(I) + N \tag{25}$$

$LS(I)$的初始值为 1;

存入一维变量中的是$LS(I)$的累加值,即按照$LS(I)(I = 1,\cdots\cdots,n)$的顺序存入;

$ISS(I)$为一条扫描线需要再采样范围左端像元号数;

$IFF(I)$为右端像元号数。

从一维数组中取出二维数据用简单方法即可进行。以上再采样的诸问题的试验研究证明，分小区地图化逆变换方式决定像元坐标以最近邻法作灰度值再采样比之于扫描函数、像元函数法机时短缩 44% 。以 M—180AD 计算机处理一景 MSS CCT 按小区地图化逆变换法需时 6 分钟。上述的数据组织可充分利用计算机容量。缩短机时。

### (四) 地学编码图像的生成

遥感图像几何粗纠正中所使用的地面控制点坐标可以是两种坐标系的坐标，一种是地理经纬度坐标系，一种是高斯克吕格直角坐标系。这两种坐标系反映在地形图上是两种标记方式。地理经纬度坐标系以经度、纬度为其坐标值。尤其中小比例尺地形图分幅均以经纬度间隔确定图幅范围。图幅 4 个角上的图廓点均标注有经纬度数值。内外图廓线间均有标注经纬度的短线标记供使用。地面控制点地面坐标读取时取用经纬度单位，再采样时的地理坐标格网即为经纬网，网点的间隔同时以经纬度单位确

定。再采样时按地形图经纬度范围为单位去分割全部采样区域，每幅地形图经纬度范围给以国际分幅号编码，输出的图像即为以一幅地形图为单位的地学编码图像。这在单景 MSS 图像精纠正中已使用经纬度坐标系，读取地面控制点坐标得到了结果(试验样片 1、2)。

地形图上另一类标注为高斯克吕格直角坐标系坐标。地形图上的公里网即是。内、外图廓间均以一定间隔注记了该公里网线高斯坐标系中的坐标值。几何精纠正中地面控制点的选取时其坐标按公里网标示的坐标读取时，即是将遥感图像纠正到高斯克吕格直角坐标系中。这种情况下的地学编码图像只能是按公里网的编码图像，为取得一幅地形图范围内的全部公里网编码图像时，则需将以地理经纬度圈定的图幅四边作与高斯克吕格直角坐标系的坐标变换，以求出图幅四边在高斯克吕格直角坐标系中的坐标值，以此作为再采样时图幅分割的边界值才能取得整幅地形图的公里网间隔的地学编码图像(试验样片 9)。

有一点值得注意的是,为了后续处理时应用的方便,在按地形图生成 DEM 时其 DEM 的格网坐标值应与几何精纠正时所用的坐标系相匹配。

## 六、遥感图像几何学研究的发展展望

遥感图像几何模式研究已取得了很大进展，为遥感图像的应用做出了贡献。尽管有些遥感图像几何模式的研究尚待深入进行，如航空 MSS 等。已往的研究有四个方面的工作尚需引起注意:

1、新型遥感器图像的几何模式研究。如：具有 71～128 波段的新型遥感器—成像光谱仪图像的几何模式研究；立体侧视雷达图像三维信息处理模式的研究等。

2、几何处理的算法研究。几何处理的数据是海量数据，数据组织及算法研究是关键。已有图像处理设备中带来的固定软件已是世界上第三流以下的软件，加强软件开发、算法研究才有可能适应遥感器的飞速发展的需要。

3、几何处理智能化研究。几何处理是遥感应用技术系统中的重要环节。目前的地面控制点选取需大量人工干预，几何定位基础极不规范，有不同比例尺等级的地形图，不同的投影面。数字摄影测量，自动制图，模式识别及人工智能成果的引进及粗差检验理论的应用是几何处理实现自动化处理,成为自动化遥感应用技术系统组成部分的关键。

4、辅助数据获取技术的研究。这方面的研究已有了良好开端，如航空遥感图像辅助数据获取系统的研究，是可以指日突破的题目。这些使航空行扫描图像的几何模式研究得到突破性进展。

以往的研究成果中使人们发现一个根本性的问题：即，由于没有遥感器的位置与姿态数据或者精度低，使得所有遥感图像的几何精处理均需要地面控制点才能完成。这里有几个问题:

1. 遥感图像的快速、适时的特点与地面控制点来源之间的矛盾。以往地面控制点只能取之于已有地形图，但地形图的制作周期一般为几年，且无能力短期循环更新。在经济发达地区，地貌及地物变化很快，已有的旧地形图不能完全反映地表实况，在地形图上选点已有困难。

2. 实测控制点已无实际意义。

3. 有些遥感图像，其几何处理需大量控制点才能达到预定精度。如航空扫描图像，几乎需要每 25 条线 25 个像元间隔一个点，这样大量的地面控制点在一般地区地形图上是选不出来的，且数量之大几乎无实用价值。

遥感器的位置与姿态数据以足够精度适时地获取是解决上述矛盾的最佳途径。实现无控制定位或需极少控制的定位，将是遥感图像对地定位技术长足进展的关键。

1972 年开始研究、1989 年开始实用、1992 年完成的 GPS 全球定位系统的出现为全球导航与定位提供了一种全时域的适时高精度系统。GPS 与 INS 惯性测量系统的复合应用技术有可能成为适时取得遥感器位置与姿态数据的高精度系统。遥感图像的几何学问题将随着对地定位技术的发展而进展到一个新阶段。与以往的研究工作相比,在研究内容、方法上都会有很大区别。智能化模式系统的研究将占很大比重，将同时推进遥感图像应用技术系统的变革，大大拓宽遥感应用的领域①。

## 参考文献

[1] 村井俊治、李树楷:“写真测量の原理に基づたLANDSAT MSS 画像の几何补正に关する研究”，写真测量とリモートセンシンゲ，Vol.22. No.4

[2] 树井俊治、前田宏:“地球资源卫星 MSSデータの几何学的补正に关する研究”，东京大学生产技术研究报告,Vol.27,No.5, 1978

[3] 林开愚等:“陆地卫星 MSS 像片在航测纠正仪上的仿射变形纠正”，测绘学报，Vol.13, No.3, 1984

[4] 前田宏：地球资源卫星 LANDSAT MSS データの地理的补正に关する研究。

① 李树楷、徐庚庆、钱育华:“遥感信息对地定位技术的变革性进展”，空间应用座谈会论文，1989年8月。

# 卫星多谱段扫描图像 MSS 的定位问题

李树楷

[摘要]:在多谱段扫描图像的利用过程中，定位问题显得愈来愈重要。如使用同一地区不同时相的多谱段扫描图像对地面某种要素的变化部分作对比分析或特征提取时，以及与其它类型图像匹配时，必须对图像作几何处理。本文对数字处理方法的研究结果作一介绍。

现有的数字方法大致可分为三类: 1. 使用数据带附带来的姿态及卫星位置数据，进行所谓系统纠正，将原始数据再采样作成新的文件。这类方法受到卫星姿态、位置等测定装置精度的支配。测定装置的精度约在 0.01° 左右。其相应于地面的绝对误差，考虑到多种因素的共同影响，可达千米左右。2. 使用地面控制点的纠正方法。这类方法多使用多项式等数学模式，依据地面控制点求得地面坐标与影像坐标之间变换关系式的系数，逐点进行纠正。对扫描图像采样时的几何关系未予顾及。其精度取决于地面控制点的精度、个数及分布情况。尤其当控制点多时，在每个控制点上的剩余误差分布不均，图像最弱部分的误差较大。所使用的是三次以上多项式。由于未顾及采样时的几何关系，也有称此法为黑盒子方法。3. 上述两种方法合二为一的方法。即首先用第一种方法将图像进行一次系统纠正，尔后使用地面控制点求取已系统纠正过的图像与地面坐标之间的多项式系数。也就是说分两个步骤作业。这种方法对于上述两种方法而言有其优点:(1)保证了足够精度,即纠正后图像位置的中误差在±1 像元以内。(2)使用仿一次式即可，减少了最后再采样时的机时。(3)地面控制点数以一幅范围而言可减少至十个左右。缺点在于分成两步作业。

本文从扫描图像采样时的几何特征入手，探求扫描图像与中心投影影像之间在几何特征上的异同点，利用其共同点将扫描图象移嫁到一个假设中心投影系统中去，最后实现以共线条件式为基础，以多项式描述其变化的数学模式。

## 一、数学模式

卫星多谱段扫描图像的几何特性相对于中心投影的像片而言有很大的区别。以 2、3 号卫星为例每次扫描是以六根扫描线为一组进行的，也就是说每次扫描是以卫星行进方向的六个像元为一排连续进行的。严格说来每一排六个像元与相邻的一排六个像元之间存在着扫描时间间隔。应该说卫星的位置、姿态（航测中称之为方位元素,以下通称为方位元素)参数也是随时在变化着。即方位元素的变化是时间的函数。

假定以一条扫描线的时间间隔作为卫星姿态变化的最小时间单位，那么一幅卫星像片是由约 390 个方位元素随时间变化的单位组成，即相当于由约 390 张方位元素不同的小的中心投影的狭长像片组成。这样的一幅卫星图像与一张中心投影的航空像片具有一组方位元素的情况显然是不同的。

扫描图像与中心投影像片的第二个不同点在于扫描图像点与地面被采样范围之间在采样过程中不存在共线条件这种数学关系。卫星 MSS 图像数据是定时记录的；摆

动扫描镜是不等速运动的。MSS 图像没有实际存在的投影中心和焦距。因此卫星 MSS 图像与地面点之间的数学关系不能直接应用共线条件式。其中摆动扫描镜不等速运动(不等速采样) 对像元移位的影响甚至达 5 个像元之多(表 1)。

扫描图像与中心投影像片的共同点在于采样时是借助于电磁波直线传播特性（光本身是一种电磁波)。像片的黑度值和磁带中所记录的电磁波能量的数据均相应于地面对象物的电磁波特性。且扫描图像在扫描方向上相似于投影的几何特征。据此，依从理想状态到实际状态的顺序来建立扫描图像与地面采样点之间的数学模式。

1、理想扫描状态下的数学模型

如图 1 所示，对目标反射光谱能量的接收是以一个瞬时采样角 $\Delta\theta$ 的范围为单位进行的。其反射光谱经扫描反射镜(图 2) 进入系统后由分光系统分光到达 24 个接收元件①。假定传感器平台平面是铅直方向的，且摆动扫描镜是等角速度地扫描收集数据，地面是水平面这种理想状态。

导入假定投影中心 O 和投影主距$f$,设定接收元件分布于一个以 O 为圆心，以$f$为半径的圆弧面$P-P$上，每个微小瞬时采样角 $\Delta\theta$ 或 $\Delta\delta$ 都对应于圆弧断面线$P-P$上的一个图像点。圆弧断面上 O′点是一条扫描线的中央像元(或中心位置)。以圆弧断面线的方向作为$I$坐标方向，各中央像元(一个扫描带内)连线方向为$J$坐标方向。由$I$，$J$坐标轴组成的坐标系统称之为影像坐标系(见图 3)。$I$坐标单位为像元，$J$坐标单位为线。图 1 中过中央像元连线作圆弧面的切面，过 O′点的圆弧断面与此平面的交线$P_1P_1$应与水平面平行且与 OO′垂直。在切面内过 O′与$P_1P_1$垂直的方向为$x-x$方向，$P_1P_1$为$y-y$方向。将此切面作为假定水平面。

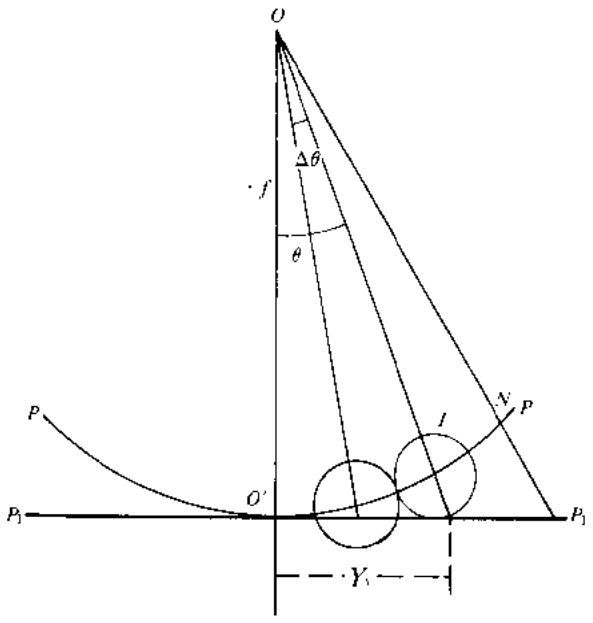



图 1　采样断面

①本文以2，3号卫星4个波段为例，下同。

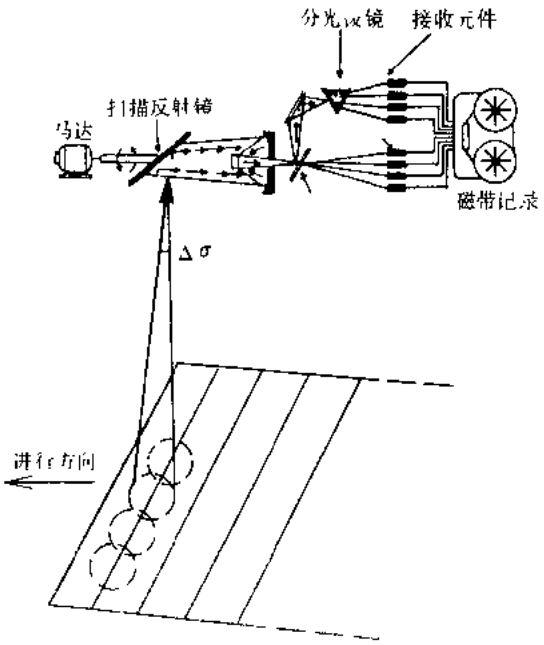



图 2　MSS 光路图

由$x-x$与$y-y$构成的坐标系统称之为似平面坐标系(图 3)。任一像元的似平面坐标系坐标值取下述形式:

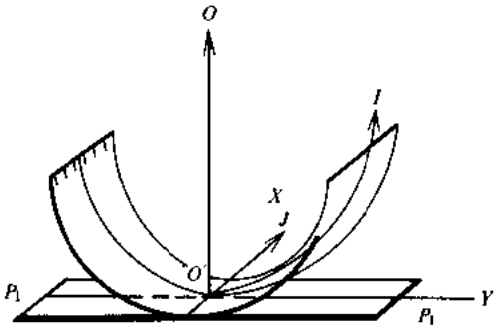



图 3　坐标系

$$\begin{cases} y = f \cdot \tan\theta \\ x = f \cdot \tan(ML \cdot \Delta\delta) \end{cases} \tag{1}$$

这里$\theta = (I-(N+1)/2) \cdot \Delta\theta$,即$y$方向视野角

$ML = MOD(J-1,6)+1$

$\Delta\theta$: 扫描方向瞬时采样角

$\Delta\delta$: 卫星前进方向瞬时采样角

$N$: 一根扫描线的总像元数

$I$: 像元坐标数

$J$: 扫描坐标数

上述过程，实际上是个正切改正过程。经过此项改正的影像点的似平面坐标类似

于中心投影像片的像片坐标。这里的拟平面坐标系是建立在一个扫描带范围内。O′点位于中央一排像元的中央，同时是O点的垂足。$f$的值取$1/\Delta\theta$。

2．采样不等速情况下的关系式

航空多谱段扫描仪的扫描反射镜是旋转式的，而卫星多谱段扫描仪是摆动式的，存在有迟滞和超前现象，造成扫描不等速。与影像相应的地面采样范围将产生疏露和挤压现象。不考虑采样重叠度的情况下最大可产生约5个像元的变形移位（如第4点$y$方向的移位量为5.08像元）。这是必须考虑的(表1)。如图4所示，$P-P$断面上是等时间间隔记录的如$A$，$B$，…像元，不存在扫描不等速时其中$A$相当于地面$PN$，在扫描不等速的情况下，$A$实际上是$P_i$点的光谱能量记录值。与$O$，$P_i$两点满足共线条件式的$P-P$断面上的影像坐标应是$A'$点（像元）。实际上$A'$像元在CCT带中是不存在的,换言之，$P_i$点在影像坐标系的正确点位应是$A'$而不是$A$。按图4将（1）式加以改化为下述形式:

$$\begin{cases} y = f \cdot \tan(\theta + v) \\ x = f \cdot \tan(ML \cdot \Delta\delta) \end{cases} \tag{2}$$

这里$v$为采样不等速引起的视野角的变化，类似于中心投影像片的镜头畸变及感光材料伸缩不均误差。

表1　扫描镜不等速的影响

| (MM=17 JJ=9) | X | Y |
|---|---|---|
| | (IMAGE ERROR:PIXEL) | |
| 1 | −0.234 634 5E+00 | −0.792 384 7E−01 |
| 2 | 0.611 293 1E−01 | 0.266 403 4E+01 |
| 3 | −0.843 597 6E+00 | −0.455 560 9E+01 |
| 4 | 0.122 626 3E+01 | 0.508 143 5E+01 |
| 5 | 0.818 121 8E+00 | 0.497 992 2E+01 |
| 6 | 0.154 001 8E+00 | 0.267 220 6E+01 |
| 7 | −0.251 171 6E+00 | 0.225 730 5E+00 |
| 8 | −0.656 845 6E+00 | −0.131 397 3E+01 |
| 9 | 0.507 639 2E+00 | 0.833 729 8E+00 |
| 10 | 0.224 207 9E+00 | 0.243 168 4E+01 |
| 11 | −0.676 803 8E+00 | −0.255 781 5E+01 |
| 12 | −0,841 118 8E+00 | −0.336 620 3E+01 |
| 13 | −0.304 629 7E+00 | −0.319 658 1E+01 |
| 14 | −0.111 889 1E+00 | −0.393 739 0E+01 |
| 15 | 0.451 408 1E+00 | 0.921 106 6E+00 |
| 16 | 0.659 091 6E+00 | 0.160 808 2E+01 |
| 17 | −0.248 430 3E+00 | −0.225 590 8E+01 |
| 18 | −0.776 704 4E+00 | 0.503 448 0E−02 |
| 19 | 0.844 810 4E+00 | −0.161 101 5E+00 |
| 20 | 0.678 566 8E+00 | −0.144 221 5E+01 |
| XX=SQRT(X/NM) | YY=SQRT(Y/NM) | W3 |
| 0.613 102 2E−00 | 0.272 239 1E+01 | 0.166 744 6E+01 |

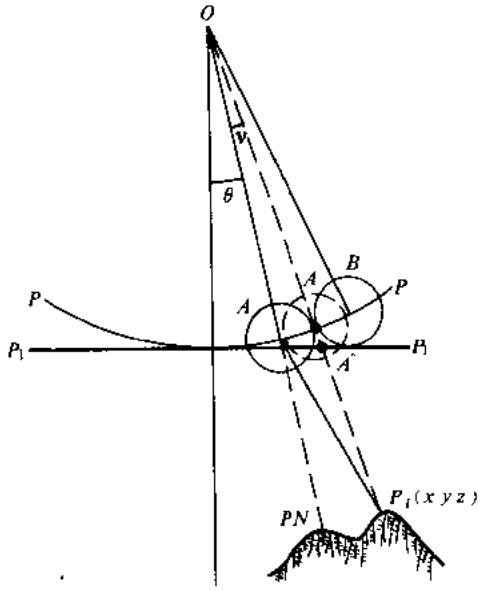



图 4　扫描不等速的现象

一般说来，视野角的变化角 $v$ 在一个扫描断面里是像元数$I$坐标的函数。对于同一台转感器在一次使用期间可认为函数是固定的。2、3 号卫星的情况可用:

$$v = a_1 \cdot I \cdot (I - N/2) \cdot (I - N) \tag{3}$$

或用一个三次多项式来描述:

$$v = a_0 + a_1 \cdot I + a_2 I^2 + a_3 I^3 \tag{4}$$

4 号卫星可用下式来描述其变化规律:

$$v = 2sin^{-1}(A sin W(t_0 + (I-1)t)) \tag{5}$$

其中:

$A$: 正弦函数曲线摆动幅度

$W$: 扫描镜的角速度

$t_0$: 扫描开始时间

$t$: 采样时间

(3) 式表达的是一对称图形。(4) 式的$a_0, a_1, a_2, a_3$以及 (5) 式的$A$，$W$，$t_0$，$t$均在磁带的注解数据中给出。

3、存在三轴倾斜情况下的关系式

似平面$P_1 - P_1$实际上由于存在传感器平台的三轴倾斜不可能是水平面。一般地说，传感器平台在卫星行进过程中是缓慢地单调地变化着其姿态。

如前所述 (参看图 4)，从地面点$P_i$ ($X$，$Y$，$Z$) 入射的光线在似平面$P_1 - P_1$上的投影具有一组似平面坐标值。在扫描不等速所引起的误差改正之后 (成为$A''$点)，似平面上的$A''$点与地面点$P_i$以及假定投影中心 O 之间满足共线条件式。存在三轴倾斜的条件下，共线条件式将具有下述形式:

$$\begin{cases} x = -f\dfrac{a_1(X-X_0)+b_1(Y-Y_0)+c_1(Z-Z_0)}{a_3(X-X_0)+b_3(Y-Y_0)+c_3(Z-Z_0)} \\ y = -f\dfrac{a_2(X-X_0)+b_2(Y-Y_0)+c_2(Z-Z_0)}{a_3(X-X_0)+b_3(Y-Y_0)+c_3(Z-Z_0)} \end{cases} \tag{6}$$

这里$x$，$y$为地面点的似平面坐标；$X_0$,$Y_0$,$Z_0$是假定投影中心O的坐标；$X$,$Y$,$Z$是地面点坐标，$f$为假定投影主距。

若给出$Z$，上式的逆变换也成立。

$$\begin{cases} X = (Z-Z_0)\dfrac{a_1y+b_1x-c_1f}{a_3y+b_3x-c_3f}+X_0 \\ Y = (Z-Z_0)\dfrac{a_2y+b_2x-c_2f}{a_3y+b_3x-c_3f}+Y_0 \end{cases} \tag{7}$$

其方向系数具有下述形式：

$$R=\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} cos\varphi & 0 & -sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ sin\varphi & 0 & cos\varphi \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\omega & -sin\omega \\ 0 & sin\omega & cos\omega \end{bmatrix}\begin{bmatrix} cos\kappa & -sin\kappa & 0 \\ sin\kappa & cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

(8)式中$\varphi$，$\omega$，$\kappa$是三个角方位元素，$X_0$,$Y_0$,$Z_0$为三个线方位元素。$f$以及前述的$v$为内方位元素。如前所述，在一个扫描带的范围里，通过正切改正，视野角的改正(v)以及三轴倾斜改正之后，MSS影像坐标与地面坐标之间数学关系与理想情况下中心投影的航空像片与地面的简单数学关系就完全一样。不同扫描带的方位元素值是不同的。外方位元素的概略值以多项式的系数和不同的时间点的值的形式记录在CCT带的注解数据中。1983年9月以前的NASDA的CCT的BIL格式磁带中记录着外方位角元素的三次式系数值和卫星高度的一次式系数值。BIP2格式的磁带中记录着9个点的卫星高度及外方位角元素的三次式系数值。9个点的间隔是从图像中心点起算每隔3.45075秒记录一个点。换算成的扫描带数为47个(表2)。同时从图像中心时刻起算每隔5秒记录一个点，共有11个点的经纬度和卫星高度的记录值。图像中心所在扫描带以第195条作起点的话，那么上下每隔68.35扫描带一个记录点。一张卫星图像(1／100万卫星像片)，按390条扫描带计，则11个点中只有5个点包含在这幅卫星图像内。

由表2可以看出外方位元素是扫描时间的函数。MSS CCT带数据记录是等时间间隔的，即等时间段内所记录的扫描带数是相等的。因此，外方位元素是扫描带数的函数。即：

$$\varphi = F(L) \tag{9}$$

表 2　九点数据的输出

| | | |
|---|---|---|
| ALTITUDE (N.M.132) AT TIME OF IMAGE CENTER | −13.803 00 SEC | 15 879 918.997 070 KM |
| | −10.35225 SEC | 15 879 918.997 070 KM |
| | −6.90150 SEC | 15 879 918.997 070 KM |
| | −3.45075 SEC | 15 878 918.939 209 KM |
| | 0.00000 SEC | 15 878 918.939 209 KM |
| | +3.45075 SEC | 15 878 918.939 209 KM |
| | +6.90150 SEC | 15 877 918.881 348 KM |
| | +10.35225 SEC | 15 877 918.881 348 KM |
| | +13.80300 SEC | 15 877 918.881 348 KM |
| ROLL AT IMAGE CENTER | −13.803 00 SEC | −0.010 643 01 |
| | −10.352 25 SEC | −0.010 574 34 |
| | −6.901 50 SEC | −0.010 513 31 |
| | −3.450 75 SEC | −0.010 482 79 |
| | 0.00000 SEC | −0.010 459 90 |
| | +3.450 75 SEC | −0.010 459 90 |
| | +6.901 50 SEC | −0.010 482 79 |
| | +10.352 25 SEC | −0.010 528 56 |
| | +13.803 00 SEC | −0.010 597 23 |
| PITCH AT IMAGE CENTER | −13.803 00 SEC | 0.000 411 99 |
| | −10.352 25 SEC | 0.000 152 59 |
| | −6.901 50 SEC | 0.000 015 26 |
| | −3.450 75 SEC | 0.000 055 89 |
| | 0.0000 SEC | 0.0 |
| | +3.450 75 SEC | 0.000 061 04 |
| | −6.901 50 SEC | 0.000 122 07 |
| | +10.35 225 SEC | 0.000 167 85 |
| | +13.803 00 SEC | 0.000 152 59 |
| YAW AT IMAGE CENTER | −13.803 00 SEC | 0.012 229 92 |
| | −10.352 25 SEC | 0.012 146 00 |
| | −6.901 50 SEC | 0.012 084 96 |
| | −3.450 75 SEC | 0.012 046 81 |
| | 0.0000 SEC | 0.012 023 93 |
| | +3.450 75 SEC | 0.012 023 93 |
| | +6.901 50 SEC | 0.012 046 81 |
| | +10.352 25 SEC | 0.012 100 22 |
| | +13.803 00 SEC | 0.012 176 51 |

将表 2 数据用最小二乘法分别求一次式，二次式，三次式及四次多项式的系数，以所求多项式系数分别代入相应的一次式，二次式……中去，再带入 9 个点各自的扫描带号求所建多项式的逼真度，采用中误差的方式评定几次多项式的逼近精度。表 3 是计算卫星高度的表达式（一次式）的例子。

表3 高度计算

| | IN DATA (KM) |
|---|---|
| 0.700 000 0D+01 | 0.918 997 1D+03 |
| 0.540 000 0D+02 | 0.918 997 1D+03 |
| 0.101 000 0D+03 | 0.918 997 1D+03 |
| 0.148 000 0D+03 | 0.918 939 2D+03 |
| 0.195 000 0D+03 | 0.918 939 2D+03 |
| 0.242 000 0D+03 | 0.918 939 2D+03 |
| 0.289 000 0D+03 | 0.918 881 3D+03 |
| 0.336 000 0D+03 | 0.918 881 3D+03 |
| 0.383 000 0D+03 | 0.918 881 3D+03 |

$$A_5 \times X^4 + A_4 \times X^3 + A_3 \times X^2 + A_2 \times X + A_1$$

| $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |
|---|---|---|
| 0.919 011 2D+03 | −0.369 327 6D−03 | 0.169 499 8D−16 |
| 0.700 000 0D+01 | 0.918 997 1D+03 | −0.115 722 8D−16 |
| 0.540 000 0D+03 | 0.918 997 1D+03 | 0.578 613 7D−01 |
| 0.101 000 0D+03 | 0.918 997 1D+03 | 0.231 445 3D−02 |
| 0.148 000 0D+03 | 0.918 939 2D+03 | −0.173 584 3D−01 |
| 0.195 000 0D+03 | 0.918 939 2D+03 | 0.454 747 0D−01 |
| 0.242 000 0D+03 | 0.918 939 2D+03 | 0.173 584 4D−12 |
| 0.289 000 0D+03 | 0.918 881 3D+03 | −0.321 445 0D−01 |
| 0.336 000 0D+03 | 0.918 881 3D+03 | −0.578 613 3D−01 |
| 0.383 000 0D+03 | 0.918 881 3D+03 | 0.115 722 3D−02 |
| MEDIAN ERROR | 0.123 413 8D−01 | 7D−01 |

由计算结果看出，卫星高度用扫描带号的一次式函数、$\varphi$(PITCH)，$\omega$(ROLL)，$\kappa$（YAW）用扫描带号的三次多项式函数表达时其逼近精度较好（例子略）。实际上卫星的行进较之飞机是相当地平稳，其位置、姿态的变化是缓慢地单调地变化。$X_0, Y_0$的变化用一次式描述是可行的。$\varphi$，$\omega$，$\kappa$用三次多项式可描述其变化轨迹。即:

$$\begin{cases} X_0 = A_1 + B_1 L \\ Y_0 = A_2 + B_2 L \\ Z_0 = A_3 + A_3 L \\ \varphi = A_4 + B_4 L + C_4 L^2 + D_4 L^3 \\ \omega = A_5 + B_5 L + C_5 L^2 + D_5 L^3 \\ \kappa = A_6 + B_6 L + C_6 L^2 + D_6 L^3 \end{cases} \tag{10}$$

这里$A_i, B_i, C_i, D_i$为多项式待定系数，$L$为扫描带号。

图5是一张卫星图像（1／100万）外方位元素的变化图。

(3)式和(10)式共计有 19 个未知量,要求得这 7 个多项式的 19 个系数,至少需要 10 个已知地面控制点。假若把 (3) 式，即不等速扫描而引起的视野误差角$v$的函数表达式，作为有别于外方位元素的量来考虑的话，则未知数有 18 个，至少要 9 个以上地面控制点才能解得这些系数。

## 二、解　法

(6),(8),(10) 式组合成一个复杂函数式形式，将(2)式的值代替(6)式中的$x,y$，组成观测方程式:

$$\begin{cases} f\cdot tan(ML\cdot\Delta\delta)+f\cdot\dfrac{a_1(X-X_0)+b_1(Y-Y_0)+C_1(Z-Z_0)}{a_3(X-X_0)+b_3(Y-Y_0)+C_3(Z-Z_0)} \\ f\cdot tan(\theta+v)+f\cdot\dfrac{a_2(X-X_0)+b_2(Y-Y_0)+C_2(Z-Z_0)}{a_3(X-X_0)+b_3(Y-Y_0)+C_3(Z-Z_0)} \end{cases} \tag{11}$$

把(11)式台劳线性展开，把$f\cdot tan(ML\cdot\Delta\delta)$作为$x$，取$f\cdot tan(\theta+v)$作为$y$，(6)式的$x$ 代替以 $(x)$、$y$ 代替以 $(y)$，则得出下述误差方程式:

$$\begin{cases} V_x=(x)-x+\dfrac{\partial x}{\partial X_0}\Delta X_0+\dfrac{\partial x}{\partial Y_0}\Delta Y_0+\dfrac{\partial x}{\partial Z_0}\Delta Z_0+\dfrac{\partial x}{\partial\varphi}\Delta\varphi+\dfrac{\partial x}{\partial\omega}\Delta\omega+\dfrac{\partial x}{\partial\kappa}\Delta\kappa \\ V_y=(y)-y+\dfrac{\partial y}{\partial X_0}\Delta X_0+\dfrac{\partial y}{\partial Y_0}\Delta Y_0+\dfrac{\partial y}{\partial Z_0}\Delta Z_0+\dfrac{\partial y}{\partial\varphi}\Delta\varphi+\dfrac{\partial y}{\partial\omega}\Delta\omega+\dfrac{\partial y}{\partial\kappa}\Delta\kappa \end{cases} \tag{12}$$

(12)式各偏微分的表达式为:

$$a_{11}=\frac{\partial x}{\partial X_0}=\frac{1}{Z}(a_1f+a_3x)$$

$$a_{12}=\frac{\partial x}{\partial Y_0}=\frac{1}{Z}(b_1f+b_3x)$$

$$a_{13}=\frac{\partial x}{\partial Z_0}=\frac{1}{Z}(c_1f+c_3x)$$

$$a_{14}=\frac{\partial x}{\partial\varphi}=ysin\omega-[\frac{x}{f}(xcos\kappa-ysin\kappa)+f\cdot cos\kappa]cos\omega$$

$$a_{15}=\frac{\partial x}{\partial\omega}=-f\cdot sin\kappa-\frac{x}{f}(x\cdot sin\kappa+ycos\kappa)$$

$$a_{16}=\frac{\partial x}{\partial\kappa}=y$$

$$a_{21}=\frac{\partial y}{\partial X_0}=\frac{1}{Z}(a_2f+a_3y)$$

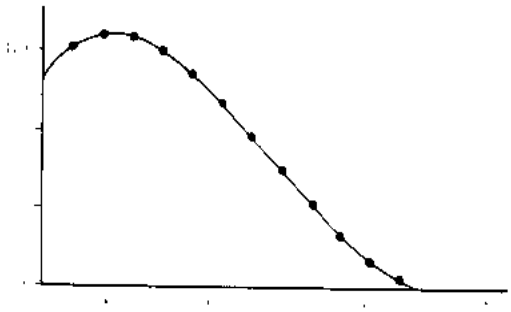
$$a_{22}=\frac{\partial y}{\partial Y_0}=\frac{1}{Z}(b_2+b_3y)$$

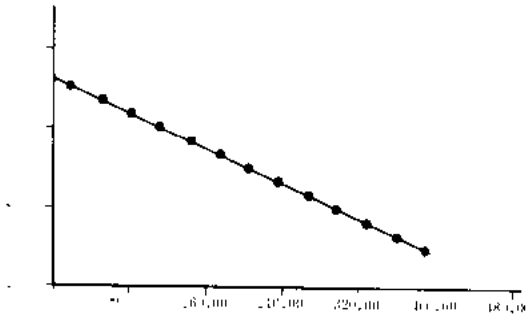
$$a_{23}=\frac{\partial y}{\partial Z_0}=\frac{1}{Z}(c_2+c_3y)$$

$$a_{24}=\frac{\partial y}{\partial\varphi}=-xsin\omega-[\frac{y}{f}(xcos\kappa-ysin\kappa)-f\cdot sin\kappa]cos\omega$$

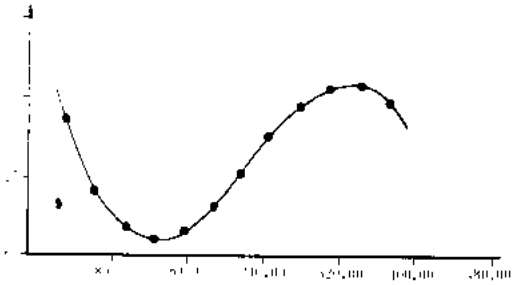
$$a_{25}=\frac{\partial y}{\partial \omega}=-f\cdot cos\kappa-\frac{y}{f}\ (xsin\kappa+ycos\kappa)$$

$$a_{26}=\frac{\partial y}{\partial \kappa}=-x$$

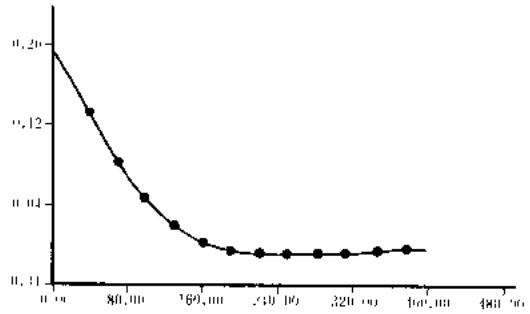




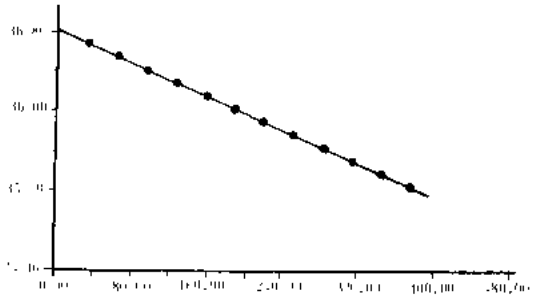
（b）卫星高度的变化



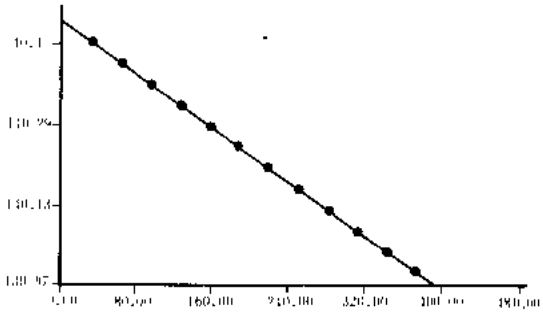
（c）ω的变化



（d）κ的变化



（e）纬度的变化



（f）经度的变化

图5 方位元素随扫描带号的变化图

其中$Z=a_3(X-X_0)+b_3(Y-Y_0)+c_3(Z-Z_0)$。把（10）式各表达式代入(12) 式及以上各式即得出以地面控制点的地面坐标、似平面坐标、扫描带号、像元号等已知数据和（10）式的多项式系数$A_i,B_i,C_i,D_i$等未知数表示的误差方程式。

由于台劳线性展开是在初始值附近展开的，求解时采用最小二乘法逐次迭代计算。分下列两步进行。

1、初始值的输入

(1) $X_0,Y_0,Z_0,\varphi,\omega,\kappa$的输入

BIL 格式的 CCT 带中仅有$\varphi$，$\omega$、$\kappa$的三次式的系数和卫星高度的一次式系数的概值，卫星的$X_0,Y_0$数据可由下式近似求取:

$$\begin{cases} X_0=X-\dfrac{a_1y+b_1x-c_1f}{a_3y+b_3x-c_3f}(Z-Z_0) \\ Y_0=Y-\dfrac{a_2y+b_2x-c_2f}{a_3y+b_3x-c_3f}(Z-Z_0) \end{cases}$$

将$X_0,Y_0$按控制点的扫描带号用最小二乘法逼近的方法求出$X_0,Y_0$一次式表达式的系数连同$\varphi$，$\omega$，$\kappa$的三次系数及$Z_0$的一次式系数一起作为初始值输入。BSQ 格式的这方面内容与 BIL 格式完全相同。BIP2 格式 CCT 带中附带来的数据，直接取用注解数据输出（宽打）中的一次式和三次式系数作为$X_0,Y_0,Z_0\varphi$，$\omega$，$\kappa$的初始值输入。

(2) 不等速扫描而引起的视野角变化角$v$的输入

这个数值在 1983 年 9 月以后的 2，3 号卫星的注解数据中以三次式系数的形式记录着，老格式 CCT 中没有这些数据，可利用室内对扫描镜的检定结果作为初始值输入。前者称为新格式，其数学模式如下:

$$v=\frac{M_a}{N}Y+K_0+K_1Y+K_2Y^2+K_3Y^3$$

$$Y=I-\frac{N+1}{2}$$

$M_a$:最大扫描角;

$N$:一条扫描线的像元数;

$I$: 点$P$的像元号;

$K_0,K_1,K_2,K_3$为扫描镜模型系数。

第四号卫星，即 LANDSAT—D 给出的是下述数学模型:

$$v=2sin^{-1}[AsinW(t_0+(P_s-1)t)]$$

本研究中的实验部分使用的是老格式的 BIL，所以采用(4)式的模式。

(3) 假定投影主距$f$的设定

$f$的值可取适当值赋予。本研究中取$f=1/\Delta\theta$（m），换言之，相当于瞬时采样角的弧长为 1m 时的圆的半径。

(4) 地面控制点数据的输入

地面控制点数据的输入首先从 CCT 带的影像输出的图像上（1／100 万）选取分布均匀且可能是易准确判读的控制点位。尔后根据其大致的线号和像元号将以此为中心上下左右各 60 线，60 像元的正方形影像坐标的图像数据在宽行打印机上作浓淡色调输出，在这样的具有灰度等级的输出图像上选择能够准确读取像元号、线号同时在地图上也易判读其准确位置的点。在地图上以秒精度读取地面控制点的经纬度。本研究的实验中使用 1／2.5 万比例尺地形图。在灰度等级的输出图像上读取地面控制点的线号、像元号及在地形图上读取地面控制点的坐标，是一项认真细致的工作，包括点位选择的好坏对定向精度均有直接影响。

2、求解步骤

(1) 将$X_0$,$Y_0$,$Z_0$、$\varphi$，$\omega$，$\kappa$ 及 $v$的一次式系数的近似值输入（4）式、（10）式,计算上述 7 个多项式的初始值。

(2) 把地面控制点的扫描带号、扫描线号、像元号代入(2)式求出似平面坐标 $x$，$y$，再利用（8）式、（12）式求各方向系数进而求出偏微分值。利用地面控制点坐标（6）式解算得似平面坐标计算值（$x$），（$y$），求得误差方程式的常数项。

(3) 用最小二乘原理逐次迭代趋近求出各系数的收敛解。

## 三、实验结果及其分析

实验取用 20 个控制点求算一幅卫星图像（1／100 万卫星像片的范围）的方位元素系数的收敛解。为了验证方法的理论基础的实用性及控制布点方案的合理性，将 20 个点分成十一组。参加平差计算的点数为 10 点,则其余 10 点作检查点；参加平差计算的点数为 11 点，则其余 9 点作检查点。其余类推。其结果列于表 4。

由表 4 可知在参加平差的控制点上以及作为检查点用的控制点上，逐次迭代趋近计算的结果，剩余误差的中误差在 ± 1 像元以内。

表 5 是说明逐次迭代趋近计算所需要的迭代计算次数。由表 5 可知迭代三次到四次已足够，更多的迭代次数已无意义。

平差计算中扫描不等速引起的视角变化 $v$ 采用(3)式和(4)式的收敛计算结果如下:

| | X 方向中误差 | Y 方向中误差 | 位置中误差 |
|---|---|---|---|
| | (单位:像元) | | |
| 1 | 0.605 319 1D+00 | 0.705 701 8D+00 | 0.655 510 4D+00 |
| 2 | 0.605 675 0D+00 | 0.470 268 9D+00 | 0.537 972 0D+00 |

其中 1 的部分是采用(3)式，2 的部分是采用(4)式计算的结果。由上列数据可知，(4)式的结果较(3)式稍好些。采用(4)式计算时，飞行方向与地面坐标轴间的夹角取用名义卫星轨道倾角(99.144 °),或用 90 ° 角均可得到满意收敛结果。(3)式情况下，只有取用实际轨道倾角时才能获得好的收敛结果。而实际轨道倾角的求得是比较麻烦的事情(实际幅的实际轨道倾角为 100.71077 °)。(3)式是固定函数图形，(4)式相对于(3)式

而言可塑性较强。现将(3)式和(4)式的结果分别以曲线示于图 6。

表 4　不同控制点数情况下几何纠正的精度

| 参加平差计算的点数 | | | 9 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 参加平差计算的点数 | 扫描方向的误差 ΔY | 1 像元以上的点数 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | | 1 像元以下的点数 | 9 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 18 | 19 |
| | | 最大误差(像元) | −0.6 | −0.6 | −0.6 | −0.6 | −0.6 | −0.6 | −0.6 | −0.7 | +0.9 | +1.2 | +1.2 |
| | | 中误差(像元) | ±0.4 | ±0.3 | ±0.3 | ±0.3 | ±0.3 | ±0.3 | ±0.3 | ±0.4 | ±0.4 | ±0.5 | ±0.5 |
| | 卫星行进方向的误差 ΔX | 1 像元以上的点数 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| | | 1 像元以下的点数 | 8 | 10 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 16 | 16 | 18 | 19 |
| | | 最大误差(像元) | +1.3 | +1.2 | +1.0 | −1.0 | +1.0 | +1.0 | +1.0 | +1.1 | +1.1 | +1.2 | +1.2 |
| | | 中误差(像元) | ±0.5 | ±0.6 | ±0.6 | ±0.6 | ±0.6 | ±0.6 | ±0.6 | ±0.6 | ±0.6 | ±0.6 | ±0.6 |
| 未参加平差计算的点数，作检查 | 扫描方向的误差 ΔY | 1 像元以上的点数 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | |
| | | 1 像元以下的点数 | 11 | 8 | 7 | 5 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | |
| | | 最大误差(像元) | +0.7 | +0.9 | +1.4 | +1.4 | +1.4 | +1.3 | +1.4 | +1.4 | +1.3 | +0.3 | |
| | | 中误差(像元) | ±0.5 | ±0.7 | ±0.7 | ±0.8 | ±0.8 | ±0.9 | ±0.9 | ±0.9 | ±0.9 | ±0.3 | |
| | 卫星行进方向的误差 ΔX | 1 像元以上的点数 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | |
| | | 1 像元以下的点数 | 8 | 6 | 6 | 5 | 4 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | |
| | | 最大误差(像元) | +1.4 | +1.4 | +1.3 | +1.3 | +1.2 | +1.2 | +1.1 | +1.1 | +1.3 | +0.7 | |
| | | 中误差(像元) | ±0.8 | ±0.9 | ±0.7 | ±0.8 | ±0.8 | ±0.6 | ±0.8 | ±0.8 | ±1.1 | ±0.7 | |
| 总点数 | | | 20 | | | | | | | | | | |

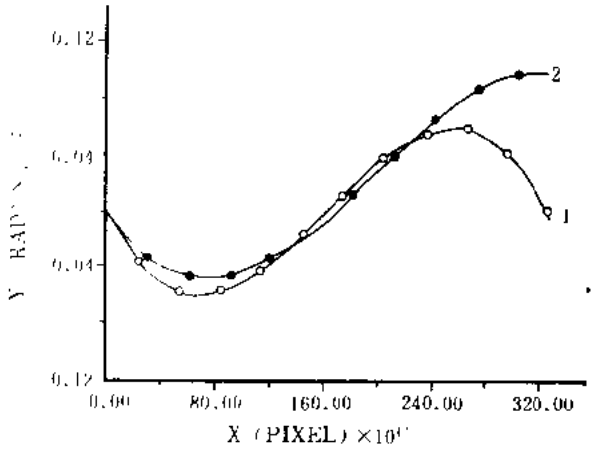



图 6　　扫描镜速度变化

图 6 中曲线 1 是(3)式的图形，曲线 2 是(4)式的图形。由图 6 可知，曲线 2 从 2200 像元处开始发散，这是由于控制点的分布未及像片边缘所引起的。这在外插计

算中将产生较大的误差。选点时注意到均匀分布满幅时即可避免。1，2 曲线的控制基础完全相同。由于(3)式有上述角度限制，作者认为取用(4)式较易得到满意收敛结果。

表 5　确定趋近次数

| 趋近次数 | 卫星行进方向 像元中误差 (像元) | 卫星行进方向 坐标中误差 (米) | 扫描方向像元中误差(像元) | 扫描方向坐标中误差(米) | 位置坐标中误差(米) | 参加平差的方位元素 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 纠正前 | 31.556 | | 132.556 | | | |
| 1 | ±0.580 | ±32.184 | ±0.444 | ±50.550 | ±42.374 | |
| 2 | ±0.580 | ±32.146 | ±0.349 | ±20.214 | ±26.851 | |
| 3 | ±0.580 | ±32.139 | ±0.347 | ±19.928 | ±26.482 | $X_0,Y_0,Z_0$ |
| 4 | ±0.580 | ±32.139 | ±0.347 | ±19.202 | ±26.473 | $\varphi,\omega,\kappa,v$ |
| 5 | ±0.580 | ±32.139 | ±0.347 | ±19.201 | ±24.472 | |
| 6 | ±0.580 | ±32.139 | ±0.347 | ±19.201 | ±24.472 | |
| 7 | ±0.580 | ±32.139 | ±0.347 | ±19.201 | ±24.472 | |

卫星高度约 920km。扫描视场角 11° 左右，且卫星的姿态、飞行速度的变化较之飞机要小得多。因而具有航空摄影中近似铅垂摄影的性质。即$\varphi$，$\omega$，$\kappa$的近似值可以取为 0。这样 CCT 的注解数据中，只要有卫星高度的概值即可进行收敛计算。试验结果如下:

| | X 方向中误差 | Y 方向中误差 | 位置中误差 |
|---|---|---|---|
| | (单位:像元) | | |
| 1 | 0.604 935 6D+00 | 0.468 879 2D+00 | 0.536 907 4D+00 |
| 2 | 0.605 675 0D+00 | 0.470 266 8D+00 | 0.537 970 9D+00 |
| | (单位:米) | | |
| 1 | 0.480 943 6E+02 | 0.268 963 1D+02 | 0.389 646 0D+02 |
| 2 | 0.479 587 6E+02 | 0.268 633 5D+02 | 0.388 695 4D+02 |

其中 1 的部分为取$\varphi$，$\omega$，$\kappa$的初始值为零的结果，2 的部分为$\varphi$，$\omega$，$\kappa$的初始值取用 CCT 注解数据时的结果。由上列数据可知其结果均可。

表 6 是$X_0,Y_0,Z_0,\varphi$，$\omega$，$\kappa$，$v$ 的一次式和三次式系数的收敛解。

表 6　方位元素的收敛解

| | (0) | (1) | (2) | (3) |
|---|---|---|---|---|
| $X_0$: | −0.272 160 5D−05 | 0.479 463 4D−03 | | |
| $Y_0$: | 0.103 926 0D−04 | −0.356 720 3D−02 | | |
| $Z_0$: | 0.920 025 4D−06 | −0.782 223 0D−01 | | |
| PHI: | 0.462 320 2D−02 | 0.152 409 6D−05 | −0.189 009 7D−07 | 0.278 085 0D−10 |
| OMEGA: | −0.1824787D−02 | 0.4991524D−06 | 0.2491902D−07 | −0.358 216 5D−10 |
| KAPPA: | 0.1954781D−01 | −0.2303959D−03 | 0.8376508D−06 | −0.971 767 4D−09 |
| MIRROR: | 0.6551986D−02 | −0.1112637D−05 | 0.1160055D−08 | −0.2024303D−12 |

## 四、结 论

(1)利用摄影测量学中所常用的共线条件式的概念，求算卫星扫描图像的方位元素，建立扫描图像与地面间的数学模式从而达到对卫星定位是现实的。

(2)有九个以上均匀分布的地面控制点即可得出满意的结果。且精度分布是均匀的。

(3)用本研究所建立的卫星多谱段扫描图像与地面目标之间的数学模式及软件，对卫星 MSS CCT 图像以±1 像元的精度进行几何纠正是容易的。

(4)根据本研究的结果，对雷达扫描图像、红外扫描图像、CCD 图像、声纳海底测量扫描图像等扫描式图像的几何纠正以及应用数字地面模型(DTM)、制作卫星三维图像、鸟瞰图像等方面具有易于扩展应用的可能性。

## 参 考 文 献

[1](日)村井俊治，前田宏，地球资源卫星 MSSテータの几何学的补正に关する研究，163–165 东京大学生产技术研究所报告，27(5)，1978 年

[2] ランドサツト MSS データ CCT フオーマント说明书，42，(日)宇宙开发事业团地球观测センタ.，1982 年。

[3] 王之卓，摄影测量原理，14–20，测绘出版社，1979 年。

[4](日)村井俊治，斜め空中写真の解析的偏歪修正"写真测量とリモートセンシング"，17 5–17 No.1,1978.

# 卫星 MSS CCT 数据的再采样

李树楷

[摘要]:MSS CCT 几何精纠正中数据再采样模式的选择影响到几何精纠正的精度和 CPU 的长短，尤其对 CPU 时间上影响更大。

本研究从共线条件式所建立的数学模式出发，在各种误差统计分析的基础上，开发了小区线性内插的再采样方法，充分利用现有内存的方法，再采样精度在±0.2 像元以内。

研究试验结果可知，以上述数学模式和本再采样方法几何精处理的精度在±1 像元以内。与常用的较好的软件在同样条件下比较，本方法所用 CPU 仅为常用软件的 56%，取得了较高效率的结果。

[关键词]: 共线方程式,线性内插,地图化逆变换。

## 一、概 述

MSS CCT 数据的再采样是几何处理的重要部分。再采样的方法依从于影像坐标$(I, J)$[1]与地理坐标间变换的数学模式。扫描影像坐标$(I, J)$与地理坐标$(X, Y)$间变换的数学模式从目前国内外情况而言大致可分为四类：系统纠正型（利用 MSS CCT 带注解数据进行纠正）；系统纠正与应用地面控制点进行多项式变换的并用型[2]；单纯应用高次多项式按地面控制点建立数学模式；应用共线条件式等。相应的数据再采样也可分为四类：

(1)随机型正变换

这里把从影像坐标求地面坐标的过程称之为正变换。这类再采样方式是把像元点一个一个地求出其地理坐标。逐线逐像元进行变换的结果，等间隔排列的像元的地理坐标位置却是非等间隔。同一条扫描线上的像元其地理位置不排在一条直线上，这是由于卫星方位元素及其它多种因素影响的结果。

(2)采用扫描函数、像元函数的地图化型逆变换

这应用于上述第二类数学模式的数据再采样中。数学模式是从系统纠正入手，尔后利用地面控制点采用双一次多项式建立已系统纠正后的影像平面坐标$(x,y)$与地理坐标间的关系式。因此，由地理坐标$(X,Y)$直接求影像坐标$(I,J)$的变换式是很难找到的。出于实用的目的，引伸出扫描函数和像元函数的概念，也取得了好的结果。其原理是:从卫星平台的姿态、位置随卫星的移动单调地、缓慢地变化着这一根据出发，

---

[1] $I$为像元号,$J$为扫描线号。

[2] 见参考文献[2]。

提出了扫描线号是$X$坐标的函数。以此确定扫描线数。为便于追寻又利用二次射影变换建立影像平面坐标$(x,y)$与地面坐标间的近似关系,找到精度为±10像元的近似区域。在此区域内采用最近邻内插法搜寻扫描线号。扫描函数由于姿态等因素的影响,每条扫描线的扫描函数的系数均不同。因而一幅若包含2400条扫描线的话,就将有2400套系数。在确定了扫描线号的基础上,扫描线内的像元号又是标准化后的$X$坐标的函数。这函数式主要是振动扫描镜等对扫描方向影响较大的因素引起的像元地理坐标随$X$坐标的变化。对于同一传感器,同一次运行期间可认为这种影响是几乎相同的。即有一套系数即可满足再采样的精度要求。在一条已确定的扫描线内由标准化后的$X$求出像元号。由于$X$坐标可按地图格网确定,将与此格网相对应的像元$(I, J)$一个一个地挑选出来顺序排成新的一行,组成新的地图化了的新文件。这种方式中,扫描函数是一元一次多项式,像元函数是一元三次多项式,与采用二元三次多项式相比,CPU时间要短。

(3)地图化型逆变换

这类再采样方式主要用于上述第三类数学模式的再采样中,其原理与(2)的后半部相仿。数学模式是按地面控制点采用高次多项式建立影像坐标与地理坐标间的变换关系。这种变换精度取决于地面控制点的精度、分布、数量等。数据再采样时,从地图化(矩阵化)的再采样坐标求取与之相应的影像坐标$(I, J)$。将具有影像坐标$(I, J)$的像元的数据按其相应的地图化的再采样位置的顺序重新排列,组成新文件。坐标变换依靠高次多项式逐点进行,CUP时间相对于(2)而言要长。

(4)分区线性内插逆变换

这是作者的研究成果。应用于第四类数学模式①的再采样中,本质上也是地图化再采样类型。用正变换依共线式求出每个小区四角的地面坐标,在小区内采用直线内插(或射影变换)求出相应于地图矩阵化的每个再采样点的影像坐标$(I, J)$,进而将影像坐标$(I, J)$的数据转写到新的再采样位置上去,组成新的文件。小区内的变换是逆变换。由于小区内采用直线内插或射影变换的方法,关系式简单,CPU时间大大缩短,仅为(2)类CPU时间的56%,也即快近一倍。

本文仅就(4)的原理、算法、试验结果、精度效率作一介绍。

## 二、数学模式及算法

1、依据的坐标变换关系式

卫星姿态参数的数学模式及影像坐标系$(I, J)$与地理坐标系间的变换关系式为:

$$\begin{cases} x = f \cdot \tan\delta / \cos\theta \\ y = f \cdot \tan\ (\theta + v) \end{cases} \tag{1}$$

① 见参考文献[1]。

$$\begin{cases} X_0 = A_1 + B_1 L \\ Y_0 = A_2 + B_2 L \\ Z_0 = A_3 + A_3 L \\ \varphi = A_4 + B_4 L + C_4 L^2 + D_4 L^3 \\ \omega = A_5 + B_5 L + C_5 L^2 + D_5 L^3 \\ \kappa = A_6 + B_6 L + C_6 L^2 + D_6 L^3 \\ v = A_7 + B_7 L + C_7 L^2 + D_7 L^3 \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} x = -f \cdot \dfrac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \\ y = -f \cdot \dfrac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} X = (Z - Z_0)\dfrac{a_{11}y + a_{12}x - a_{13}f}{a_{31}y + a_{32}x - a_{32}f} + X_0 \\ Y = (Z - Z_0)\dfrac{a_{21}y + a_{22}x - a_{22}f}{a_{31}y + a_{32}x - a_{33}f} + Y_0 \end{cases} \tag{4}$$

上式中$a_{ij}$的值为:

$$R = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\cos\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

这里:

$X_0, Y_0, Z_0$: 假投影中心地理坐标

$\varphi$: 航向倾角

$\omega$: 旁向倾角

$\kappa$: 旋角

$v$: 扫描镜不等速扫描引起的扫描视角的变化

$X, Y, Z$: 地面点的坐标

$x, y$: 相应于地面点的假平面坐标系坐标

$A_i, B_i, C_i, D_i$: 多项式系数

$L$: 扫描带号

$f$: 假定像片投影主距

$a_{ij}$: 角向量

$\theta$: 扫描视角

$\Delta\delta$: MSS 进行方向的瞬时视角

$\Delta\theta$: MSS 扫描方向的瞬时视角

$\delta$: 进行方向的视角

其中:

$$\begin{cases} \theta = (I - (N+1)/2)\,\Delta\theta \\ \delta = (K - 3.5)\,\Delta\delta \\ K = MOD(J-1,6) + 1 \end{cases} \tag{5}$$

这里: $N$: 一条扫描线的像元数

$I$: 像元号

$K$: 接收元件号(LANDSAT 的情况下,$K=1,6$)

按上述(1)~(5)式可建立影像坐标与地面坐标间的变换关系，这种变换是正变换。由上述诸式可知，由地面坐标$(X,Y)$反求影像坐标$(I,J)$的变换关系式很难找到。而这种逆变换正是将影像几何变形纠正后的再采样所需要的。笔者通过误差统计采用了小区直线内插或射影变换方式取得了较好的效果。

2、小区内插或射影变换

卫星在太空中运行中,其姿态、位置的变化受气流、地形起伏引起的航高变化、重力的变化等影响较之飞机要小得多。其中，卫星位置的变化可以认为是线性变化；三轴姿态可认为是三次曲线变化；振动扫描镜不等速扫描引起的角变化也可认为是按三次曲线变化。将一幅分成若干个小区，在小区范围内进行直线内插而产生的误差，若在允许范围内，就可以说在这样的小区范围内进行直线内插是可行的。表 1 是不同大小的小区内线形近似误差的统计计算结果。采用的数据是实际的 MSS CCT 数据。小区的大小分三种分别进行统计计算。

表 1

| | 小区大小 | 统计误查的点数 | 最大误差 | 中误差 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 36 线×300 像元 | 1980 | 0.15 线 0.30 像元 | 0.04 线 0.11 像元 |
| 2 | 72 线×400 像元 | 960 | 0.38 线 0.53 像元 | 0.13 线 0.22 像元 |
| 3 | 144 线×500 像元 | 420 | 0.98 线 0.93 像元 | 0.34 线 0.43 像元 |

由表 1 可知，72 线×400 像元的小区内线性近似最大误差为 0.38 线和 0.53 像元，中误差为 0.13 线和 0.22 像元。考虑到安全系数和一幅分成整数小区完整性，实际中取 78 线(13 条扫描带)×350 像元大小的小区作为可线形近似的范围。

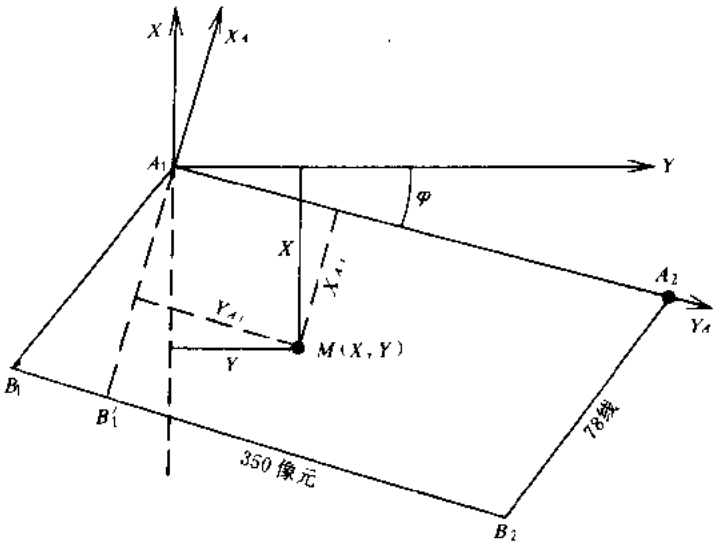



图 1　小区内的线性关系

2.1　坐标变换法

图 1 是小区内的几何关系图。小区四角$A_1$,$A_2$,$B_1$,$B_2$的地理坐标值可由“二”中的数学模式求得。其影像坐标值是已知的$(I, J)$。也即:

| | 影像坐标 | 地理坐标 |
|---|---|---|
| $A_1$ | $I$ , $J$ | $X_1$ , $Y_1$ |
| $A_2$ | $I+350$ , $J$ | $X_2$ , $Y_2$ |
| $B_1$ | $I$ , $J+78$ | $X_3$ , $Y_3$ |
| $B_2$ | $I+350$ , $J+78$ | $X_4$ , $Y_4$ |

图 1 中$XA_1Y$为地理坐标系,$X_AA_1Y_A$为小区坐标系,$\varphi$是两坐标系间的夹角。由图可知:

$$\begin{cases} tan\varphi=(X_1-X_2)/(Y_2-Y_1) \\ X_{Ai}=(X_1-X_i)cos\varphi-(Y_i-Y_1)sin\varphi \\ Y_{Ai}=(Y_i-Y_1)cos\varphi+(X_1-X_i)sin\varphi \\ Q=78/X_{A3} \\ R=350/Y_{A2} \end{cases} \tag{6}$$

$QR=-(Y_{A3}\cdot Q)/78$,这里$Q$为卫星行进方向号的增量; $R$为扫描方向像元的增量; $QR$为轨道偏斜角所引起的像元改正量。

(6)式各项参数可在计算小区四角坐标的同时计算得出。在小区范围内的任意地理坐标点均可按下式求得影像坐标。

$$\begin{cases} AI_i = Y_{Ai} \cdot R + QR \cdot X_{Ai} \cdot Q + I_1 \\ AJ_i = X_{Ai} \cdot Q + J_1 \end{cases} \tag{7}$$

按（7）式求得的值可能是小数，而影像坐标值均为整数。这里取用最近邻法求得整数值。

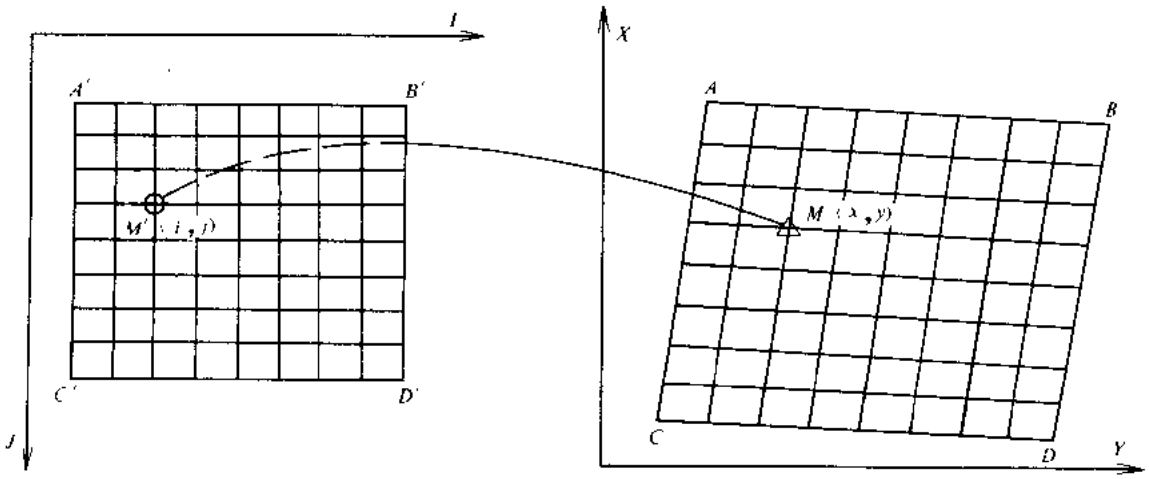
$$\begin{cases} I_i = IFIX(AI_i + 0.5) \\ J_i = IFIX\ \ (AJ_i + 0.5) \end{cases} \tag{8}$$

这种方法在计算机 FORTRAN 语言中有现成的函数可利用。

2.2 射影变换法

小区内线形内插逆变换的另一种方法是利用射影变换建立影像坐标与地理坐标间的关系，如图 2 所示。

影像坐标系中的$A'$,$B'$,$C'$,$D'$四点的坐标值取下述坐标值。




影像坐标系　　地理坐标系

图 2　射影变换关系

| | 影像坐标 | 地理坐标 | 对应点 |
|---|---|---|---|
| $A'$ | $I$ , $J$ | $X_A$ , $Y_A$ | $A$ |
| $B'$ | $I+350$ , $J$ | $X_B$ , $Y_B$ | $B$ |
| $C'$ | $I$ , $J+78$ | $X_C$ , $Y_C$ | $C$ |
| $D'$ | $I+350$ , $J+78$ | $X_D$ , $Y_D$ | $D$ |

这样的四个点其影像坐标与地理坐标的关系可采用下面的仿射变换式求得:

$$A_1:\quad \begin{cases} I = a_1 X_A + a_2 Y_A + a_0 \\ J = b_1 X_A + b_2 Y_A + b_0 \end{cases}$$

$$B_1:\quad \begin{cases} I + 350 = a_1 X_B + a_2 Y_B + a_0 \\ J = b_1 X_B + b_2 Y_B + b_0 \end{cases}$$

$$C_1:\quad \begin{cases} I = a_1 X_C + a_2 Y_C + a_0 \\ J + 78 = b_1 X_C + b_2 Y_C + b_0 \end{cases}$$

$$D_1:\quad \begin{cases} I + 350 = a_1 X_D + a_2 Y_D + a_0 \\ J + 78 = b_1 X_D + b_2 Y_D + b_0 \end{cases}$$

将$X$,$Y$分别组成两组用最小二乘法分别求系数$a_i$,$b_i$。

即:

$X$ 方向: $a_0$,$a_1$,$a_2$

$Y$ 方向: $b_0$,$b_1$,$b_2$

求得上述系数后，用下式求相应于地理坐标的影像坐标$(I_i, J_i)$。

$$\begin{cases} I_i = IFIX(a_1 X_i + a_2 Y_i + a_0) \\ J_i = IFIX(b_1 X_i + b_2 Y_i + b_0) \end{cases} \tag{9}$$

## 三、数据组织

MSS CCT 几何处理中的难点之一就是计算机的容量小,MSS CCT 数据量大,因此，如何充分利用计算机的容量于所需要数据的处理，不需要处理的数据尽可能少地进入计算机,将成为重要的问题。

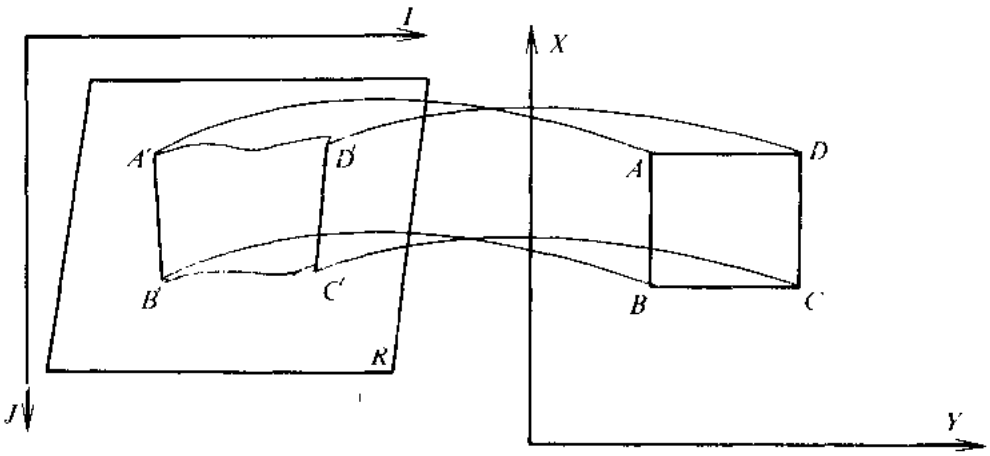



图 3

如图 3 所示.R 为 MSS CCT 数据范围，拟纠正部分为 ABCD 范围；与 ABCD 相对应的是 MSS CCT 数据 R 范围内的 A′ B′ C′ D′。由于 R 数据范围是按行列排列的。问题是从 R 中只取出 A′ B′ C′ D′范围的数据，这范围之外的数据都不使其进入计算机，正是该数据组织的目的。

要处理的数据量小于计算机储存量时，可将整块数据输入计算机进行处理。待处理的数据量大大超过计算机容量时，为使有限的计算机容量处理尽可能大的数据就产生了图 4 图 5 那样的情况。如图 4，*P*为要采样的数据范围。显然 1,2,3,4 区为无用数据区。使得*P*范围的数据进入计算机，1，2，3，4 区不进入计算机的方法示于图 5。*JS*(1)为扫描线号，*IIS*(*I*),*IIF*(*I*)分别为扫描线在*P*区范围内的最左边和最右边的像元号,*IIS*(*I*),*IIF*(*I*) 是由 *P*范围边缘线点的地理坐标按前述的小区直线内插法求得的。其求算顺序为从右上角开始，以再采样大小(以地理坐标经纬度表示)为步进间隔，沿 1,2 方向求得的扫描线号、像元号放到*JS*(*I*) 和 *IIS*(*I*)变量中去；沿 3，4 方向求得的像元号放到*IIF*(*I*)变量中。如图所示*P*范围内包括的扫描线数为*JS*(1)～*JS*(7)。将 MSS CCT 读入计算机时，先把1～(*JS*(1)－1)条扫描线的数据跳读过去,从*JS*(1)开始的各扫描线分别按*IIS*(*I*)～*IIF*(*I*)的范围将像元值读入计算机。读到*JS*(7)为止(图示情况)。这样读到计算机中数据量仅仅是图 5 中*P*范围的数据。

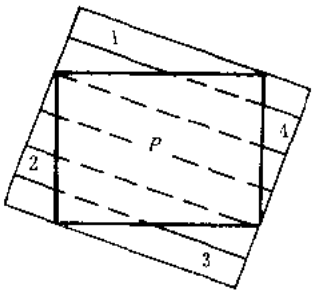



图 4

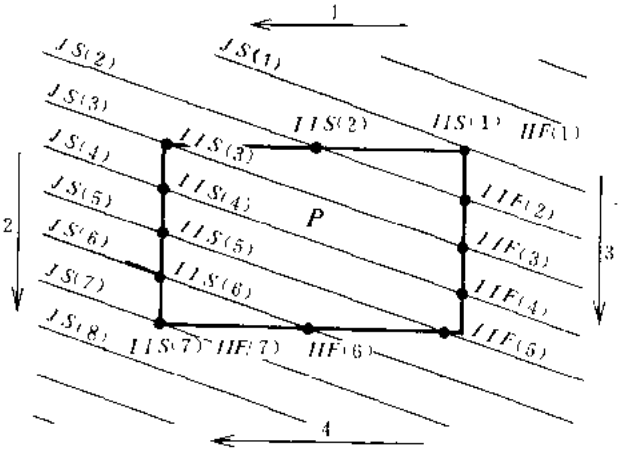



图 5

MSS CCT 中数据存放是二维存放(*I*，*J*)，依据下式可将二维信息转化为一维存储。一维存储以*MSBF*(*I*)变量为存储单元。

$NC = IIF(I) - IIS(I) + 1$

$LSS(I+1) = LSS(I) + NC$

*LSS*(*I*)的初始值定为 1

其中：*NC* 为 *IIF*(*I*) 与 *IIS*(*I*)间的像元个数。

*LSS*(*I*)为中间变量

一维存储单元$MSBF(I)$中将每条扫描线内应放入的像元数据按从左到右的顺序存储起来。其中每根扫描线是按$JS(1)\sim JS(7)$的顺序存储。$MSBF(I)$中数据排放格式将取下图形式。




图 6　一维排列顺序

上述输入到$MSBF(I)$中的数据量，应根据计算机的容量来确定。若采样间隔与 MSS CCT 中原采样间隔接近的话，可按内存大小计算再采样个数，进而确定一次输入计算机的数据量。至于从一维排列的数组中按原二维坐标$(I,J)$取出数据，用很简单的方法即可进行。

## 四、实验、精度、效率

1、实验步骤

(1)确定再采样间隔，再采样个数

再采样个数随应用目的不同而异，按国际分幅标准图幅的经差纬差确定再采样范围的基本单位。采样间隔一般选取与原 MSS CCT 每像元的相应地面尺寸相同大小。据基本单位和再采样间隔即可算出再采样个数。本实验采用再采样间隔为：$X$方向 1.8750 秒；$Y$方向 2.8125 秒。五万分一地形图经差 15′,纬差 10′计,则五万分之一地形图$Y$方向(经度方向)再采样点为 320 个，$X$方向(纬度方向)再采样点为 320 个，共计 102400 个再采样点。

(2)制作小区地面分布图

按(1)~(6)式求得的各方位元素函数的变换系数及"二"之 2 中确定的小区大小。采用正变换的方式求出各小区四角的地理坐标并制成如下分布图(图 7)。

图 7 中三角形"Δ"为地面控制点，圆圈符号"°"为小区四角各点。这张分布图便于寻找再采样范围右上角所在小区的号码及小区左上角的扫描线号和像元号，这些均作为再采样时输入数据。本实验所用 MSS CCT 为 3247 像元×2340 条扫描线的规格，因而共有 300 个小区计 341 个小区角点。

每个小区号码可按小区左上角的影像坐标$(I,J)$用下式算得。

$$N = I/350 + (J/78) \times 11 + 1$$

(3) 坐标变换和直线内插

求对应于地理坐标的每个步进点的影像坐标 $(I, J)$。采用"二"中的任一种算法或内插法，在数据量大需分成几块处理时，每块处理时均需搜寻块四周边的线号、像元号$(J,I)$。

(4) 再采样

从影像数据文件中找出相应于影像坐标($I$,$J$)的数据，组成新的文件输出。这样输出的新文件已经经过几何处理，回放出的图像的定位特性与地形图相近，其中误差在±1像元以内。

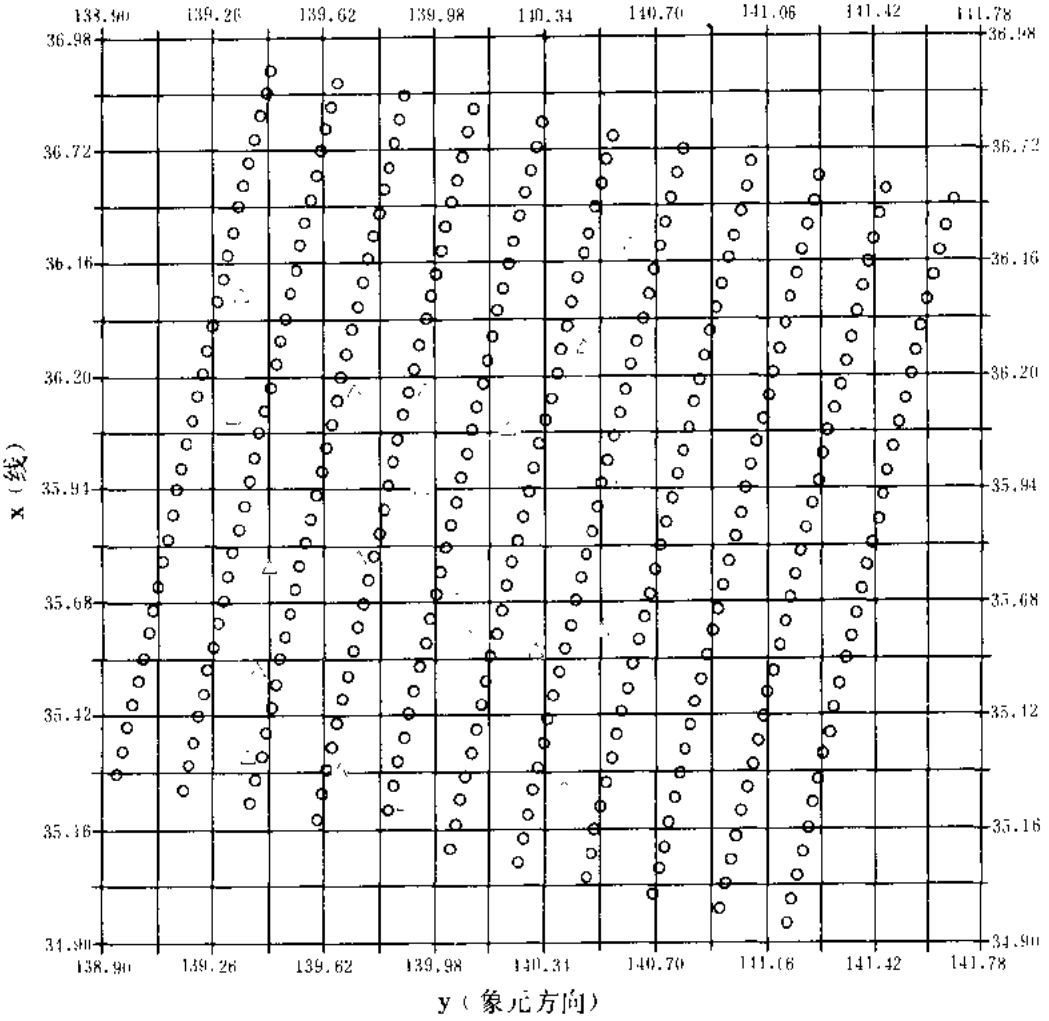



图 7　影像点的地面分布图

2、精度

输出新文件的最终精度取决于控制点的精度，收敛计算时的精度。正算求影像相应的地理坐标精度、小区内插法的精度等。这里仅小区内插法精度及再采样后地面控制点上残余误差的中误差与地形图比较的结果分述如下。

(1)小区内插法精度

小区内插法可采用前述不同方法，采用射影变换法时将小区四角影像坐标值$(I,J)$与按射影变换法求得的影像坐标值进行了比较，结果如表2所示格式（表2只载其中一部分）。表中$WWI,WWJ,TI,TJ$是$329\times4=1316$个小区角点统计计算的结果。

中误差：　像元方向　　0.0745像元

　　扫描线方向　　0.08093线

最大误差：像元方向　　0.1875像元

　　扫描线方向　　0.2500线

由上可知，误差大小在最近邻内插法精度范围之内。

表2

| NO | Δx1 | Δy1 | Δx2 | Δy2 | Δx3 | Δy3 | Δx4 | Δy4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1−0.125 | 0.187 | 0.0 | −0.125 | 0.063 | −0.188 | −0.063 | −0.063 |
| 1 | 10−0.125 | 0.188 | 0.063 | −0.188 | 0.0 | −0.188 | −0.063 | 0.188 |
| 2 | 10−0.063 | 0.188 | 0.0 | −0.125 | 0.0 | −0.125 | −0.125 | 0.188 |
| 3 | 10−0.063 | 0.125 | 0.0 | −0.125 | 0.0 | −0.125 | −0.063 | 0.125 |
| 4 | 10−0.063 | 0.125 | 0.063 | −0.125 | 0.0 | −0.125 | −0.063 | 0.125 |
| 5 | 10−0.125 | 0.125 | 0.0 | −0.125 | 0.0 | −0.125 | −0.125 | 0.125 |
| 6 | 10−0.125 | 0.125 | 0.0 | −0.125 | 0.0 | −0.125 | −0.125 | 0.125 |
| 7 | 10−0.063 | 0.125 | 0.063 | −0.063 | 0.063 | −0.063 | −0.125 | 0.125 |
| 8 | 10−0.063 | 0.125 | 0.125 | −0.063 | 0.063 | −0.063 | −0.0 | 0.125 |
| 9 | 10−0.125 | 0.063 | 0.063 | −0.063 | 0.0 | −0.063 | −0.125 | 0.063 |
| 10 | 10−0.125 | 0.063 | 0.063 | −0.063 | 0.063 | −0.063 | −0.063 | 0.063 |
| 11 | 10−0.063 | 0.063 | 0.0 | −0.063 | 0.0 | −0.063 | −0.125 | 0.063 |
| 12 | 10−0.125 | 0.125 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | −0.063 | 0.125 |
| 13 | 10−0.063 | 0.0 | 0.063 | −0.063 | 0.063 | −0.063 | −0.125 | 0.0 |
| 14 | 10−0.063 | 0.063 | 0.063 | 0.0 | 0.064 | 0.063 | −0.063 | 0.063 |
| 15 | 10−0.125 | 0.0 | 0.063 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | −0.125 | 0.0 |
| 16 | 10−0.125 | 0.0 | 0.063 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | −0.125 | 0.0 |
| 17 | 10−0.125 | 0.0 | 0.063 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | −0.125 | 0.0 |
| 18 | 10−0.125 | 0.063 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | −0.125 | 0.063 |
| 19 | 10−0.063 | 0.0 | 0.063 | 0.0 | 0.063 | 0.0 | −0.125 | 0.0 |
| 20 | 10−0.063 | 0.0 | 0.063 | 0.0 | 0.063 | 0.0 | −0.125 | 0.0 |
| 21 | 10−0.063 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.063 | 0.0 | −0.063 | 0.0 |
| 22 | 10−0.063 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.063 | 0.0 | −0.063 | 0.0 |
| 23 | 10−0.125 | 0.0 | 0.063 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | −0.063 | 0.0 |
| 24 | 10−0.063 | −0.063 | 0.063 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | −0.063 | 0.0 |
| 25 | 10−0.125 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | −0.125 | 0.0 |
| 26 | 10−0.125 | 0.0 | 0.063 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | −0.063 | 0.0 |
| 27 | 10−0.125 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.063 | 0.0 | −0.125 | 0.0 |
| 28 | 10−0.125 | 0.063 | 0.063 | 0.0 | 0.063 | 0.0 | −0.125 | 0.063 |
| 29 | 10−0.125 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | −0.125 | 0.0 |
| 30 | 10−0.125 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.063 | −0.063 | −0.063 | 0.0 |

$WWI=0.0745$　$WWJ=0.08093$　$TI=0.1875$　$TJ=0.02500$

(2)再采样后地面控制点上的残差

地面控制点作为已知数据输入计算机者有两组，一组为地理坐标($X$，$Y$，$Z$)，另一组为控制点的影像坐标($I$，$J$)。再采样时将其与其它采样点同样处理。内插所得地面控制点的影像坐标($I'$,$J'$)与原影像坐标($I$，$J$)进行比较和统计计算，其结果列于表3。

表3

| NO | I | J | IIX(WI): | JJX(WI): | IS(SA) | JS(SA) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1981 | 334 | 1981.5000 | 333.8125 | 0.05000 | −0.1875 |
| 2 | 48 | 745 | 47.9375 | 745.0625 | −0.0625 | 0.0625 |
| 3 | 1128 | 901 | 1127.6875 | 900.1250 | −0.3125 | −0.8750 |
| 4 | 139 | 1135 | 139.0625 | 1136.2500 | 0.0625 | 1.2500 |
| 5 | 2217 | 1064 | 2217.1250 | 1064.8750 | 0.1250 | 0.8750 |
| 6 | 499 | 1574 | 498.1875 | 1573.7500 | −0.8125 | −0.2500 |
| 7 | 1600 | 1670 | 1600.0625 | 1669.3125 | 0.0625 | −0.6875 |
| 8 | 2256 | 2084 | 2256.2650 | 2084.4375 | 0.6250 | 0.4375 |
| 9 | 634 | 2191 | 634.0625 | 2191.0000 | 0.0625 | 0.0 |
| 10 | 2270 | 1561 | 2269.6250 | 1561.1875 | −0.3750 | 0.1875 |
| 11 | 1452 | 2244 | 1451.7500 | 2243.1250 | −0.2500 | 0.8750 |
| 12 | 1215 | 1240 | 1214.6875 | 1239.1875 | −0.3125 | −0.8125 |
| 13 | 1138 | 1799 | 1137.7500 | 1798.6875 | −0.2500 | −0.3125 |
| 14 | 726 | 973 | 726.0625 | 972.8750 | 0.0625 | −0.1250 |
| 15 | 1991 | 1671 | 1991.2500 | 1671.5000 | 0.2500 | 0.5000 |
| 16 | 571 | 1909 | 571.1250 | 1909.6250 | 0.1250 | 0.6250 |
| 17 | 974 | 1491 | 974.5625 | 1490.7500 | 0.5625 | −0.2500 |
| 18 | 1847 | 676 | 1846.5000 | 676.8125 | −0.5000 | 0.8125 |
| 19 | 1082 | 2185 | 1082.2500 | 2185.5000 | 0.2500 | 0.5000 |
| 20 | 1571 | 987 | 1572.1250 | 986.2500 | 1.1250 | −0.7500 |

$WWI(IR) = 0.434$

$WWJ(JR) = 0.617$

$WWI(IR,JR) = 0.533$

中误差为：像元方向　0.434像元

扫描线方向　0.617线

平面位置中误差为：　0.533像元

最大误差为:像元方向　1.125像元

扫描线方向　1.25线

由上可知，在地面控制点上经收敛计算、小区分隔、小区内直线近似内插等作业后,残留在地面控制点上的残差中误差在±1像元以内的论点得到证实。

(3)已几何纠正图像的最终误差

经再采样后建立的新文件回放成图像或者在宽行打印机上浓淡输出。首先将浓淡输出清单与相应地形图进行比较，判读出同名点。如前所述每幅1/5万地形图在作

业前已计算好经、纬方向图边所包含的像元数。地形图每边长度是已知的，即可求出任一图边距某个像元的距离，这个距离与地形图上相应点距这一图边的距离进行比较，则得到如下表数据。

| 被检查点号 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 地形图上的 | X | 225.0 | 2440 0 | | 150.0 | 2262 5 | 1575.0 | 2600.0 | 5645.0 | | 7537.5 | 1500.0 | 7300.0 | |
| 长度(m) | Y | | | 4437.0 | | | | | 2200.0 | 7582.5 | 350.0 | 5312.5 | | 3260.0 |
| 新文件上的 | X | 249.8 | 2498.0 | | 199.8 | 2297.9 | 1598.6 | 2647.7 | 5645.0 | | 7543.3 | 1498.7 | 7314.1 | |
| 长度(m) | Y | | | 4430.0 | | | | | 2215.1 | 7562.5 | 305.5 | 5270.5 | | 3234 9 |
| 误差(m) | X | +24 8 | −58 0 | | +49.8 | +35 4 | −23.6 | +47.7 | 0.0 | | +5 8 | −1.3 | +14 1 | |
| | Y | | | −7.0 | | | | | +15.1 | −20.5 | −44.5 | −42.0 | | −35.1 |
| 最大误差(m) | X | +58.0 | | | | | Y | −44.5 | | | | | | |
| 中误差(m) | X | ± 32 8 | | | | | Y | ± 30.8 | | | | | | |
| 位置误差(m) | | 30 9 | | | | | | | | | | | | |

3、效率

MSS CCT 几何处理中花 CPU 最多的步骤是数据的再采样。再采样前的所有数值计算相对数据再采样而言所用 CPU 要少得多。而再采样中每个采样点的计算所用数学运算式越简单，所用机时越少。本项研究中采用小区直线内插的方式，取得了高效率的结果。在同一台计算机(FACOM M−180AD 主存 12 兆)上对同一盘 MSS CCT 以同样的像元数对同一地区分别采用本方法和常用的较好的方法进行数据再采样。所得结果如下:

试验数据量: 1601 × 1601(像元)

再采样间隔: Wy = 1.″875 , Wx = 2.″8125

计算时间: 常用方法 174.39 分钟

本方法 98.00 分钟

较差 76.39 分钟

百分比:本方法用时为常用方法用时的 56.2%, 即本方法取得了 44%的改良效果。

用本方法对一帧 MSS CCT 图像进行几何处理，当使用 FACOM M−180 AD 计算机时约需 5 分钟。试验样片 1、2 为用本方法处理的一个例子。

## 五、结 论

(1)采用分小区直线内插法作 MSS CCT 几何处理中的再采样是可行的，精度在 ±1 像元以内。平面位置中误差为 31m。

(2)本研究开发的软件较之常用的较好的方法其效率要高约 44%。

(3)对用于试验的 MSS CCT 图像按误差统计的方法得到小区范围 78 线 × 350 像元内可以 0.2 像元的精度进行线性内插。

## 参 考 文 献

[1] 李树楷:“卫星多谱段扫描图像 MSS 的定位问题”,383—388 地理学报 1984 年 12 月 39 卷 4 期

[2] 村井俊治,前田宏:地球资源卫星 MSSデータの几何学的补正に关する研究,178 东京大学生产技研究所报告 27(5) 1978 年

# 多幅连续卫星图像的几何纠正[1]

李树楷　刘　彤

[摘要]:LANDSAT MSS,TM 图像是一种行扫描方式的图像，卫星平台位置与姿态变化是一种缓慢地单调地变化过程。从单景卫星图像几何模式的研究中可知[2]，其位置变化为卫星运行时间 T 的直线函数；姿态变化是卫星运行时间 T 的一元二次多项式函数。多景的情况下位置变化是否仍为直线函数，姿态变化是否仍可用一元二次多项式函数描述。换言之，函数形式固定时可用于多少景的范围；景数固定时应用何种函数形式描述卫星平台的位置与姿态变化。本研究证明，三景连续卫星图像的条件下(粗纠正图像)平台位置可用一元三次式描述，平台姿态可用一元五次式描述，利用共线方程式这种数学模式得到控制点上位置残差中误差为±1.08 像元的结果。开发了与此相应的再采样算法及全部应用软件。粗纠正后的三景连续(同轨道，同一天的连续三景)图像，由于经过粗纠正，图像内部几何关系与原数据获取时已发生了变化，三景之间的几何关系也与原数据获取时不同，由于带有附加参数的共线方程式也是一种图像空间与地理坐标空间的一种变换式，且其附加参数部分是有相当可塑性的多项式函数式，在三景粗纠正图像的条件下也得到了结果。

上述证明在 MSS, TM A DATA 的情况下利用带有附加参数的共线方程式模式可得到更为理想的结果。

[关键词]:　共线方程式，连续卫星图像。

## 前　言

遥感图像的地图化、地学编码遥感图像的生成是遥感图像专题信息定位和量化的基础，是多种遥感数据或遥感与非遥感数据复合分析的基础。

当前遥感信息对地定位中，普遍使用地形图作为定位的基础。但在海岸带地区，我国西部荒漠等地区,遥感图像上往往有大片水域或地面根本无明显地物的地区，甚至尚无准确的地形图的地区,这些地区的遥感图像其对地定位问题显得难度较大。遥感图像分成一景一景是人为的也是便于应用时的方便，为了遥感图像的拼接，在景与景之间保留一定的重叠也是必要的。这一景一景的遥感图像若均经过几何精纠正将是一种地图化了的产品，且保持与地形图国际分幅一致的范围作为景单位，在用户使用上也会增添不少方便。目前景单位的划分是满足不了上述要求的，且为了这一景景的图像，数据处理中心要一景景地去处理，并为重叠部份多做工作，数据处理中心又无这样强大的生产能力，将遥感图像均作几何精纠正(按国际分幅)。

本项研究的目的在于荒漠或海岸带等控制选点困难地区能够少选点，实在选不出

[1]本研究课题为国家自然科学基金会资助项目，在此表示感谢。

[2]见参考文献[1]。

点时使用邻近景的点也可进行精纠正。多景连续几何精处理比单景逐景处理是数据中心效率提高的有效途径。由于需用控制点较常用方法少，也减轻了数据处理中心作精处理时的工作量。

本研究从卫星平台位置与姿态变化是一种单调地简单函数变化这一特征出发充分利用中心投影性质，得到多景连续卫星图像几何精纠正的研究结果。所用资料为粗纠正 MSS 123 / 31,123 / 32,123 / 33。

## 一、原理和方法

本研究所作几何精纠正是先将三景图像拼接为一大景图像，然后利用地面控制点进行的。它通过控制点数据对原始 MSS 卫星图像的几何畸变过程进行数学模拟，建立原始的畸变图像空间与地理制图用的标准空间(亦即校正空间)之间的某种对应关系。然后利用这种对应关系把畸变图像空间中的全部元素变换到校正图像空间中去，从而实现几何校正。校正空间在我国为高斯-克吕格投影空间。

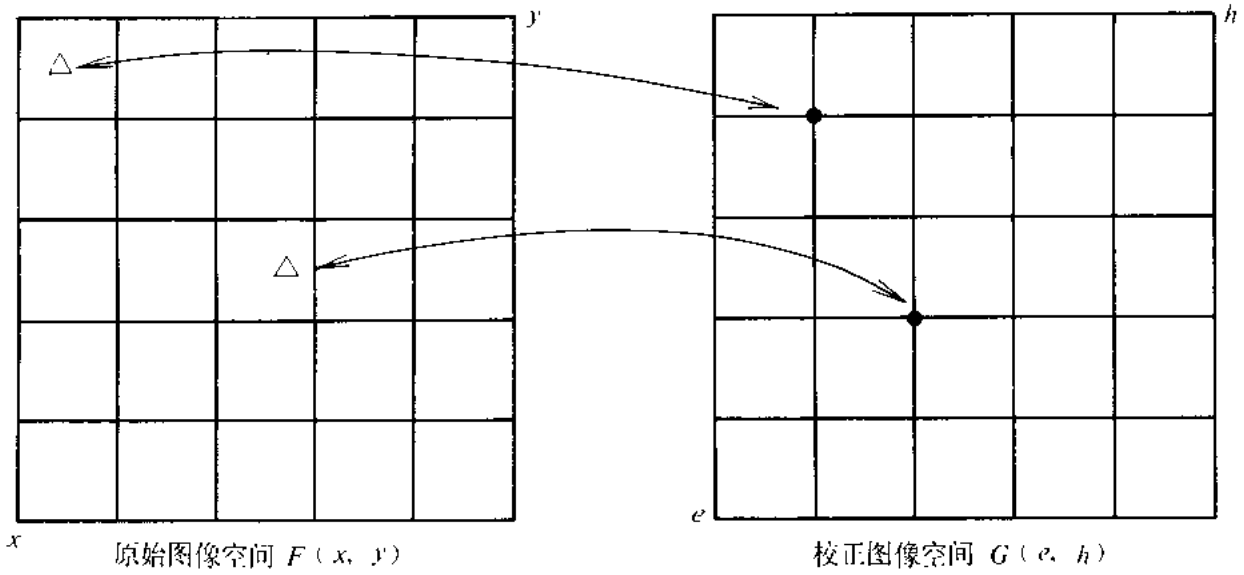



图 1

设 F 为原始的二维图像空间；
$x$为纵轴，即卫星前进方向；
$y$为横轴，即扫描方向；
$G$为校正后二维图像空间；
$e$为纵轴，即南北方向；
$h$为横轴，即东西方向；
$L$为某种变换关系；

$f(x,y)$为 F 空间中像元$F(x,y)$的亮度值;

$g(e,h)$为 G 空间中像元$G(e,h)$的亮度值;

首先反求出校正图像空间中各像元$G(e,h)$在原始图像空间中的共轭点$F(x,y)$，如图 1,然后再利用某种方法确定这一共轭点位置的亮度值$f(x,y)$,最后再将该亮度值搬移到校正空间中去。

(1) $F(x,y) = L^{-1}G(e,h)$

(2) 求:$f(x,y)$

(3) $f(x,y) \rightarrow g(e,h)$

这样校正后的数字图像是一个均匀的二维图像空间矩阵，这个输出的图像在定位关系上具有影像地图的性质。

## 二、三景连续卫星扫描图像的几何模式

1、类中心投影的几何关系

图 2 是行扫描图像的扫描断面，$P_1P_1'$为假定平面，$PP'$为实际扫描断面，图中所示遥感器面向正下方,等角速度地收集地面数据时的理想状况。

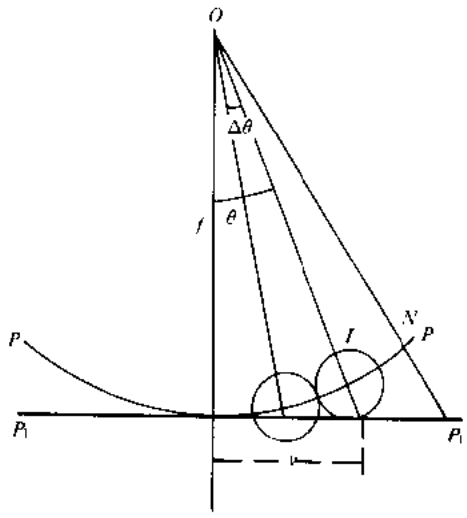



图 2

图中$f$为等效主距，与主光轴成$\theta$角的光线在$PP'$上投影的坐标为$(x,y)$与$(I,J)$,$I$像元号,$J$线号。$PP'$上投影坐标$(x,y)$与$(I,J)$坐标间有如下关系:

$$\begin{cases} y = f \cdot tg\theta \\ x = f \cdot tg\delta / cos\theta \\ \theta = \{I - (n+1)/2\}\Delta\theta \\ \delta = (K - 3.5)\Delta\delta \\ K = MOD(J - 1,6) + 1 \end{cases} \tag{1}$$

$\Delta\theta$为扫描方向($y$方向)的瞬时视场角，$\Delta\delta$为平台前进方向($x$方向)的瞬时视场角，$N$为一条扫描线所包含的像元数，$K$为探测器号。这个过程即所谓的正切改正过程，是MSS行扫描图像的几何特征。(1)式中所用的辅助数据由遥感卫星地面站按CCT产品的级别及格式记录在CCT的有关文件中。这些数据在使用共线条件作精纠正时作为初始值使用。

2、共线方程式

考虑到行扫描图像获取时的几何特征，按(1)式可将遥感行扫描图像作为中心投影方式的图像处理(图3)。

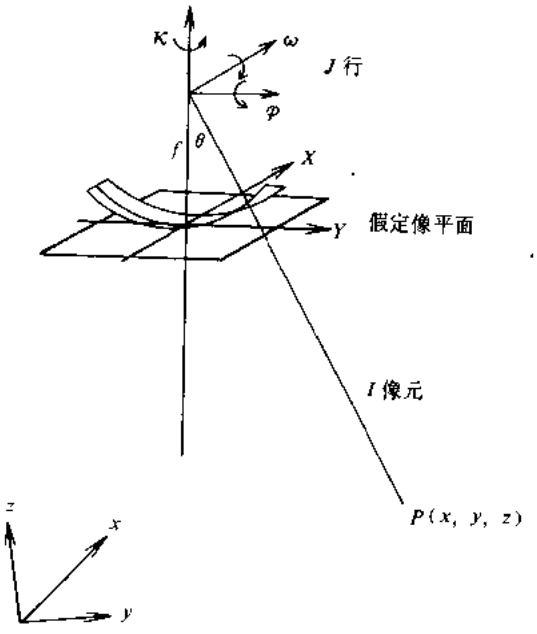



图 3

遥感器的位置与姿态是卫星运行时刻T(或扫描带)的函数，其关系式为:

$$\begin{cases} \varphi = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + d_4 t^4 + a_5 t^5 \\ \omega = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5 \\ \kappa = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 + c_5 t^5 \\ X = d_0 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3 \\ Y = e_0 + e_1 t + e_2 t^2 + e_3 t^3 \\ Z = f_0 + f_1 t + f_2 t^2 + f_3 t^3 \end{cases} \tag{2}$$

其中 $a,b,c,d,e,f$ 为待定系数。

$$\begin{cases} x = -f \cdot \dfrac{a_1(X - X_0) + b_1(Y - Y_0) + c_1(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)} \\ y = -f \cdot \dfrac{a_2(X - X_0) + b_2(Y - Y_0) + c_2(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)} \end{cases} \tag{3}$$

式中: $a,b,c$ 为方向系数。

卫星 MSS 的遥感器的反射镜是摆动方式，反射镜的运动方程为:

$$v = g_0 + g_1 t + g_2 t^2 + g_3 t^3 \text{ ($g$待定系数)} \tag{4}$$

## 三、试验步骤和方法

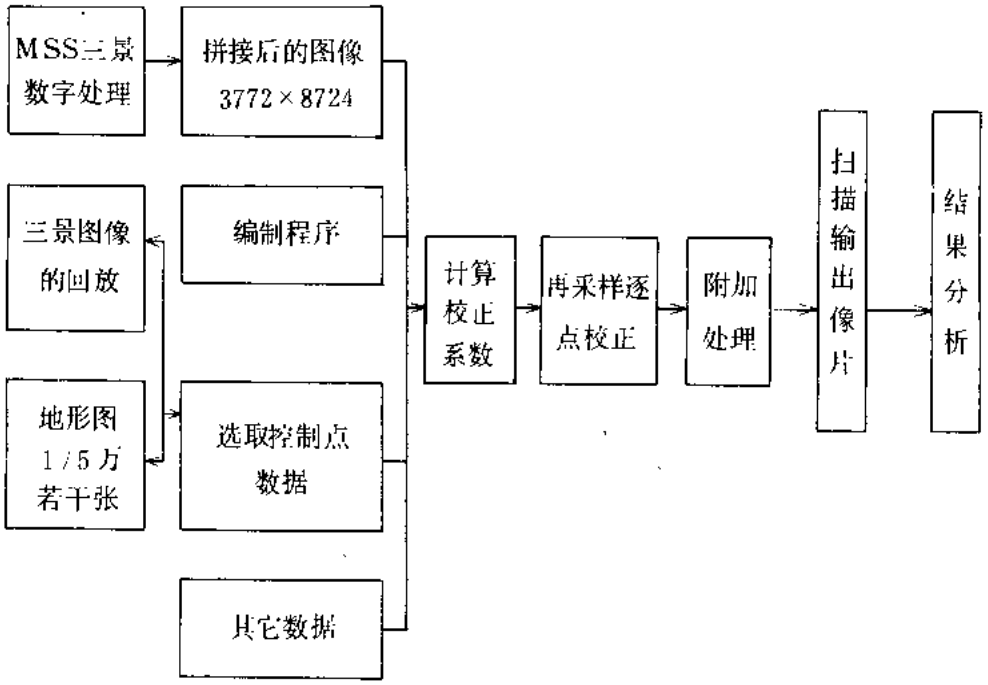



图 4　处理流程框图

在计算机上进行几何纠正主要进行三个方面的工作:首先是各种数据的准备，包括三景图像的拼接；控制点数据的确定，确定几何精纠正计算方法,再采样方法并编写程序，上机调试、运行、输出结果；最后是对结果进行系统分析和评价。具体步骤见框图(图 4)。

1、三景连续卫星影像的拼接

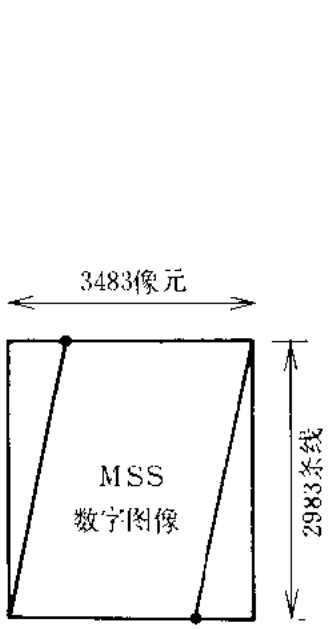



图 5

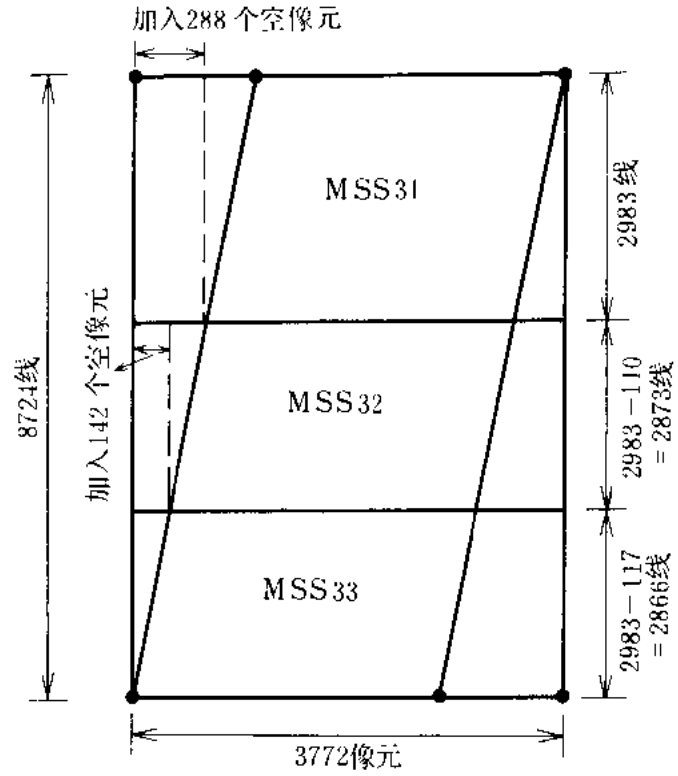



图 6　三景拼接后示意图

三景连续卫星影像之间存在着纵向重叠，卫星影像的纵向重叠是地面数据中心在进行影像数据的分幅时(地面接收站接收来的沿卫星运动轨迹的连续扫描数据 ),人为地两次重复扫描所形成的，重叠量为 16.3km，约占总面积的 8.8%。由于纵向重叠是同一信息的人为重复，所以它不能被用来进行立体观测。本试验三景扫描线数重叠数的计算是通过输出前一景的最后 512×512 大小的子图像于后一景前面相应部位相同数量灰阶图像，用人工方式依明显地物读取重叠扫描线数。第一景与第二景重复 110 条线，第二景与第三景之间重复 117 条线。另外拼接时还要注意景与景之间扫描线的错位问题。错位像元数可在图像处理终端上直接读取。拼接后的数字图像大小为 3772×8724 个像元。该图像文件为每条扫描线一个记录,长度 3772,每个字节存放一个像元。如图 5 所示这是本试验所采用经粗纠正的原始图像,图 6 是经拼接后的 MSS 图像文件示意图。

2、控制点的确定

地面控制点把原始图像空间与校正空间联系起来。确定控制点是几何精纠正的最关键问题。

地面控制点是在 MSS 图像中可寻找出来的，在地形图上可精确定位的一些特征点、特征线等自然要素或人文要素，如河流拐弯处或交叉处、小岛、小水塘、桥梁、机场跑道、铁路、水坝和交叉路口等。本试验采用的是若干张 1／5 万地形图，对照图像终端上的回放图像按上述原则选取控制点。本试验选取控制点是以景为单位均匀选点，拼接后再将所有选出的控制点统一到同一个坐标系。控制点的数量略多于几何模式的要求，在收敛计算时做适当替换,以便达到更好的精度。

3、再采样技术

遥感图像的地图化是遥感图像应用的重要步骤。遥感图像再采样的重要问题是:再采样的模式应简单;有足够的几何精度保证；数据组织和算法。

本试验采用的是分小区地图化逆变换。对于整景卫星影像而言，用线性变换的方式由$(X, Y)\rightarrow(x,y)$其精度是很低的。但是把线性变换的范围从一景缩小到一景的若干分之一的话，线性变换的可能性是存在的。即把一景图像按扫描线数，像元数分别等间隔地划分形成一个个的四边形作为小区，这小区每个顶点的影像坐标$(I, J)$已知，正切改正后的影像平面坐标$(x,y)$可求得。按第二节中的关系式可求得每个小区四个顶点的相应地面坐标$(x,y)$。将每小区四个顶点的$(I,J)$、$(x,y)$按下式(5)建立射影对应关系:

$$\begin{cases} I = a_1 X + a_2 Y + a_3 \\ J = b_1 X + b_2 Y + b_3 \end{cases} \tag{5}$$

用最小二乘法求得$a,b$系数。每小区一组$a,b$系数。本试验三景拼接后的图像被分成 1100 个小区，其间隔为 78 条线、350 个像元(如图 7)。那么它共有 1100 组$a,b$系数。

数据组织和算法:

遥感图像几何处理中的难点之一是海量的数据与计算机容量之间的矛盾，如何充分利用内存，如何大量节约机时是一个很重要的问题。

采样范围的截取是从左到右，从上到下，将需要采样的数据读入缓冲区，暂不需要的数据跳读，如果不需要的数据很多(超过 1000 个记录)，可在程序中加入系统命令跳读，只这一项就可节约许多机时。采样范围的计算方法用正算方法求得小区变换系数后，由采样坐标范围自动搜集所在小区由(5)式算出像元线号。这一过程由程序自动进行。一次再采样块的大小按所使用计算机能提供的容量及再采样的密度简单估算即可。若需再采样的范围很大则分块由程序自动进行。本试验拼接后待采样图像大小为 $3772\times8724$ 个像元(试验样片 3)。采样块大小估算为 $1000\times1601$ 像元。根据再采样的坐标范围计算机自动分 4 块处理(试验样片 4)。

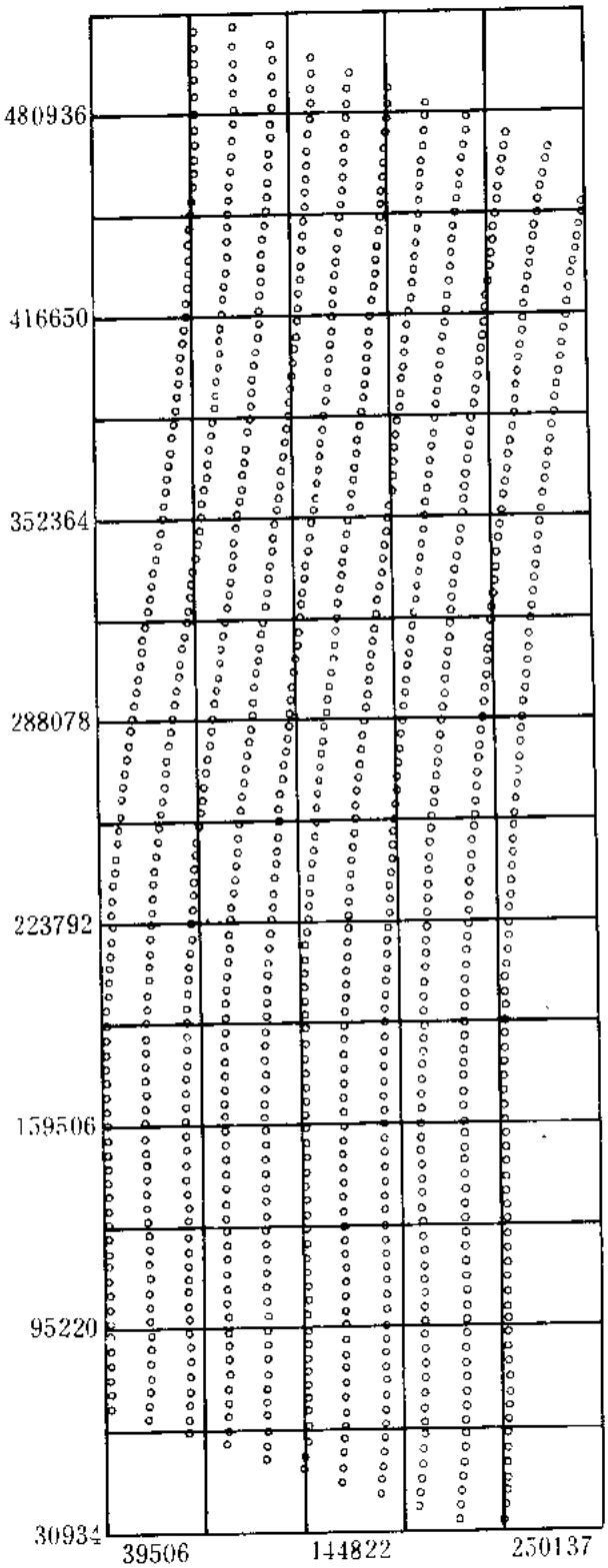

480936
416650
352364
288078
223792
159506
95220
30934
39506
144822
250137

图 7

图像数据存入方法是将二维数据作为一维数据存储的方式。这样做的好处是节省大量空间，提高效率。其方式是:

$$N = IIF(I) - IIS(I) + 1$$

$$LS(I+1) = LS(I) + N$$

$LS(I)$初值为 1；存入一维变量中的是$LS(I)$的累加值即按照$LS(I)(I = 1,2,\cdots n)$的顺序存入;

IIS(I)为一条扫描线需要再采样范围左端像元号数;

IIF(I)为右端像元号数。

从一维数组中取出二维数据用简单方法即可。

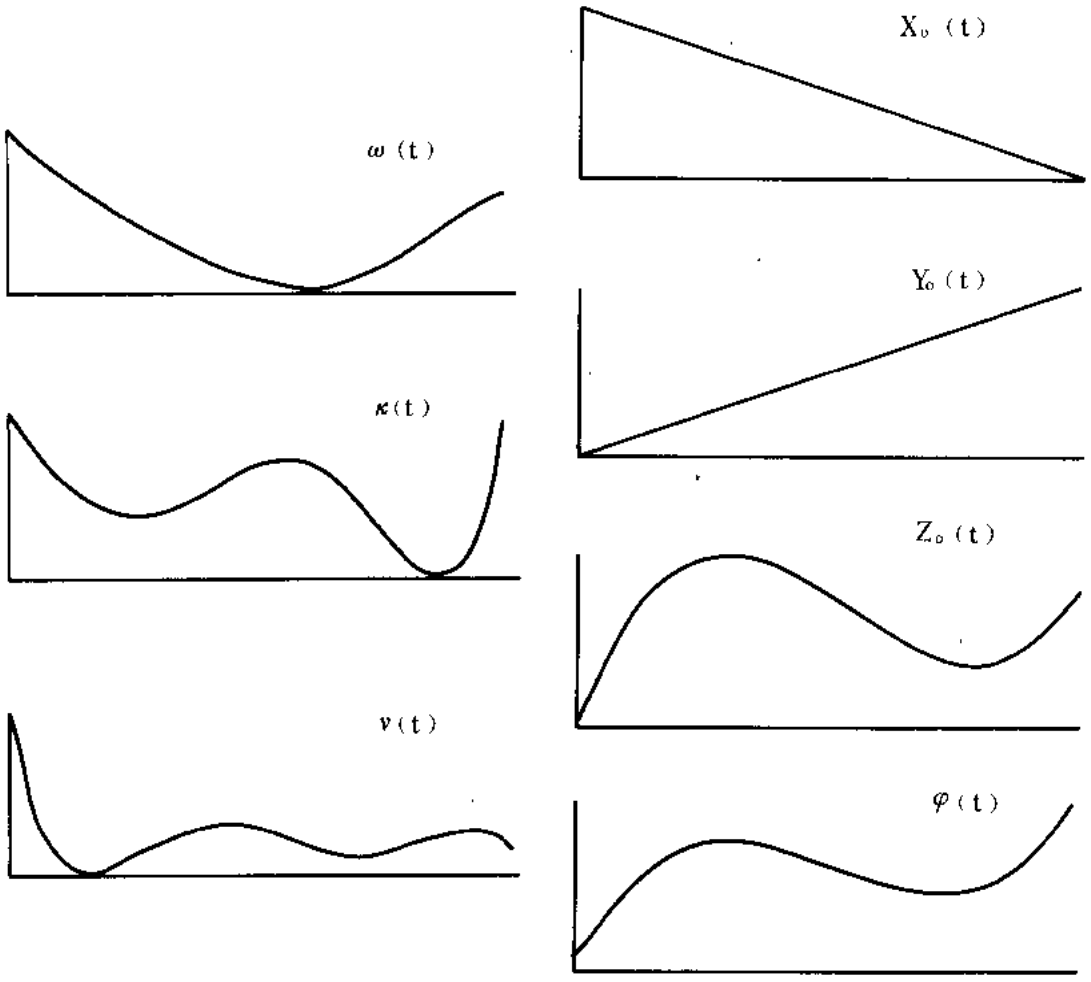



图 8

## 四、精度评价和结语

试验研究结果为地面控制点上残差中误差为±1.08 像元。由于本试验只得到粗纠

正后的图像，地面站的粗纠正在一定程度上破坏了图像内部及景与景之间的几何关系。上述精度不是理想精度。另外控制点的数量、分布和本身的定位精度，都会影响到几何精纠正的精度。几何校正还要求控制点分布均匀；控制点的位置精度越高越好。三景六个方位元素的变化曲线如图 8。

通过试验可知，几何校正的关键问题之一是选取控制点，而选取控制点是一项很烦琐的工作。作为单景图像的纠正，一般控制点不少于 20 个。本试验将三景拼接成一大景图像后，收敛计算所用控制点为 26 个。显然三景连续图像用一种模式一次纠正完毕要比每景单独纠正所用控制点数要少得多。所用控制点少，那么就意味着减少了许多工作量。另外还有一点好处是：对于某些难以选取控制点的地方如沙漠、海洋这种无明显地物的地方可以采用本试验的方法,用周围连续的图像与之拼接，然后再纠正即可达到目的。

## 参考文献

[1] 李树楷: “遥感图像的几何模式问题”,测绘出版社,《遥感应用的实践与创新》, 1990
[2] 郭德方: “遥感图像的计算机处理和模式识别”

# 航空扫描图像几何模式的研究

李树楷　刘彤　周丽华

[摘要]:国内外以往有关航空扫描图像几何问题的研究多为该图像几何误差分析，可能取用的模式①、实用模式及试验研究结果尚属罕见。本研究从分析航空扫描图像(称 AMSS)的几何特性入手，以辅助数据建立控制改正模式，继而以多项式方法，取得了控制点上残差中误差为 0.9 像元的试验研究结果。

同步扫描图像，航空像片相配合的模式，取得了控制点上残差中误差为 2 个像元的试验研究结果。若稍加改进同步准确性，缩短同步的时间间隔，取得中误差为 1 个像元以内的试验结果其可能性是很大的。

本研究还取得了航空惯性导航数据相对于空中后交数据较差中误差为:$M_x = 17.9m$，$M_y = 13m$的试验研究结果。惯性导航数据用于建立控制变形改正模式的可能性是存在的。

[关键词]:　航空扫描图像,变形改正,几何模式,最近邻内插。

## 前　言

航空扫描图像(航空多光谱，红外多波段图像等)随着传感器波段选择水平的提高及通道数剧增等硬设备的发展，给人们带来愈来愈丰富、重要的资源信息。应用范围也日渐扩大。但是由于飞机平台在飞行中姿态及地理位置的变化远比卫星平台为甚，图像几何变形的非线性程度也比卫星扫描图像剧烈。几何处理的难度比卫星图像要大得多。妨碍了应用效果和应用面的扩展。卫星平台角元素的变化用一个简单的一元三次多项式，线元素变化用直线方程即可拟合②。航空飞行平台由于受高空风、飞行质量、地形起伏引起的湍流，仪表精度等因素的影响，即使是线元素的变化，用一个简单多项式也不能拟合其实际状态(图 6)。航空扫描图像模式化几何处理一直是个急待研究解决的难题。

实际应用中目前有这样几种方法：一是靠图像处理设备的功能，取一个标准，一根线一根线地移动配准，辅之以像元的增删的方法；二是作一般正切改正用少量控制点作仿射变换;三是选取大量地面控制点，按三角形或四边形单元逐块纠正。这几种方式中，第一种可使影像在某方向大体得到纠正，图像不致于过分扭曲以至难以目视判读，但图像内部的畸变仍未得到以某种应用要求精度的消除，且耗机时可观，难于推广应用。第二种方法是大体纠正，精度很低。第三种方法据笔者的试验，控制点密度要很大，平原发达地区有可能选出那么大数量的控制点，一般地区没这种可能，推

①见参考文献[2],[3]。

②见参考文献[1]。

广是困难的。

具有丰富、重要信息的扫描图像按一定精度作实用几何处理，与地形图配准，以便于与其它遥感非遥感信息的复合处理，对于充分利用扫描图像信息是至关重要的。

本研究从分析航空扫描图像几何特征入手，采用多种模式试验对比分析，取最佳模式作为建立航空扫描图像几何处理系统的基础，也正是本研究的目的。

## 一、航空扫描图像的几何特征

航空多光谱扫描仪的数据采集，是由旋转棱镜、光学系统和位于光学系统焦面上的探测器来完成。即阳光照射地物的反射能，物质本身的热辐射能经旋转棱镜引入光学系统，经分光系统后会聚于光学系统焦面上的探测器上。国内外有多种型号的扫描仪，但其光学系统结构原理大体相同。如图 1 所示。本研究所用数据其扫描仪的参数为：

瞬时视场 $\beta$: 3 毫弧

视场角 $\alpha$: 100°

等效主距: 666mm

接受通光面积: $58cm^2$

航空飞行中扫描仪采集数据的过程如图 2 所示。地面物质的反射和辐射能量，由旋转棱镜的旋转改变进入光学系统的光的入射角。实现一条扫描线上连续像元数据的采集，即完成一维扫描。飞机平台的推进 (飞机的运动 )完成二维扫描。

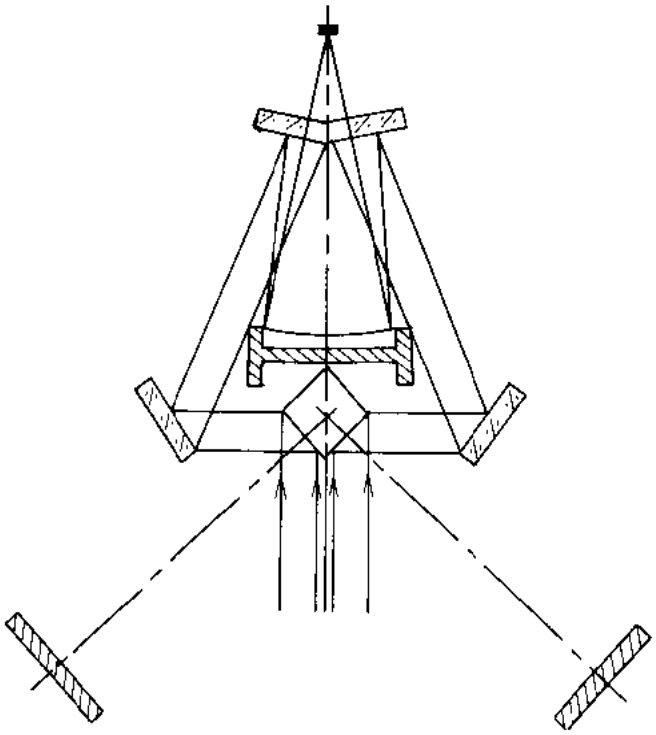


图 1

1. 焦面上的探测器一个线度范围内接收的能量形成一个像元能量数据。就一个像元而言，其几何过程与框幅式摄影类同，都是中心投影。扫描一条线有个时间过程，每个像元的采集就有先后之别。严格说来每个像元均是在不同的时间段内生成的。这个时间段内，飞机平台在运动，姿态也在变化。每个像元都有各自的投影中心。可以这样说，一景扫描图像有多少个像元就有同样数量的投影中心。相对于框幅式摄影的一张图像只有一个投影中心而言，是扫描图像的第一个特征。

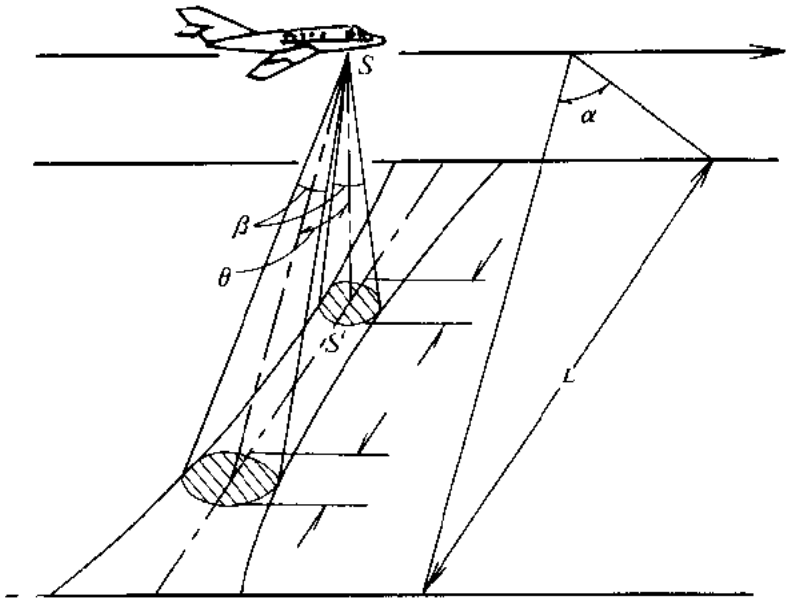



图 2

2、像元、扫描线间不连续 (重叠或遗漏) 的现象存在是航空扫描图像第二个几何特征。扫描图像上每个投影中心对应一个象元,投影中心在数据采集时的轨迹是时间$t$的函数。像元能量强度的记录是等时间间隔进行,是矩阵式的排列,像元所对应的地面采样面积间排列则是非矩阵式的,在平台姿态及地理位置发生急速变化时,像元对应的地面采样范围会出现重叠或遗漏(图 3)。速高比及偏流急速变化时扫描线所对应的地

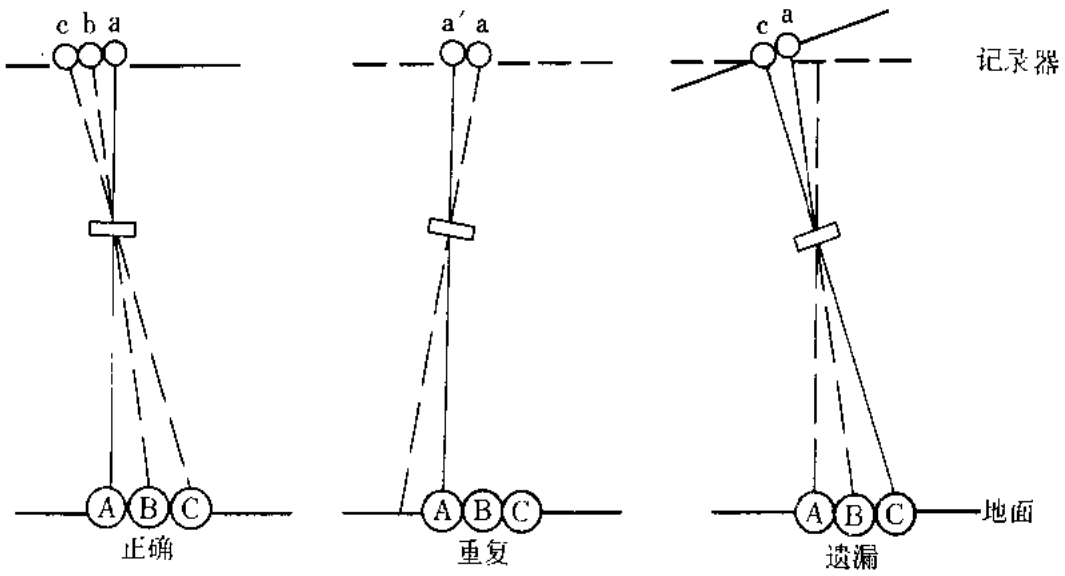



图 3

面条带之间会产生挤压(重叠)和漏扫、交叉现象。这与框幅式相机图像连续是不相同

的。例如:扫描仪转速 25 转 / 秒，每转需 0.04 秒，瞬时视场角为 3 毫弧度,飞行高度为 3000m 时,瞬时视场角对应于 9m 直径的地面采样面积。飞行地速保持 270 km / h，地面采样条带间连续。地速误差为 10km 时，即可产生重叠或漏扫现象,对飞行而言这一要求是严格的。为此往往以扫描线间重叠 50～80%为基础设计飞行方案，以防止漏带现象的产生。

3、采样面积的全景式畸变

如前述,扫描仪是由距光学系统后节点距离为等效主距$f_x$处的探测器获取像元数据，属全景扫描方式。框幅式中心投影与全景扫描中心投影间有图 5 所示关系。$PP$为全景扫描式中心投影承影面,$P_1P_1$为框幅式中心投影承影面。

从图 2 可以看出，$S'$是投影中心$S$在地面的正投影，地面瞬时采样面积距$S'$愈远愈大。按本研究使用资料而言，在$S'$处是直径为 9m 的圆。$\theta$为每个像元射线与$SS'$间的夹角。当$\theta>0°$则瞬时地面采样面积变成椭圆，$\theta$角愈大椭圆的扁度愈大。每条扫描线以 512 个像元计，则首尾两像元的$\theta$角为：

$\theta_1=\theta_{512}=0.768$弧度。

按采样面积 A 的变化率公式①:

$$\frac{\partial A}{\partial \theta}=\frac{1}{4}\pi H^2 tan\beta sin\beta\cdot(5\theta-4\theta^3)$$

式中:H 为航高。将各参数代入得:

$$\frac{\partial A}{\partial \theta}=192m^2$$

即:$\theta=0°$时地面瞬时采样面积为$63.6m^2$;

$\theta_1=\theta_{512}=0.768$弧度时，为$192m^2$。当飞机平台有侧滚时，$\theta_1\neq\theta_{512}\neq0.768$弧度，形成地面瞬时采样面积在航向的两侧，一边挤压重叠，另一边过分增大,加之航偏角($\kappa$)变化，地速变化(v),平台俯仰角($\omega$)变化,航迹弯曲甚至突然的高空气流变化都使扫描影像变化以致形成一种变形复杂的影像集合。这与框幅式摄影整张图像均受同一组方位元素影响的情况显然是不同的。

航空扫描图像的几何特征与框幅式摄影图像的几何特征不同，与卫星扫描图像也不同。卫星平台的运动轨迹、姿态等的变化是缓慢地简单地变化，可以用简单的模式表达的变化。因此，用一个简单的几何模式表达航空扫描图像坐标与地面对应点的地理坐标间的关系是不现实的。

尽管如此，不妨进一步分析一下。对于一根扫描线而言，旋转棱镜的旋转周期的 1 / 4 为有效数据采集时间，按前述参数每根扫描线有效扫描时间为 0.01 秒。这期间飞机平台运动了 1 / 4 个像元间隔，即 2.25m。飞机平台姿态变化的周期应该说远大于 0.01 秒。因此把一条扫描线作为姿态不变的一个单元应是可以的(图 4)。一条扫描线的每个像元与地面相应点间的关系，可以认为具有同一套姿态参数的中心投影关系(图 5)。

---

①见参考文献[2]。

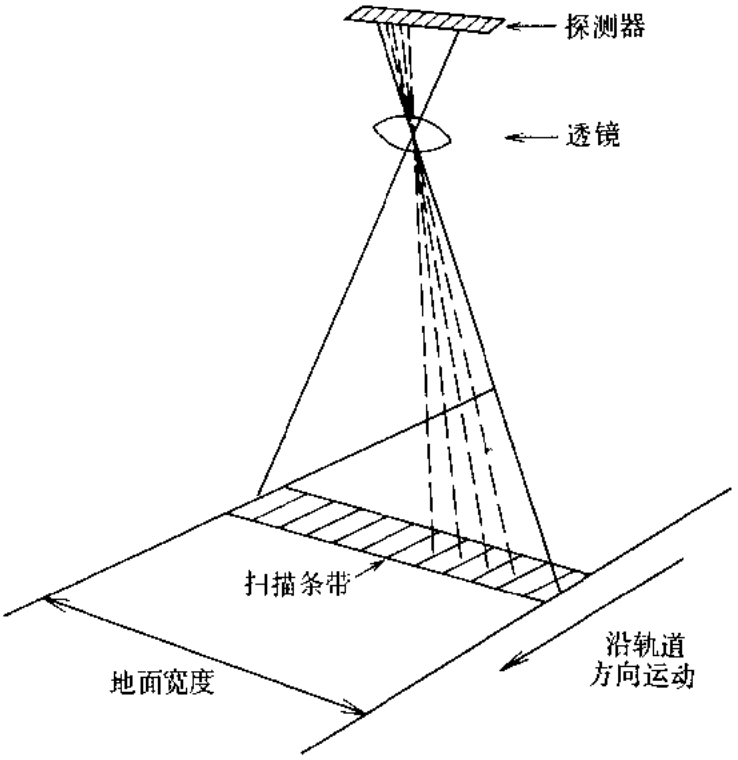



图 4

航空扫描仪旋转棱镜是 360° 旋转形式。与卫星 MSS(1,2,3,4 号) 的振动式摆动扫描方式不同，振动的棱镜由振动曲线来控制其在各点的速度,存在不等速扫描问题。一般振动曲线为三次多项式曲线[1]。航空扫描仪 360° 旋转棱镜可认为是在 90° 范围采集数据期间是匀速运动。不必考虑每根扫描线的各像元的扫描不等速改正。这样航空扫描图像每根扫描线作为一个处理单元是可行的，这根扫描线的各像元可用同一个投影中心的六个方位元素 $(X_0,Y_0,Z_0,\varphi,\omega,\kappa)$与地面相应采样点间用中心投影的共线方程建立对应关系。

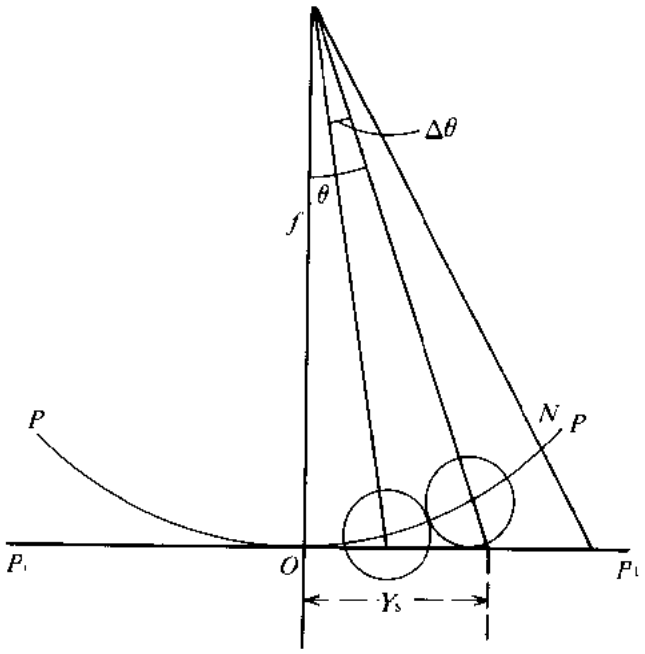



图 5

[1] 见参考文献[4]。

## 二、模式及其分析

卫星扫描图像(MSS，TM 等)常用的几何模式有如下几种:

1、完全二元三次多项式

$$\begin{cases} X = c_0 + (c_1 x + c_2 y) + (c_3 x^2 + c_4 xy + c_5 y^2) + (c_6 x^3 + c_7 x^2 y + c_8 xy^2 + c_9 y^3) \\ Y = d_0 + (d_1 x + d_2 y) + (d_3 x^2 + d_4 xy + d_5 y^2) + (d_6 x^3 + d_7 x^2 y + d_8 xy^2 + d_9 y^3) \end{cases} \tag{1}$$

2、定向参数为时间$t$(或扫描带)的多项式函数的共线方程式

$$\begin{cases} \varphi = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \\ \omega = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \\ \kappa = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 \\ X = d_0 + d_1 t \\ Y = e_0 + e_1 t \\ Z = f_0 + f_1 t \end{cases} \tag{2}$$

式中:$a,b,c,d,e,f$为待定系数。

$$\begin{cases} x = -f \cdot \dfrac{a_1(X - X_0) + b_1(Y - Y_0) + c_1(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)} \\ y = -f \cdot \dfrac{a_2(X - X_0) + b_2(Y - Y_0) + c_2(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)} \end{cases} \tag{3}$$

式中: $a,b,c$为方向系数。

3、分块多项式

$$\begin{cases} X = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x \cdot y \\ Y = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x \cdot y \end{cases} \tag{4}$$

取控制点组成三边形或四边形,在图形中依(4)式建立射影对应,逐块处理。

4、系统纠正加仿一次式射影对应变换①

这种方式利用卫星姿态及地理位置记录数据及轨道偏角先做系统纠正之后利用(4)式做最后纠正，范围是全景或需要纠正区域而不是"3"中的三个控制点、四个控制点内的纠正。

以上这些模式运用之前均需首先作正切改正，如图 5 所示把$PP$弧面上的像元数，扫描线数归算到$P_1P_1$平面上$x,y$坐标,使用下述简单的公式:

$$Y_s = f_x \cdot tan((IR_1 - (IN + 1)/2) \cdot \beta) \tag{5}$$

① 见参考文献[5]。

卫星扫描图像可用上述任一种模式做几何处理均可得到满意的结果。航空扫描图像直接用(1)式，往往控制点中误差是不能容忍的偏大(或发散)。直接用(2)、(3)式,则因定向参数与时间$t$之间并非(2)式所示的多项式函数关系。从图 6 可以看出$Y_0$,$Z_0$线元素随时间变化的曲线用 $t$的一次式是不能描述的。用一元多项式同样不能表达其变化曲线。图 6 是十张与扫描仪准同步的航空相机获取的像片用空间后交得到十组方位元素值，用所在扫描线数分别与各方位元素值用三次样条拟合的曲线。同时插求出地面控制点所在扫描线投影中心的方位元素值。图 6 中"o"为地面控制点所在扫描线的投影中心位置。这六条曲线的组合的结果，可知影像变形是很复杂的。从图 6 也可看出航向方向的变形是不大的。直接使用(2),(3) 式是不实际的。

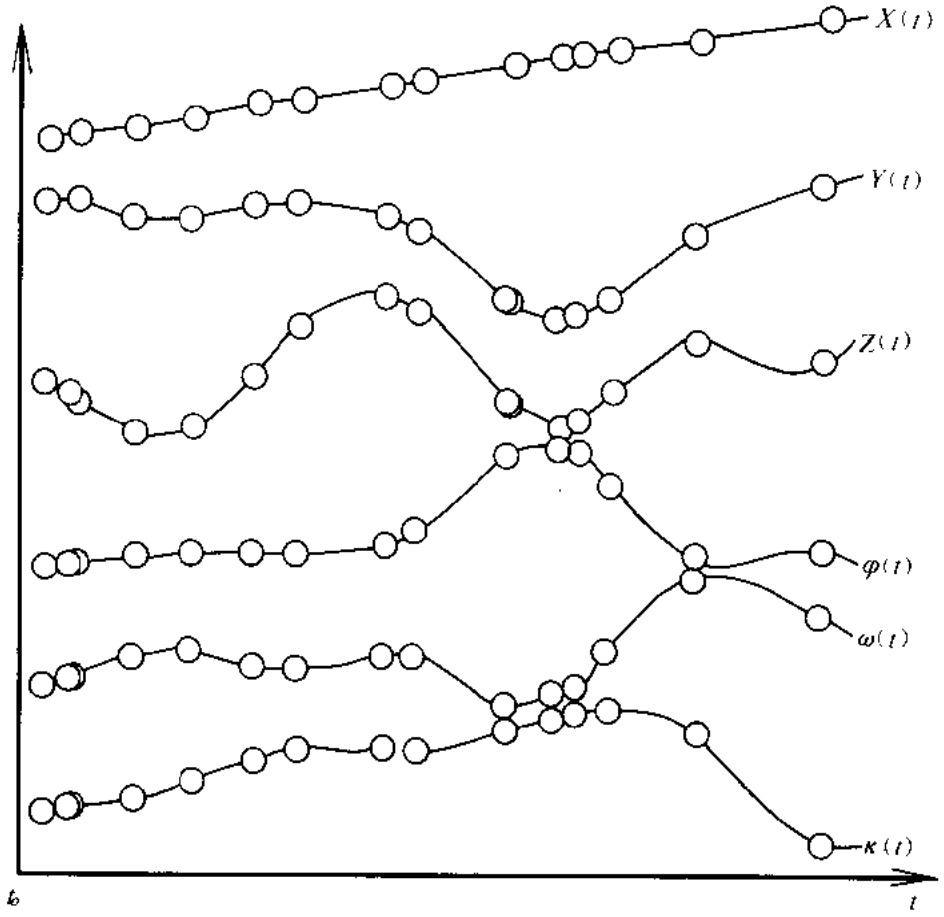



图 6

直接应用(4)式的可能性是存在的。即把扫描影像按地面控制点分割成 n 个三角形的"元",在"元"中用三个地面控制点的地面坐标$(x,y)$与三个点的影像平面坐标$(x',y')$用(4)式建立射影对应关系。同时实现$(I,L)$与$(x',y')$间的正逆变换。其搜索过程为:将三角形三顶点按$X$方向排队,各个三角形$X$最大的顶点间也按$X$方向排队，列出多个边界条件，即可自动搜集地面任意点$(x,y)$所应在的三角形，继而用这个三角形的变换系数求得$(x',y')$,继而求得扫描图像坐标$(I,\ L)$。

图 7 为用(4) 式按上述内插方法试验结果之一部分。图 7 中"o"符号为地面控制点。"·"符号为地面直线状排列的地面点按(4)式内插的结果。这直线状地物在扫描影像上成弧形排列，经内插后仍然是弧状。其中Ⅱ-0 点至ⅩⅩⅢ-0 点间为 234 根扫描线间隔。

由图 7 试验结果可知，用 (4)式内插效果不好。原因在于控制点间距大。且未分布在变形控制部位上。用 (4)式按前述方法纠正航空扫描图像是有可能的,但据试验结果,地面控制点间距应在 25 像元 25 根扫描线以内，这是很苛刻的。

第四种模式建立在有投影中心地理位置和姿态记录参数的基础上，卫星扫描图像未纠正 CCT 中有记录，且要经过一次拟合内插求得每条扫描带的地理坐标和姿态参数。航空扫描图像至今尚无此数据记录。但给我们以很重要的启迪。

据上分析及试验验证结果表明，航空扫描图像的几何模式，应是一个复杂的模式，应是一个模式集。即综合使用几种模式，增加辅助数据。为此建立了一套简单的数据获取系统。

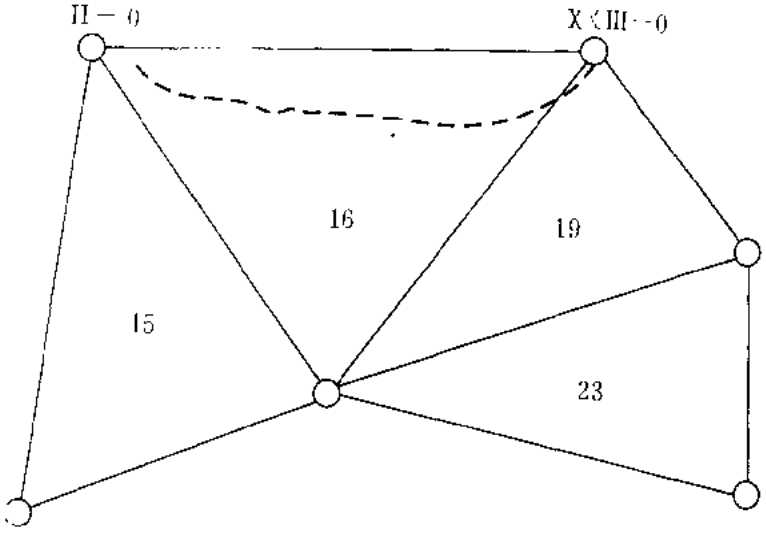



图 7

## 三、数据获取及综合模式

由前述，每根扫描线在扫描采集数据时同时记录投影中心的姿态角($\varphi$，$\omega$，$\kappa$)及地理位置($X_0$,$Y_0$,$Z_0$)时，扫描图像的几何纠正是不困难的，主要在于记录的精度及每根扫描线均记录的可能性。

目前在飞机平台上作上述数据记录列举三种。第一，惯性导航数据传输到扫描仪的记录器中作为辅助数据记录。第二，扫描仪发出脉冲定时启动小相幅、廉价航空相机的快门，即扫描仪与航空相机匹配。第三，航空 GPS 的使用，与扫描仪匹配，以 GPS 的数据作为扫描图像的辅助数据。

1、惯性导航数据

惯性导航数据与扫描仪匹配在技术上没有困难,国内已经实现。由于惯性导航数据记录的周期为 100 毫秒。以 25 转／秒的扫描仪为例，每根扫描线扫描周期为 10 毫秒。因此，做到每根扫描线均有惯性导航数据记录是不可能的。8 转／秒的红外多波段扫描仪，每两根扫描线有一组惯性导航数据是较现实的。

惯性导航数据标称记录精度为:经、纬度:0.01 分; 偏航、倾角: 0.2 °,这精度是不高的。

惯性导航系统在赛斯纳Ⅱ型高空遥感飞机上已与 RC-10A 航测相机联机。其输出在 RC-10A 相机的底片框上，底片上以数字显示。如图 8 所示。上一排依次为经度、相对航高 (英尺单位)、航迹角 (真航向与偏流角二者的代数和)、俯仰角、倾斜角 (400 度制标准)。下一排为纬度、摄影时刻、日期、代号。

惯性导航记录数据与扫描仪匹配的可行性在于惯性导航记录数据的精度。

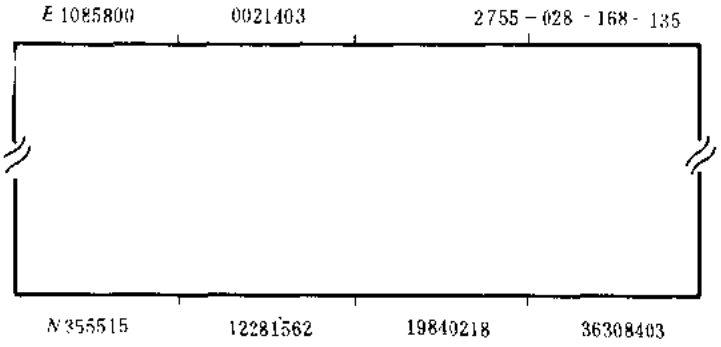


图 8

2、扫描仪与航空相机的匹配

航空相机是指廉价的小相幅相机。如国产航甲 1110 等。这类相机性能尚可，价廉(千元级设备)。采用 7cm 宽的胶片，一次装片 19m 摄取 200 张像片。主距$f = 100mm$。曝光间隔可从 0.7 秒至 16 秒。安全最小间隔为 2 秒。扫描仪以一定时间间隔发出脉冲启动相机快门曝光，同时扫描仪把发出脉冲时刻作为辅助数据记录。摄取的像片用空中后交法求出像片的方位元素作为同时刻扫描线投影中心的方位元素。

惯性导航记录数据与像片空中后交求得数据均为扫描图像的姿态与地理位置，这两类获取的数据均与扫描仪扫描时间$t$相对应。即方位元素的变化是时间$t$的函数，或扫描线数$L$的函数。

$$A(j) = f_j(L_i) \qquad (j = 1,2,\cdots\cdots 6;\quad i = 1,2,\cdots\cdots,n)$$

六个方位元素分别与相应的$L$作成 n 个控制数据点。每个方位元素均可用三次参数样条函数将 n 个控制数据点拟合并插出每根扫描线投影中心的方位元素值。已读取了地理坐标$(x,y,z)$和扫描图像坐标$(I,L)$的地面控制点按其$L$值在上述插值过程中求得所在$L$根扫描线投影中心的方位元素值。现把使用的公式列于后:

空中后交按(3)式:

$$\begin{cases} x = -f \cdot \dfrac{a_1(X - X_0) + b_1(Y - Y_0) + c_1(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)} \\ y = -f \cdot \dfrac{a_2(X - X_0) + b_2(Y - Y_0) + c_2(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)} \end{cases}$$

正切改正按(5)式:

$$Y_s = f_x \cdot tan((IR_i - (IN + 1)/2) \cdot \beta)$$

三次样条插值函数如下式:

$$S_j(t)=y_j f_0(t)+y_{j+1}f_1(t)+b_j h_{j+1}\delta_0(t)+b_{j+1}h_{j+1}\delta_1(t)$$

$$=\begin{bmatrix} f_0 & f_1 & \delta_0 & \delta_1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} y_j \\ y_{j+1} \\ b_j h_{j+1} \\ b_{j+1}h_{j+1} \end{bmatrix} \tag{6}$$

其中:$f_0(t)=1-3t^2+2t^3$

$f_1(t)=3t^2-2t^3$

$\delta_0(t)=t-2t^2+t^3$

$\delta_1(t)=-t^2+t^3,\qquad t=\dfrac{x-x_j}{h_{j+1}},\qquad h_{j+1}=x_{j+1}-x_j$

$x_j,y_j$ 为控制数据点坐标值。$f_0,f_1,\delta_0,\delta_1$ 为调配函数。

增加控制数据点处二阶导数连续条件:

$\lambda_j b_{j-1}+2b_j+u_j b_{j+1}=D_j \qquad (j=2,3,\cdots\cdots,n-1)$

其中:

$\lambda_j=\dfrac{h_{j+1}}{h_j+h_{j+1}}$

$u_j=1-\lambda_j=\dfrac{h_j}{h_j+h_{j+1}}$

$D_j=3(\lambda_j\dfrac{y_j-y_{j-1}}{h_j}+u_j\dfrac{y_{j+1}-y_j}{h_{j+1}})$

将端点条件加入，端点条件为:

$$2b_1+u_1b_2=(4-u_1)u_1\frac{y_2-y_1}{h_2}-(2-u_1)u_1\frac{h_2y_1''}{2}+(2-u_1)(1-u_1)y_1'$$

$$\lambda_n b_{n-1}+2b_n=(4-\lambda_n)\lambda_n\frac{y_n-y_{n-1}}{h_n}+(2-\lambda_n)\lambda_n\frac{h_ny_n''}{2}+(2-\lambda_n)(1-\lambda_n)y_n'$$

将这两个式子右端记为$D_1$ 和 $D_n$ 组成一阶导数$b_j$ $(j=1,2,\cdots\cdots,n)$的$n$个方程，写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} 2 & u_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \lambda_2 & 2 & u_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_{n-2} & 2 & u_{n-2} \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & \lambda_{n-1} & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdots \\ \cdots \\ b_{n-1} \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \cdots \\ \cdots \\ D_{n-1} \\ D_n \end{bmatrix} \tag{7}$$

按(6)(7)式求得每个地面控制点所在扫描线投影中心的方位元素。假若所求方位元素确是扫描线投影中心采样时的方位元素，那么按常规航测理论作各种角元素的误差改正及地形高差改正即可得到扫描影像坐标与地面地理坐标间的对应关系模式。但是，方位元素的误差得不到消除，整体平差尚需适当的模式。为此，采用方位元素影响的变形改正方式。即以线元素中$Y_0$取均值作为归算方向，计算每条扫描线投影中心$Y_0$坐标的归算值$y'_0$，以此$y'_0$和另 5 个方位元素和地理坐标求算地面控制点的归算像元值$I'$。用影像坐标归算值$(I',L)$，按公式(1)建立与地面地理坐标间的对应关系，即使用下式：

$$\begin{cases} X = c_0 + (c_1 L + c_2 I') + (c_3 L^2 + c_4 L \cdot I' + c_5 I'^2) + (c_6 L^3 + c_7 L^2 \cdot I' + c_8 L \cdot I'^2 + c_9 I'^3) \\ Y = d_0 + (d_1 L + d_2 I') + (d_3 L^2 + d_4 L \cdot I' + d_5 I'^2) + (d_6 L^3 + d_7 L^2 \cdot I' + d_8 L \cdot I'^2 + d_9 I'^3) \end{cases} \tag{8}$$

用最小二乘法求得(8)式中的$c,d$系数，建立影像坐标与地面坐标间的对应关系式。(8)式$I',L$是经正切改正及归算改正之后的影像平面坐标。

以 $I$ 与 $I'$之差再次运用(7)式作三次样条插值，求算每根扫描线的归算影像$I$的改正数，即可用(8)式的系数$c,d$实现与地面坐标间的对应。

上述惯性导航数据及像片空中后交数据作为扫描图像的辅助数据的数据采集及综合模式系统，其可信度取决于匹配精度和同步的时间间隔。诚然，惯性导航及空中后交所得数据的精度也是不容忽视的因素。匹配精度，一般说较易满足。同步间隔固然是每根扫描线都有辅助数据最好。实际上惯性导航数据至少其间隔要 100 毫秒，航测相机至少要 0.7 秒或安全间隔 2 秒。

3、利用地面直线状地物的纠正模式

一般说来平原、发达地区，地面直线状地物较多。如公路，人工渠道，乡村路等。利用直线状地物在扫描图像上的变形影像，选取变形特征点，取得其影像坐标$(I, L)$。地面直线状地物极易得到直线的方向角 $\beta$。这一块图像的大致方向角 $\alpha$ 可由这块图像两端的控制点求得。以 $\gamma=\alpha+\beta$ 作为该地面直线状地物的归算方向。如图 9 所示，图中"Δ"为地面控制点的影像，$AB$为地面直线状地物，其在扫描图像上对应的变形影像为 $A'B$，其归算方向以 $B'B$表示。

在 $A'B$上选取若干个能表示其变形特征的影像点$(I,L)$。用(6)、(7)式作三次样条函数插值，插出每根扫描线的像元数。与 $A'B$之差作为改正数。地面控制点的影像对应点落在这段内时，也同时内插出其像元数求出其改正数。一景扫描图像中选取几段地面为直线状地物的变形影像，相互衔接以覆盖全景影像。按上述求出每条扫描线的改正数，实际上已对这景影像作了一次变形纠正。

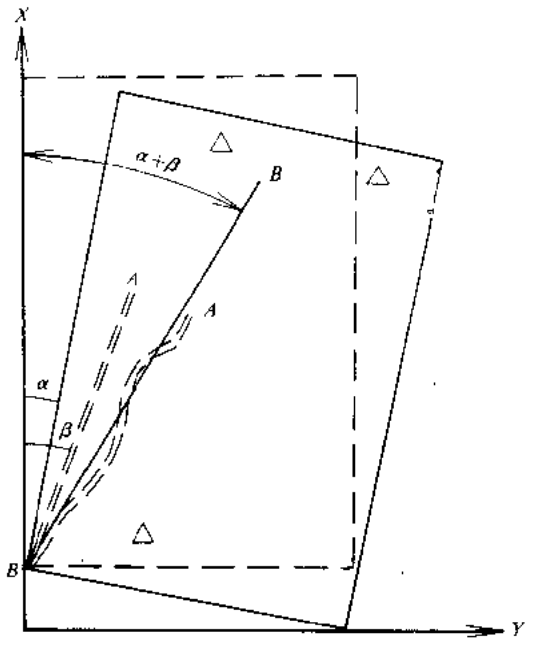


图 9

将变形纠正过的地面控制点的地理坐标 $(x,y)$ 和 $(I',L)$用(8)式依最小二乘法求系数 $c,d$。建立了变形纠正影像与地面坐标间的对应关系。这种纠正主要纠正了扫描方向的变形，由前述知航向方向的变形较之扫描方向小。剩余的变形用完全二元三次多项式纠正。这同样是一种可行的方法。

通过上述可知，已列几种模式在作航空扫描图像几何纠正时均需多个模式组成综合模式组才能够建立扫描影像与地面坐标间的对应关系。综合模式组中模式的个数又与辅助数据获取方式有密切关系。

## 四、试验结果及其分析

1、惯性导航记录数据的精度试验

使用资料为 13 张 RC-10A 摄取的航空像片，资料情况为:

地　　区:河南省开封市

摄影时间:1984 年 3 月 25 日 12 时

机　　型:塞斯纳Ⅱ型高空遥感飞机

航　　高:775～950m

片　　号:4379～4391　共计 13 张

从 1:1 万地形图上选取 37 个控制点，平均每张像片上至少有 5 个地面控制点。一般为 6—7 点。控制点分布如图 10 所示。图 10 中"o"为像片投影中心位置,"Δ"为地面控制点。按空中后交求得每张像片六个方位元素。

图 8 中所示的经度、纬度按"测量计算用表集(一)"中之换算格式换算为高斯-克吕格地理坐标。航高由英尺换算为公尺，角元素由 400 ° 制换算为 360 ° 制。

从空中后交结果得知:

$\varphi$max : 15.2 °　　$\varphi$min : −10.7 °

$\omega$max : 6.9 °　　$\omega$min : −6.9 °

$\kappa$max : −9.2 °　　$\kappa$min : −29.4 °

航高 $H$从 765m～ 922.2m。因是试验飞行，六个方位元素变化均很大。应该说这类资料避免了惯性导航系统的迟滞现象对记录数据精度的影响，这对于惯性导航记录数据的精度检验是非常有利的，增加了随机性。

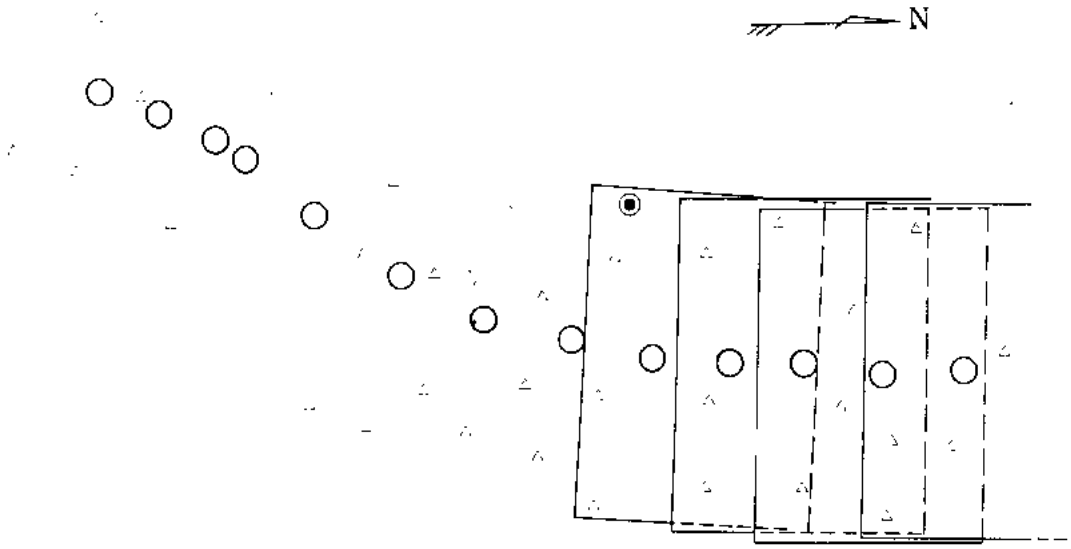



图 10

表 1

| No. | Dx | Dy | D2 |
|---|---|---|---|
| 1 | −20.81 | 7.10 | −13.419 |
| 2 | 12.67 | 32.61 | −18.90 |
| 3 | 4.45 | 9.54 | −19.94 |
| 4 | 13.13 | 19.05 | −18.70 |
| 5 | 15.06 | 5.36 | 27.08 |
| 6 | −15.76 | −27.43 | −104.30 |
| 7 | −9.05 | 14.13 | 14.90 |
| 8 | −4.12 | −15.97 | 18.90 |
| 9 | 1.90 | −6.69 | 23.50 |
| 10 | −3.17 | 16.94 | 29.15 |
| 11 | 22.59 | −20.24 | 18.90 |
| 12 | 1.15 | −14.70 | 20.20 |
| 13 | −18.01 | −19.67 | 22.60 |

Mx = 12.98　　My = 17.12　　Mz = 35.25

现仅取方位元素中的三个线元素$X_0, Y_0, Z_0$作比较。剔除惯性导航系统的定标误差,得表 1 结果。以空中后交算得数据作为真值计算。

从表 1 可知，惯性导航记录数据作为已知方位元素而用于测制地形图其精度是不够的。即使把空中后交精度考虑进去，也得不到有益的改善。在荒漠、人烟稀少、地形图缺乏地区，惯性导航记录数据可起到宏观控制作用。当然，试验所用控制点取之于 1／1 万地形图。地形图比例尺偏小，使试验结果的可信度有所降低。但误差之大早超过地形图比例尺小的影响。一般地区利用惯性导航记录数据作区域控制及发现航迹的拐点，对其后的扫描图像的几何处理也将是有益的。

表 2

| No. | NAME | Dx | Dy |
|---|---|---|---|
| 1 | 13–0 | 13.1 | −11.1 |
| 2 | 20–5 | −8.9 | 7.9 |
| 3 | 21–4 | 1.6 | 15.0 |
| 4 | 11–0 | −14.0 | −3.5 |
| 5 | 23–2 | −2.0 | −0.3 |
| 6 | 07–0 | 1.2 | −10.4 |
| 7 | 18–1 | 6.7 | −17.9 |
| 8 | 15–0 | 4.6 | 5.2 |
| 9 | 18–4 | −5.7 | 21.0 |
| 10 | 02–0 | 14.4 | 29.7 |
| 11 | 20–3 | −17.6 | −13.3 |
| 12 | 18–7 | −1.1 | −15.4 |
| 13 | 16–2 | 8.1 | −21.3 |
| 14 | 08–0 | 0.7 | 15.3 |
| 15 | 10–0 | −9.2 | −36.1 |
| 16 | 03–0 | 9.9 | 42.5 |
| 17 | 18–5 | −1.9 | −7.3 |

$W_x = 8.82251$　　$W_y = 19.4954$

2、扫描仪与航空相机匹配试验

试验要素为:

日期:1984.3　　机型:伊尔−14

相机:航甲 1110　　扫描仪:DGS−1 型

航高:3000m　　地区:河南潘店

脉冲间隔:5 秒

扫描仪获取的模拟磁带由遥感所 NOVA−840 计算机及扫描数字化器转换为 CCT,同步航空像片为彩红外像片。取其中 30 张像片在 1:1 万地形图上选取地面控制点,按空间后交法求得这 30 张像片投影中心的各 6 个方位元素。其中连续 10 张像片方位元素变化曲线示于图 6。

依前述用三次样条函数(6)(7)式内插出每个地面控制点所在扫描线投影中心的方位元素，按 $Y$ 平均值的归算方向及其它 5 个方位元素求得改正后像元数，按(5)式作正切改正求得影像平面坐标，利用(8)式依最小二乘法求得变换系数 $c,d$。建立了影像坐标与地面坐标间的对应变换关系。在地面控制点上的残差及残差中误差示于表 2。

从计算结果看出，控制点上残差中误差是比较大的。飞行方向最大到 2 个像元，

扫描方向大到约 5 个像元。飞行方向残差中误差为 8.8m，扫描方向残差中误差为 19.5m。这对于专题制图的数学基础其精度是不够的。其原因:

第一，由于是第一次试验，没有得到扫描仪与航测相机同步取样时的时间$t$。仅根据图像边缘的白色线条标志 (每 4 次同步取样 ,给一个标志 )估算投影中心所在的扫描线数，这是不准确的。

第二，同步间隔为 5 秒，时间间隔太长。航摄像片的方位元素不能完全表达传感器姿态变化。如图 11 所示。图 11 中 A 曲线为地面上与飞行方向近乎平行的直线状地物在扫描影像上的形状。B 为像片投影中心的位置。"o"为像片投影中心。可以看出，A,B 的大的趋势是一致的(变形与投影中心位置变化相反)。但 5 秒间隔的投影中心位置变化曲线不能反映传感器位置变化的细节。

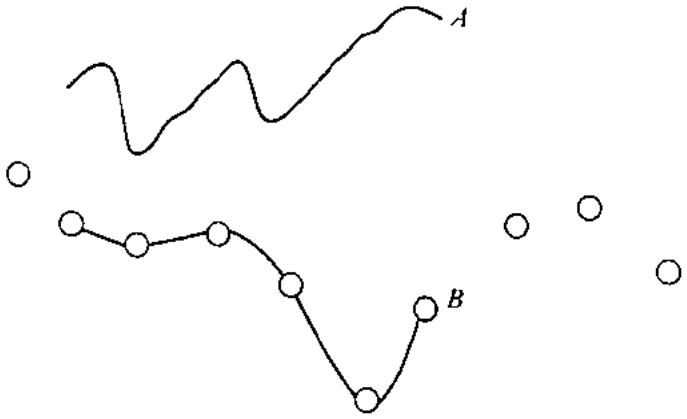



图 11

第三，由于首次试验，扫描仪在空中采样时单独作了某些改正(改偏流、置平、侧滚修正),这样航摄像片算得的角方位元素只能是飞机平台的角方位元素，而不能用于扫描图像的改正。即图 11 中的 B 仅是投影中心的$X$，$Y$变化(位置)曲线。

尽管如此，用$X_0$,$Y_0$,$Z_0$三线元素作纠正，得到了图 12 所示的结果。图 12 中 A−B 为地面直线状地物上的两控制点连线，(b)为用线元素作改正的改正量。(a)中实曲线为地面直线状地物的影像直接按多项式系数算得的地面坐标曲线。虚线为经三线元素改正像元数后得到的多项式系数，将影像算得地面坐标的曲线。显然虚线更接近于 AB，可证明是起到了纠正作用。

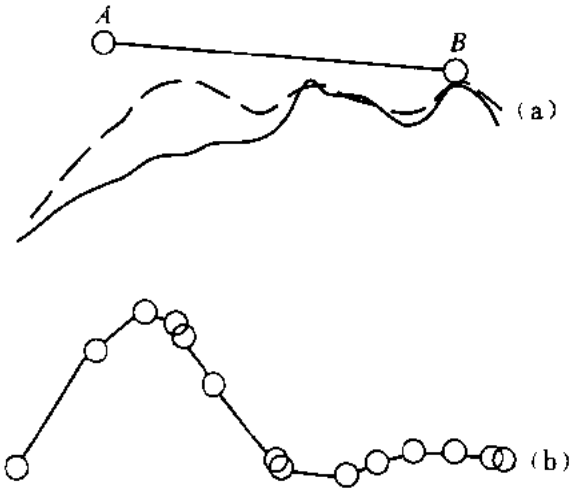



图 12

3、利用地面直线状地物的纠正试验

试验用资料与“2”中所用资料相同。选扫描图像上地面为直线状地物的影像。按“三”之“3”所述方案试验之。

表 3

| No. | NAME | Dx | Dy |
|---|---|---|---|
| 1 | 13–0 | −10.39 | 12.64 |
| 2 | 21–4 | 13.76 | −1.47 |
| 3 | 20–5 | −10.97 | −9.88 |
| 4 | 23–2 | 9.11 | −3.12 |
| 5 | 11–0 | 12.08 | −9.04 |
| 6 | 07–0 | −11.29 | 4.24 |
| 7 | 18–1 | 1.47 | 11.25 |
| 8 | 15–0 | 1.57 | 1.75 |
| 9 | 18–4 | −5.58 | −8.71 |
| 10 | 02–0 | −3.78 | 3.62 |
| 11 | 18–7 | −6.02 | 1.55 |
| 12 | 20–3 | 4.74 | −11.42 |
| 13 | 16–2 | −8.95 | 10.16 |
| 14 | 08–0 | 13.24 | −3.23 |
| 15 | 10–0 | −5.06 | 2.07 |
| 16 | 16–1 | 6.17 | 7.42 |
| 17 | 03–0 | 4.52 | −8.13 |
| 18 | 18–5 | −4.61 | 0.29 |

$W_x = 8.31117$　　$W_y = 7.30156$

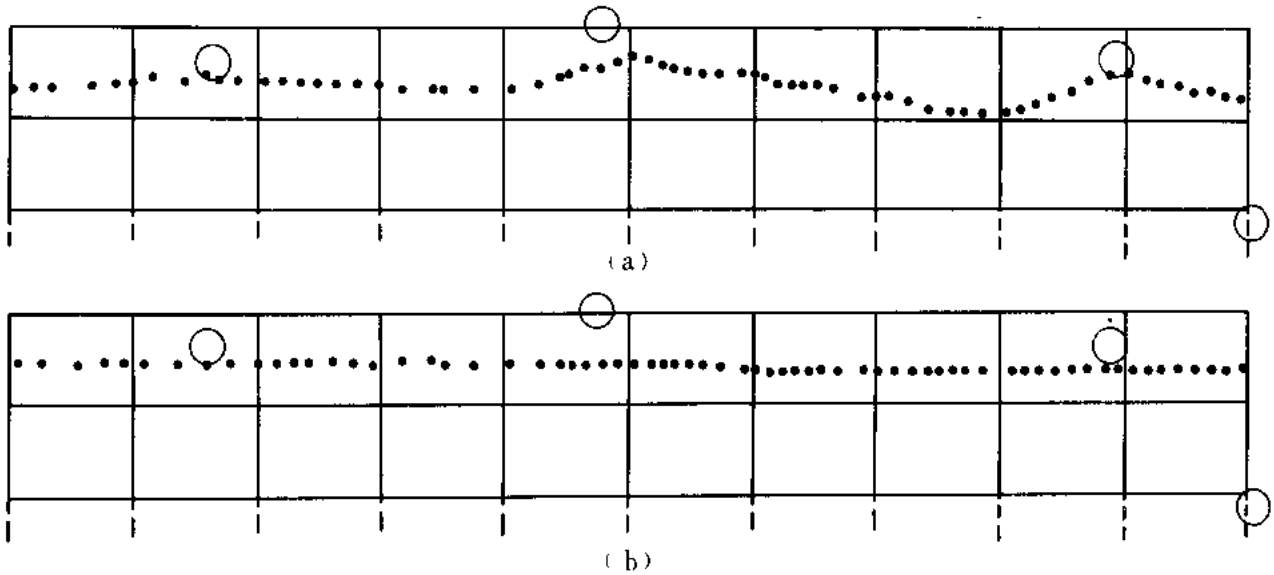



图 13

地面直线状地物的影像,按其曲率变化,疏密地读出其变形特征点的影像坐标$(I,L)$,用(6)(7)式按扫描线数插出相应变形部位的像元数，也包括该范围内的地面控制点。按图 9 中$B'B$方向与$A'B$之差作改正数得到改正后像元数，经(5)式正切改正后得到影像平面坐标$(I',L)$。按(8)式将地面控制点的地理坐标$(X,Y)$与影像平面坐标$(I',L)$用最小二乘法求得变换系数$c,d$。收敛计算结果示于表 3。

从表 3 可知飞行方向地面控制点上残差中误差为 8.3m，扫描方向为 7.3m。每个像元地面采样面积的直径为 9m。将残差中误差换算为像元数则:

$$M_x = 0.92 \text{ 线} \qquad M_{xmax} = 1.53 \text{线}$$
$$M_y = 0.81 \text{ 像元} \qquad M_{ymax} = 1.4 \text{像元}$$

地面直线状地物的变形影像，不作变形改正，仅作正切改正按三次多项式(1)求得$c,d$系数从而计算出变形影像的地面坐标得出如图 13(a)所示结果。变形改正后得到的计算结果示于图 13(b)。图 13 中“ o”为地面控制点，“ • ”为计算得到的变形影像的地理坐标位置。明显看出用变形改正的方法取得了比较满意的纠正效果。

## 五、再采样

前已述，据(8)式已建立了改正后的影像平面坐标$(I',L)$与地面坐标间的对应关系。显然，$I'$并非地面控制点的真正影像坐标$I$。实现几何纠正的最终表现应是影像上每个影像点$(I,L)$,有其对应的地面坐标$(X,Y)$(所谓正变换),或者对应范围内地面上的任意一点$(X，Y)$均可找到与其对应的影像点$(I,L)$(所谓逆变换 )。一般习惯于按地理坐标系格网点坐标作逆变换将对应的像元按地理坐标格网排列形成地图化的影像图。这个过程即所谓的再采样的过程中,逐点变换计算量是很大的，尤其直接应用 (8)式每个点至少要作十次乘法运算，九次加法运算。加之 I 到 I'的计算，这是很不经济的。为此，采用分小区射影变换的方式进行，即用 (8)式等做少量小区四个角点的计算，小区内部则用简单的射影对应关系作线性或仿线性变换，即少量四角点用严密方法计算，大量的小区内的点则采用简单的射影变换以大大节省计算时间。

图 14 是以 50 像元、50 条扫描线的间隔按 (8)式计算得到的影像点地面位置分布图。图中“Δ”为地面控制点位。从图 14 可以看出影像变形是很大的。在每个四边形范围内以四个角点的变形改正后影像坐标(I',L)和按 (8)式算得的四个角点的地面坐标计算值 $(x,y)$间建立射影对应关系。

$$I' = (IN+1)/2 + TAN((I + ZM(II)) - (IN+1)/2) \cdot DILS) \cdot Z_0 \tag{9}$$

$$\begin{cases} I' = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy \\ L = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 xy \end{cases} \tag{10}$$

式中: $IN$:为一条扫描线包含的像元数

$DILS$: 为扫描仪瞬时视场角

$Z_0$：为航高

$ZM(II)$：为变形改正量

由(10)式求$I'$而计算$I$时：

$$I = ATN(((I' - (IN+1)/2)Z_0 TAN(DILS))/Z_0)/DILS + (IN+1)/2 - ZM(II) \tag{11}$$

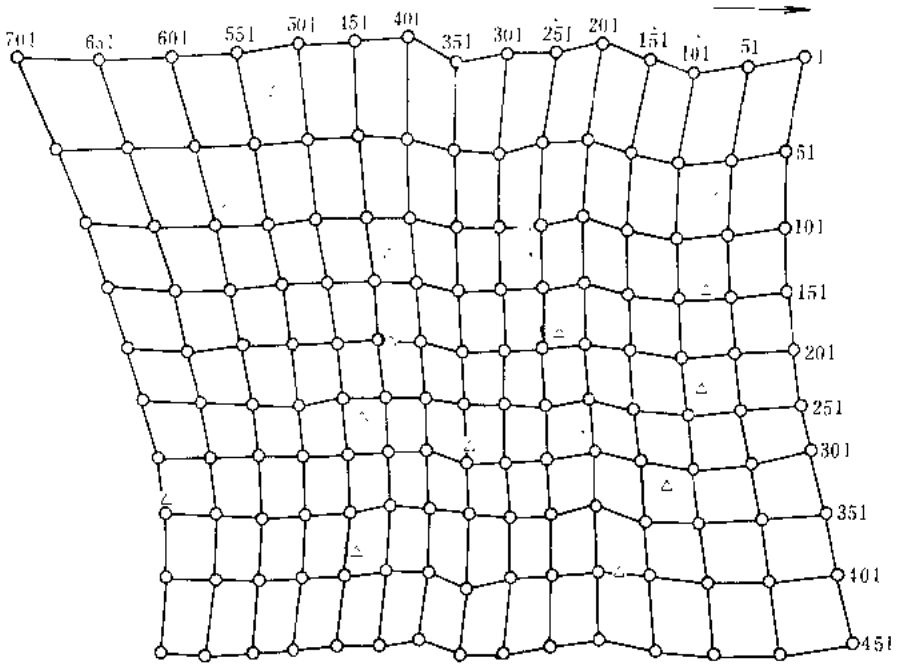



图 14

给出一个点的地理坐标$(x,y)$即可按(10)式算得该点的改正影像平面坐标$(I',L)$。由(11)式可反算得到影像坐标$(I,L)$。

卫星影像的情况下，(10)式取三项即可，即线性变换。航空扫描图像变形较卫星大得多，为此用了第四项。问题在于这种四边形的边长取何值方可在预定精度范围内用(10)式变换。这是需要分析的问题。分三种情况作了试验。

第一种情况。$I$间隔 100 像元，$L$间隔 100 根线。如图 15 所示。四边形$N_1$由影像坐标点$A(1,1),B(101,1),C(1,101),D(101,101)$四个点构成。$N_2.N_3$..... 依次类推。每个四边形按 (9),(8)式算得四个点的地面坐标$(x_i,y_i)(i=1,2,3,4)$。(9)式算得的$I'$及$L$与$(x,y)$按(10)式求得$I',L$各四个系数$a_i,b_i(i=0,1,2,3)$。

同样方法求出图中 1,2,3,4,5 点的地理坐标$(xx_i,yy_i)$ $(i=1,2,.....5)$。将$xx,yy$按(10)式的系数$a_i,b_i$求得对应的$(I',L)$。按(11)式求得$(I,L)$，将此$(I,L)$与原 1,2,3,4,5 点的影像坐标比较得出如下结果(按 70 个点计算)：

$M_I = 2.416$像元

$M_L$ = 2.394线

$M_{Imax}$ = −12像元

$M_{Lmax}$ = −7线

可见结果是不能令人满意的。

第二种情况:以原图像 25 像元、25 条扫描线间隔,依前述方式计算地面坐标。以 50 像元、50 根扫描线间隔的点作为图 15 中的$A,B,C,D$点。等分间隔点 (25 像元、25 条线间隔 )作为图 15 中的 1,2,3,4,5。以 $A,B,C,D$四点求(10)式系数,以 1,2,3,4,5 作为检查,共检查 140 个点结果为:

$M_I$ = 1.531 像元　　$M_{Imax}$ = −15.2像元

$M_L$ = 0.595 像元　　$M_{Lmax}$ = 1.7像元

这个结果也是不能令人满意。

第三种情况:如第二种,但在求(10)式系数时使用$A,B,C,D$,1,2,3,4,5 共 9 点用最小二乘法求算四个系数,同时在这 9 个点上统计残差中误差。统计 630 个点其结果为:

$M_I$ = 0.029 像元　　$M_{Imax}$ = 0.082像元

$M_L$ = 0.121 像元　　$M_{Imax}$ = 0.461像元

根据上述试验结果,本研究采用 50 像元 50 根线的间隔将全区分成如图 14 所示的小区间,用第三种情况的条件建立各小区间(10)式的变换系数。每个小区间给以编号,给出地面再采样范围最右上角点的地面坐标$(x,y)$,即可从图 14 所示的分布图上找出大致所属小区号码,之后程序自动准确地找到所应在的小区间,用这个小区间的(10)式系数,求得这地面坐标$(x,y)$所对应的变形改正影像平面坐标$(I',L)$,再根据(11)式得出这地面点的影像坐标$(I,L)$。其他地面格网点的计算则由程序自动搜索进行,按最近邻内插法完成几何纠正[1]。

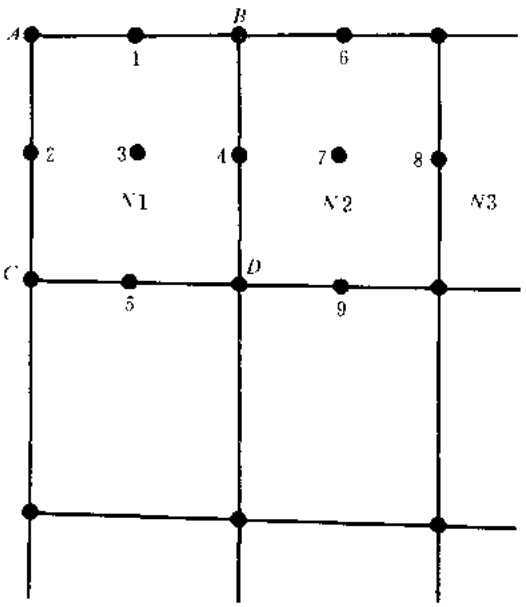



图 15

作为单独的几何纠正,其再采样时的内插方法优先考虑采用最近邻内插法。这是因为:最近邻内插法未破坏像元灰度值,仅是位置的变动。其后的图像处理可根据应用目的作像元灰度值处理。避免几何纠正再采样中与其后应用要求不一致而盲目地破坏原像元灰度值。

由于传感器瞬时视场的限制,每个像元中的灰度信息是地面相应采样面积内电磁波能量的复合值。假若某一有限范围内,地物反射辐射能量的分布可用某种模式描述

[1] 见参考文献[6]。

的话，可以以像元灰度值作为控制数据点构造某种模式时用。这是图像识别，特征提取、分类中考虑的问题。为此，本研究认为双线性内插法，三次卷积内插法除其后的应用目的要求在再采样时使用这些方法外，尽管这两种方法内插精度好，一般采用最近邻内插法为宜。

试验样片 5、6 为用地面直线状地物纠正方案的试验样片,样片 5 为原图像,样片 6 为纠正后图像,纠正后影像大小为 450 像元×701 根线。再采样像元大小为 9m×3m。

## 六、结论及今后的课题

根据上述试验研究结果可以认为：

1. 航空扫描图像几何模式建立,在使用辅助数据时是完全可能的。完全二元三次多项式是变形改正后影像平面坐标与地面坐标变换模式。

2. 利用地面直线状地物变形改正模式在限定条件下可以以中误差为 1 像元以内的精度对航空扫描图像作几何纠正。

3. 扫描仪与航空小相机匹配方式的脉冲间隔以一秒为宜,最长不得超过 2 秒。以这种方式以中误差为 1 像元的精度对航空扫描图像作几何纠正是可能的。

4. 飞机平台的惯性导航系统的记录数据精度比较低，但作为整体图像的控制和反映 100 毫秒～ 200 毫秒内姿态、位置的突变有其作用，作为姿态和地理位置粗纠正时的辅助数据使用是有可能的。

5. 尽管扫描仪与航测相机匹配的试验数据其脉冲间隔为 5 秒,及其不准确，未能得到预想结果，但试验结果表明，可使影像几何质量改善是明显的。

6. 严格本研究数据获取技术,按本研究成果,取得最佳航空扫描图像几何模式从而发展一套航空扫描图像几何处理系统是现实的。

## 参 考 文 献


[1] 李树楷:“卫星多谱段扫描图像 MSS 的定位问题”。地理学报 1984 Vol.39, No.1. P382–396

[2] 星仰:“航空机による MSSの几何学的诸问题に关する考察”写真测量とリモートセンミング”1977.vol 17,No.1 P8–21

[3] G.Konecny:″Mathematical Models and procedures for the GeometricRestitution of Remote Sensing Image″ congress of the I.S.P.,Rep. Ⅲ–1, 1976,7,P.1～33.

[4] 村井俊治、李树楷:“写真测量の原理に基づいたLANDSATMSS 画象の几何补正に关する研究”,写真测量とリモ—とセンミングvol.22, No.4 1983 P24–32

[5] 村井俊治，前田宏:“地球资源卫星 MSSデ—タの几何学的补正に关する研究”东京大学生产技术研究所报告，vol.27,No.5 1978 P161–191

[6] 李树楷:“卫星 MSS　CCT　数据的再采样”

# 遥感适用 DEM 生成模式的研究

李树楷　刘彤　周丽华

[摘要]:以往 DEM 生成模式的研究中，数据获取以摄影测量立体量测方法和人工采集方法居多。从立体模型或地形图上采集地形特征点、断裂点等数据为已知控制数据。内插方法有双线性有限元内插、双三次曲面有限元内插、移动曲面法、多面函数法等[1]。

本研究以地形图为数据源，用通用的数字化设备，稍加指导的辅助人员的操作，依等高线挠度大小，密疏地数字化等高线作为控制数据。用双向三次参数样条函数内插 DEM 格网点的高程，取得了中误差为 1／10 等高距的精度生成 DEM 的试验研究结果。适合于要求周期短、高效率的遥感应用研究中生成 DEM。

[关键词]:三次参数样条函数，数字高程模型，曲线拟合。

## 前　言

DEM 对遥感图像的几何与辐射校正精度的提高，对于计算机图像处理中分类可信度的改善,对于其他资源环境等专题制图图件的制作和分析研究，均是不可缺少的数据源。国内外对 DEM 的研究主要有三个方面:

1、数据采集技术的研究;

2、DEM 生成中内插模式的研究;

3、DEM 的应用研究。

其中"2"、"3"国内外不少学者作了大量的研究工作，取得了很多有益的研究成果。不少生成模式已商品化，如各类解析测图仪中分别配置了 SCOP,SORA,HIFI 等软件以生成 DEM[2]。诚然，"1"、"2"不可分割，其数据采集以地形特征点、断裂点、等高线数据加地形特征点为主要数据采集源。

各种内插方法的精度有两重涵义，一为内插方法本身的精度;另一为所用控制数据的精度。主要取决于控制数据的精度,而高精度的内插方法才能得出高质量的成果。控制数据的获取主要有以下几种:

1、地形图上地形特征点、地性线、断裂点的人工采集方式。

2、地形图上等高线数字化加地形特征点。

3、摄影测量立体测图的副产品。在立体模型量测中取用上述两方式。

---

[1] 见参考文献[1][2][3]。

[2] 见参考文献[7]。

4、地形图上人工读取格网点高程，直接生成第一级 DEM。

上述采集方式中，"1""2"方式需要有读地形图很熟练的专业人员；"3"需要有相应的昂贵设备和专业训练过的操作员；"4"费工费时易出差错，也非一般辅助人员所能胜任。

好的数据采集方法，与所采用的内插方法密切相关、最重要的在于精度好，效率高。控制数据所包含的信息要满足应用目的的需要，数据结构应便于后继的数据处理。短周期、适时性是遥感技术的优点。遥感适用的 DEM 数据采集与生成模式应具有满足遥感应用目的的精度(这个精度可以根据专业目的要求有所变化，一般来说比从 DEM 生成地形图所要求 DEM 生成的精度要低些)，短周期、廉价的优点。

本研究采用已有地形图为数据源，用廉价的数字化设备，稍加指导的辅助人员的操作，仅对等高线数字化及生成模式这两方面作试验研究，以图短周期内生成 DEM，正是本研究的目的。

## 一、基本原理及分析

本研究根据地形图上等高线的挠度大小，密疏地数字化等高线的采样方式，从曲线拟合与插值的思路出发选择 DEM 生成模式。

(一) 一般模式的分析

一条曲线有多种模式可以拟合和插值，如线性插值，抛物线插值，拉格朗日插值，牛顿插值，赫尔米特(Hermite)插值，最小二乘多项式插值，三次样条插值等。等高线这类曲线可以说是汇集了曲线的一切特性,需对已有模式分析之。

1、抛物线插值

抛物线插值称为二次插值。设已知 $f(x)$ 在三个互异的点 $x_1,x_2,x_3$ 的函数值为 $y_1,y_2,y_3$，现要构造一插值函数(图 1):$\varphi(x)=ax^2+bx+c$

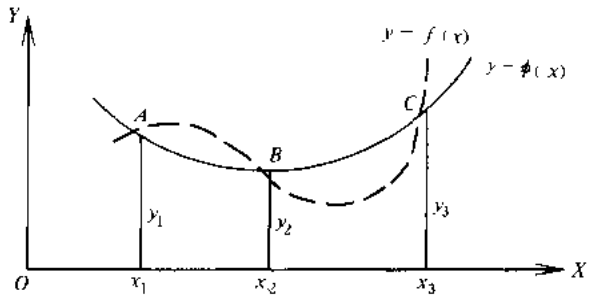



图 1

使$\varphi(x)$在插值点$x_i$处与$f(x)$在$x_i$处的值相等，即:$\varphi(x_i)=f(x_i)=y_i(i=1,2,3)$

这样的函数$\varphi(x)$就是$f(x)$的抛物线插值函数，由图1可以看出通过$A$、$B$、$C$三点的抛物线近似地代替曲线$y=f(x)$。

等高线曲线形态中，采用抛物线插值原理，取用抛物线调配曲线的模式，把每三个点作一抛物线可以拟合等高线，但各曲线段在节点处能作到一阶导数连续，作不到二阶导数连续①。

2、拉格朗日(lagrange)插值法

设$y=f(x)$是定义在$[a,b]$上的一个连续函数，已知其在$[a,b]$上有$n$个互异的有序点.要求构造一个次数不超过$n-1$次的插值多项式$P_{n-1}(x)$顺序通过这些控制数据点来逼近$f(x)$，并符合插值条件$P_{n-1}(x_i)=y_i(i=1,2\cdots\cdots,n)$,可以构造$n$个$n-1$次多项式$L_i(x)$，使

$$L_i(x)=\frac{(x-x_1)\cdots(x-x_i)(x-x_{i+1})\cdots(x-x_n)}{(x_i-x_1)\cdots(x_i-x_{i-1})(x_i-x_{i+1})\cdots(x_i-x_n)}$$

通过$n$个控制数据点，则有$n$个$L_n(x)$,即

$$P_{n-1}(x)=L_1(x)y_1+L_2(x)y_2+\cdots L_n(x)y_n=\sum_{i=1}^{n}L_i(x)y_i$$

称为拉格朗日插值多项式。

$L_i(x)(i=1,2,\cdots\cdots n)$称为拉格朗日基函数或权函数(图2)。

其实质是把$n$个控制数据点$y$坐标的加权平均，每个$L_i(x)$都是$n-1$次多项式，计算量明显增加,每增加一个控制数据点,全部$L_i(x)$均需要重新计算，这也是等高线插值中从效率角度出发所不能胜任的，且多项式次数愈高出现拐点愈多②。

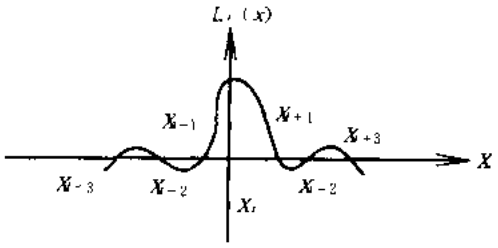



图 2

3、最小二乘多项式逼近与插值

①见参考文献[7]。

②见参考文献[8]。

这是在多种计算中常用的方法，尤其是测量数据的逼近。如有某曲线的一组控制数据点$(x_i,y_i)$ $(i=1,2\cdots\cdots,n)$作为平面上的一组点，要求用一条比较简单的曲线$Y=F(x)$去逼近这批控制数据点。逼近的度量常用方差平方和达到极小，即:

$\varphi=\sum_{k=1}^{n} dk[F(x_k)-y_k]^2$,$\varphi$为极小作为量度标准,其中$dk$为权。这种简单的曲线常取如下形式:

$F(x)=\sum_{j=0}^{m} a_j x^j$ 确定系数$a_j$方差平方和达到极小,即:

$\varphi(a_0,a_1,\cdots,a_m)=\sum_{k=1}^{n} dk[\sum_{j=0}^{m} a_j x_k^j-y_k]^2$ 达到极小。

这样的逼近是控制数据趋势的拟合，曲线不一定通过控制数据点。用一个这样的模式去逼近曲率变化很大的等高线是不实际的,但在局部曲率变化不大的范围内是一种次数低、计算简单实用的逼近方法，也是一种滤波方法。

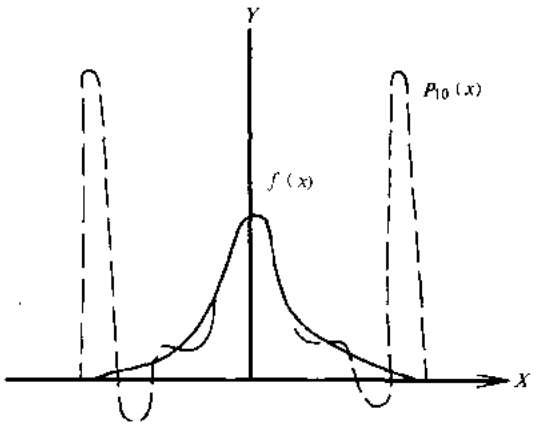



图 3

牛顿插值法随控制数据点的增加，相应的插值多项式的次数就越高，虽足够光滑，但却会出现多余的拐点(图 3),导致曲线的过多摄动,作为等高线拟合插值的模式是不适合的,这种情况与拉格朗日插值法是相同的,图 3 为多项式次数达 10 次时出现多个拐点的情况[1]。

(二) 三次参数样条函数拟合与插值

三次样条函数在每个子区间,即每对控制数据点间,其函数$S(x)$都是三次多项式。在整个区间上具有二阶连续的导数。在每个控制数据点处都有:

$S^{(k)}(x_j^-)=S^{(k)}(x_j^+)$ $\quad (j=2,3,\cdots\cdots,n-1,k=0,1,2)$

或: $S(x)\in C^2[a,b]$

三次样条函数具有足够的光滑(二阶连续的导数),并必通过每个控制数据点。无论控制数据点数量是否增加，它都保持三次多项式的计算，大大减少了插值计算时间。

---

[1]见参考文献[7]。

由于控制数据点间是三次多项式，处理曲线中的直线段部分也显然容易①。

三次样条函数的参数表达式为:

$$S_j(t)=y_jf_0(t)+y_{j+1}f_1(t)+b_jh_{j+1}g_0(t)+b_{j+1}h_{j+1}g_1(t)$$

$$=\begin{bmatrix} f_0 & f_1 & g_0 & g_1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} y_j \\ y_{j+1} \\ b_jh_{j+1} \\ b_{j+1}h_{j+1} \end{bmatrix}$$

其中: $f_0(t)=1-3t^2+2t^2$ $\quad f_1(t)=3t^2-2t^3$

$g_0(t)=t-2t^2+t^3$ $\quad g_1(t)=-t^2+t^3$

$t=\dfrac{x-x_j}{h_{j+1}}$ $\quad h_{j+1}=x_{j+1}-x_j$

$x_j,y_j$ 为控制数据点坐标值。$f_0,f_1,g_0,g_1$ 为调配函数。

要求控制数据点处二阶导数连续,需增加下述条件:

$\lambda_jb_{j-1}+2b_j+u_jb_{j+1}=D_j(j=2,3,\cdots\cdots,n-1)$

其中:

$$\lambda_j=\frac{h_{j+1}}{h_j+h_{j+1}}$$

$$u_j=1-\lambda_j=\frac{h_j}{h_j+h_{j+1}}$$

$$D_j=3(\lambda_j\frac{y_j-y_{j-1}}{h_j}+u_j\frac{y_{j+1}-y_j}{h_{j+1}})$$

将端点条件加入，端点条件为:

$$2b_1+u_1b_2=(4-u_1)u_1\frac{y_2-y_1}{h_2}-(2-u_1)u_1\frac{h_2y_1''}{2}+(2-u_1)(1-u_1)y_1'$$

$$\lambda_nb_{n-1}+2b_n=(4-\lambda_n)\lambda_n\frac{y_n-y_{n-1}}{h_n}+(2-\lambda_n)\lambda_n\frac{h_ny_n''}{2}+(2-\lambda_n)(1-\lambda_n)y_n'$$

将这两个式子右端记为$D_1$ 和 $D_n$ 组成一阶导数$b_j$ (j=1,2,……,n)的 n 个方程，写

① 见参考文献[7]。

成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} 2 & u_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \lambda_2 & 2 & u_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_{n-2} & 2 & u_{n-2} \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & \lambda_{n-1} & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdots \\ \cdots \\ b_{n-1} \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \cdots \\ \cdots \\ D_{n-1} \\ D_n \end{bmatrix}$$

至此三次样条函数的参数表达式中的$b_j$均解算可得。

三次样条函数在上述以控制数据点的坐标$(x,y)$的表达式使用上，有其局限性。为此本研究为拟合等高线这种汇集了曲线的一切特性的曲线，采用了三次参数样条函数拟合和插值。

三次参数样条函数中，是以累积弦长为参数的,即:

$$S_1 = 0 \qquad S_2 = S_1 + \Delta S_2$$

$$S_j = \sum_{i=2}^{j} \Delta S_i = \sum_{i=2}^{j} \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}$$

对任一点$P$则有:

$$S = S_j + P_j P = S_j + t\Delta S_{j+1}$$

其中,$\Delta S$为两控制数据点间的弦长或称为距离。

这样每一个控制数据点$P_j$就有一个确定的累加弦长的值，就有两对参数$(S_j,x_j)$和$(S_j,y_j)$与之相对应通过控制数据点,按以$(S_j,x_j)$插出$x$,以$(S_1,y_1)$插出$y$,得到插值点的坐标$(x,y)$。

三次参数样条函数是以累积弦长$S$为参数的三次参数样条,不仅保持了点点通过控制数据点的优点，且易于处理大挠度、无穷导数、重点和多值等各种复杂情况。并能很好地拟合和插值,它是既能较好地达到光滑条件的要求，而次数最低的一种样条函数，它不依赖于坐标系的选择，没有坐标值的那种正负向变化问题所带来的程序设计中的麻烦。

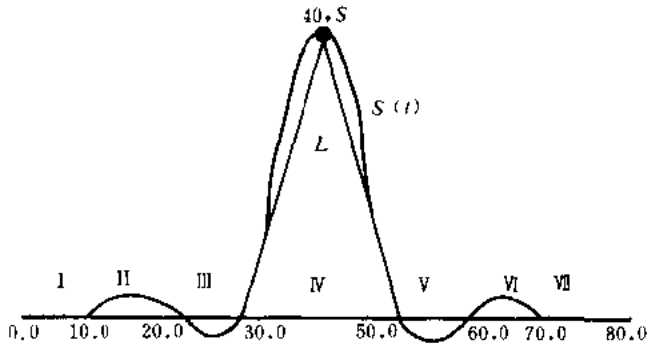



图 4

图 4 为特殊数据点(即有三个拐点的直线段),用三次参数样条函数拟合插值的结果,即曲线$S(t)$。图中$L$为原控制数据点连接的直线段,图中数字为控制数据点的坐标$(x,y)$,罗马数字为节点子区间。

从图 4 可知这样一组数据作为控制数据用三次参数样条函数拟合出一条带有摄动的曲线。从计算结果得知,I 处最大波动值为−0.05，Ⅱ处最大波动值为+0.157，Ⅲ处最大波动值为−0.58。Ⅴ，Ⅵ，Ⅶ处分别与Ⅲ，Ⅱ，Ⅰ处相同。中间一点也是 y 值唯一不为零(y＝5)的一点。其最大波动仅为 y＝5 处的 1／10，且在距中间点最近的Ⅲ,Ⅴ段。也可看出波动值按Ⅲ→Ⅱ→Ⅰ和Ⅴ→Ⅵ→Ⅶ的顺序 n 倍地锐减。

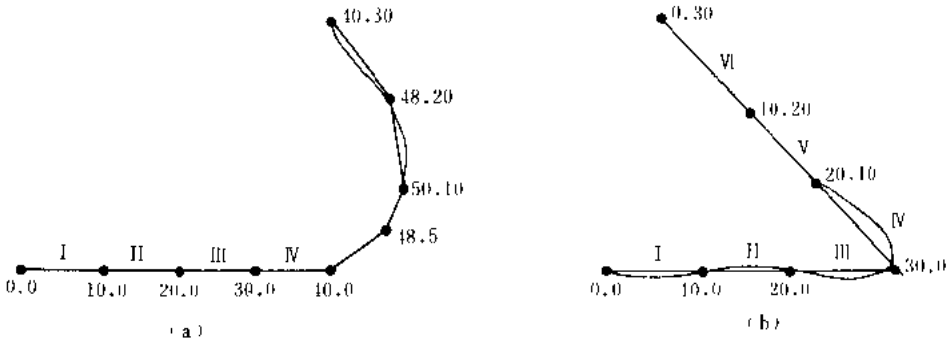



图 5

图 5 表示直线与曲线组合,直线与直线组合。(a)中:

Ⅰ 最大波动+0.08

Ⅱ 最大波动−0.26

Ⅲ 最大波动+0.096

Ⅳ 最大波动−0.34

(*b*)中:

Ⅰ 最大波动−0.04

Ⅱ 最大波动−0.135

Ⅲ 最大波动−0.497

Ⅳ 最大波动−1.00

等高线这类曲线中，形成三个拐点的四节直线段连接的情况几乎不存在,但图 5 所示的情况是有可能存在的。三次参数样条函数拟合等高线是可行的，但需要对直线段部分作处理。

在上述的三次样条矩阵表达式中，设:$P_j(x_j,y_j)$，$P_{j+1}(x_{j+1},y_{j+1})$两点间为直线段。此时只需令:

$$\lambda_j = \lambda_{j+1} = u_j = u_{j+1} = 0$$

$$D_j = D_{j-1} = 2(\frac{y_{j+1} - y_j}{h_{j+1}})$$

即可以将这两点间作为直线段处理，避免了均作为曲线处理所带来的摄动，使得三次参数样条函数拟合等高线成为更合理的拟合模式。

## 二、取样方式及拟合算法

(一) 取样方式

1、手扶跟踪数字化方式。如图 6 所示。控制数据点的取样应按下述要求:

a、曲线斜率变化最大点;

b、挠度大取样密，挠度小取样疏;

c、每条等高线(也可以按计算机容量限制，将一根等高线分成互相衔接的几根高程相等的线来处理)赋予一个高程值。

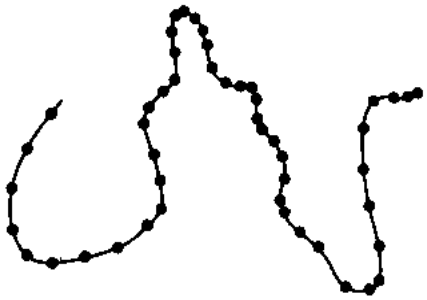


图 6

2、光栅扫描数字化方式。首先制作等高线的二值图像,使用扫描数字化仪数字化，扫描数字化仪自动将矢量数据细化，形成数据串。对每串矢量数据赋予相应的高程值。

(二) 格网数据生成模式及算法。现以手扶跟踪数字化方式为例叙述:

1、曲线拟合:图 7 中 C 曲线是高程为 H 的等高线,"o"符号为控制数据点。每条曲线(一根等高线分成相互衔接的几段时,每段均称为一条曲线)上数字化取样点按数字化的顺序作为一个数据组，每个数据组的第一组数据为$MP,H$。$MP$为数字化取样点的个数，$H$为这一个数据组的高程。数据组的第二组数据，第三组数据为每个数字化点的坐标$(x,y)$。即每个数据组的数据格式为:

$MP_1,H_1,X_1,Y_1,X_2,Y_2,\cdots\cdots X_{MP},Y_{MP}$

$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$

$MP_i,H_i,X_1,Y_1,X_2,Y_2,\cdots\cdots X_{MP},Y_{MP}$

$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$

$MP_n,H_n,X_1,Y_1,X_2,Y_2\cdots\cdots\cdots X_{MP},Y_{MP}$

一个面积范围内将上述数据顺序排列组成数据文件，三次参数样条函数子程序运行时以此数据文件作为输入数据即可达到曲线拟合的目的。

2、插值点位的确定和内插。首先要确定生成 DEM 格网的设计间隔。以下述顺序内插格网点高程。

a、内插点位的确定。以数据文件顺序一根一根线地处理,依下式:

$ZC = IFIX(XX(I-1)) + DX - XX(I-1)$　　$(XX(I) > XX(I-1)$ 时 $)$

$ZC = XX(I-1) - IFIX(XX(I-1))$　　$(XX(I) < XX(I-1)$ 时 $)$

$ZC = ZC + DX$

$$ZB = (RI(I) - RI(I-1)) / (XX(I) - XX(I-1)) \qquad (XX(I) > XX(I-1) \text{ 时})$$

$$ZB = (RI(I) - RI(I-1)) / (XX(I-1) - XX(I)) \qquad (XX(I) < XX(I-1) \text{ 时})$$

式中:$DX$为格网间隔量。

每根线的第一个数据点与距该点最近的格网与曲线交点间距离$ZC$需按第一、二式确定，其他数据点时按第三个式子确定。$ZB$为两个控制数据点间包含的格网点个数。

$XX(I)$为控制数据点坐标。

$RI(I)$为累积弦长。

b、内插算法。每个内插点位所对应的内插累积弦长按下式计算:

$$ZM(n) = ((RI(I) - RI(I-1)) \cdot ZC) / ZB + RI(I-1)$$

其中:$ZM(n)$为内插点位累积弦长。

$n$为每根曲线上内插点的计数器。

以$(RI,XX,ZM)$和$(RI,YY,ZM)$两组参数分别作三次参数样条内插，即可得出DEM格网与每根等高线的交点坐标$(x,y)$,在图7中以"·"表示。

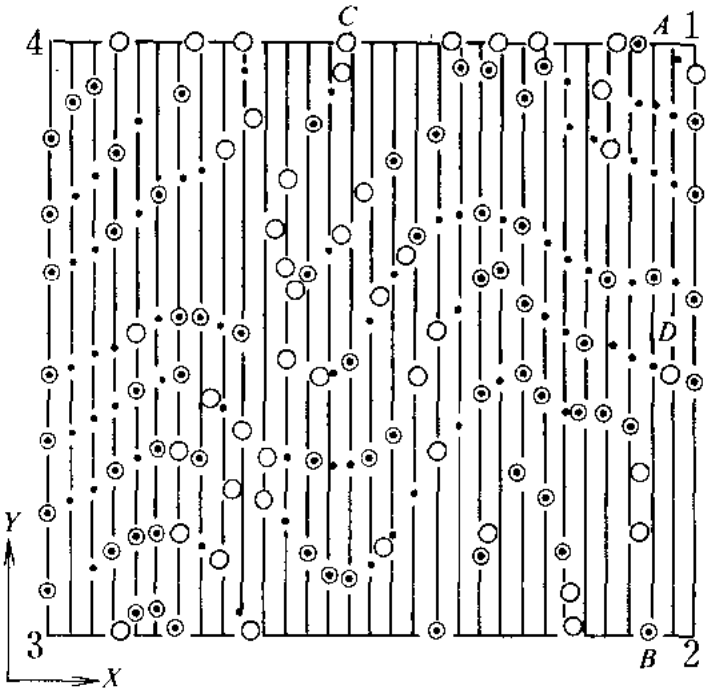



图 7

由图7可以看出每根格网线上均有数个与等高线的交点,这些交点均具有$(x,y,z)$三维坐标。这些交点由于数字化等高线的顺序是随机的，在这根格网上的排列也是随机的。对这些交点按某一坐标值(如$Y$值方向)的大小排序。然后按上述类同的方法以$(RI(y),\ z,ZM(z))$参数作三次参数样条内插，即得出$Y$方向上格网点上的高程值$z$。

每条$Y$方向上格网均依上述处理,即可得出整个面积范围内每个格网点的高程。

(三)几个问题的处理

1. 如上述网点高程数据是按格网线与等高线上交点排序后按三次参数样条内插得出的。等高线如前所述汇集了一切平面曲线的特征，地表形态也是千姿百态的。沿一个方向(如上述$Y$方向)作这类内插时将因不能反映地形变化的实际情况而产生较大误差。如图 7 中 ADB 格网线中的 DB 段。

为了消除这种误差，本研究采取$Y$方向内插和$X$方向内插取平均的算法。使这一误差现象得到了明显的消除效果。

2.地形特征点,如山顶、鞍部其高程值的可信度问题。地形图上有些制高点或鞍部不一定都有高程注记，这也是地形图用等高线表示地形表面状态的一个缺陷。本研究数字化的仅为等高线，因而这一问题需要分析。

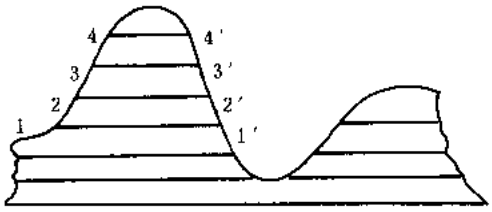


图 8

如图 8 所示，三次参数样条在整个区间保持到二阶导数连续,4 与 4′处的一阶导数(转角)和二阶导数(弯矩)均与整条断面线连续，受到 1,2,3,4,4′,3′,2′,1′的影响。拟合的结果产生 44′弧段。地形表面的坡度变化(除陡崖等断裂点外)是连续的，一般情况下这种拟合结果 44′弧段与实际地形表面应基本吻合。这种拟合对于鞍部或负地形也是适合的①。

3、DEM 网格正四边形化

如图 7 所示。在一个矩形或正方形圈定的范围内,在其四角没有等高线通过的情况是普遍存在的。每条边也不能在 DEM 每条格网线与相应边的交点处有等高线通过,这样每条格网线上的内插只是在有高程数据的交点范围内内插。交点范围外的网格点高程即使插值也是外插。这是很不利的。解决这两个问题的途径是，读出与内插方向相垂直的两条边界线的角点内插高程值、等高线与边界线的交点高程值及易于内插读出的边界线上固定距离点的高程。每条边界形成一个数据组($Y_i$,$H_i$)，或($Y_i$,$H_i$)如 1～2 边。补充方式如$Y$方向内插则补在$Y$方向每串数据串的首尾。使 DEM 成正四边形，且均为内插求值。

即一个矩形(或正方形)面积生成 DEM 时需人工读取四条边界线的高程数据。这是负担不大的。诚然，从较大的数字化范围中求小范围的 DEM 时不必读取四条边的高程数据。

## 三、试验验证及精度评定

基于上述论述，在地形图上采集了 30×30mm 范围内的等高线数字化数据(如图

① 见参考文献[10]。

7 中"o"符号所示)，在 PC-8001MarkⅡ个人微机上开发了相应软件，作了 DEM，并移植到 ALTOS 68000 微机上有 BASIC 和 FORTRAN 两种语言开发的软件。生成的 DEM 为数据源，利用通用的 CONTOU 绘图子程序在绘图机上给出图 9 所示三张图,其中 (a)是沿 $Y$ 方向内插生成的 DEM 数据绘的图,(b) 为沿 $X$ 方向内插得出的图，(c) 为 $X$,$Y$ 两方向生成的格网点高程取平均得到的 DEM 数据绘出的图。

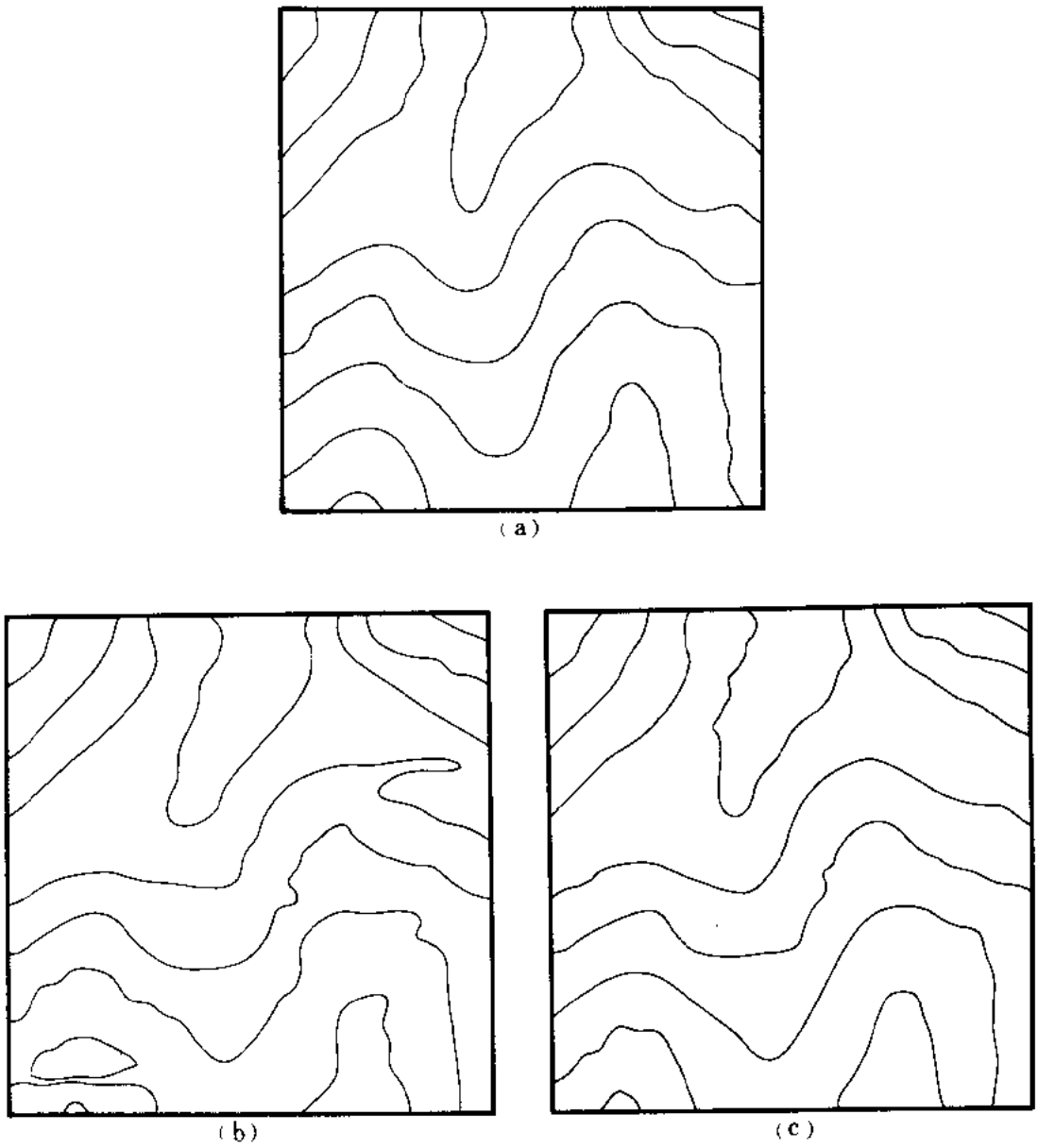



图 9

$X$方向与$Y$方向格网点高程与平均值格网点高程较差的中误差(单位为等高线间隔，下同):

$M_x = 0.12$　　$M_{xmax} = 0.45$　　$M_{xmin} = -0.405$

$M_y = 0.12$　　$M_{ymax} = 0.405$　　$M_{ymin} = -0.45$

可以看出，最大误差与另一方向的最小偏差成对出现，用取平均值的方法作为最后结果是正确的。

将原图套上格网，尽可能精确地读取了41个格网点高程，采用格网点法，41个点分布均匀。与DEM相应格网点高程比较,以原图上读取的高程为依据的话，则DEM的高程中误差及最大误差为:

$$M = 0.09 \qquad M_{max} = 0.3$$

误差分布如图10所示，大致成正态分布。

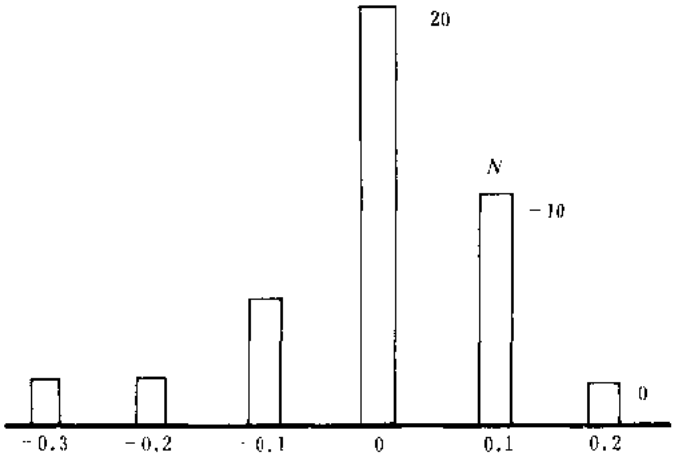



图　10

从图9的三张图可以看出一方向的内插，生成的DEM可信度较低，取两个方向的平均值作为最后成果是可取的。这反映了本研究采用曲线拟合与内插的实际情况。地形表面是个复杂的曲面，一个方向的曲线值不能完整地拟合地形表面，两个方向拟合取均值相当于用三次参数样条曲面拟合地形表面。其拟合效果应比单方向拟合效果好是合理的。

## 四、几点结论

1.采用双向三次参数样条函数,可以以中误差为1/10等高距的精度生成DEM。由于是曲线拟合插值,相对于曲面拟合需解大量方程组的模式而言，具有次数低、运算简单的优点。

2.以已有的地形图为数据源，使用廉价的手扶跟踪数字化设备，稍加指导的辅助人员的操作，可以大范围作业，短周期、资耗低地生成DEM，遥感适用的DEM生成已为可能。

3.高差大等高线密集的中小比例尺地形图生成DEM时，可制作等高线的二值图

像,用廉价的光栅扫描数字化设备采集数据，形成本模式适用的数据文件即可用本研究的模式和算法生成 DEM。

4.本研究中的三次参数样条函数模式及算法,已用于不经过生成 DEM 而直接生成等高线三维透视图的研究成果中。

## 参考文献


[1].王之卓:“摄影测量原理”测绘出版社 1979 年 P275～281

[2].吕 言:“数字地面模型内插中多面法与配置法比较性的研究”测绘学报 1982. Vol.11, No,3 P185～189

[3].陆素琴:“ DEM 渐近取样法的参数研究”武汉测绘科技大学学报“1987 Vol.12, No.1 P49～57

[4].黄 薇:“双线性有限元内插法及程序”测绘科技 1986 年 No.23 P15～21

[5].龚健雅:“关于 DEM 中多面函数内插法几个问题的研究“测绘通报 1985. No.5 P12～16

[6]. 徐永龙:“考虑地形特征的 DEM 内插软件包 HIMI 的研究”测绘学报 1988 Vol.17, No.2 P109～117

[7].袁奇荪:“计算几何造型学基础”航空工业出版社 1987 年 P48～94

[8].孙家昶:“样条函数与计算几何”科学出版社 1982 年 P22～134

[9].陆润民:“计算机绘图”清华大学出版社 1988 年 P106～129

[10].Pinhas Yoeli:“数字地形模型中的山谷线和山脊线的机助确定”《国际制图年鉴 1984 年卷》万晓霞译,“地图”1986 年 2 期 P27～399

# 资源卫星 TM CCT 精纠正高差引起的投影差改正的实验研究

李树楷

[摘要]:以往的资源卫星行扫描方式遥感图像精纠正方法研究中，多以平坦地区为方法的研究对象，即地形高差引起的投影差可以忽略。有些学者从行扫描方式的遥感图像是中心投影图像这一认识出发，提出在地形高差大的地区其图像精纠正时应利用 DEM 作投影差改正。但尚未见到有关投影差改正方法的论文。本研究利用成熟的共线方程式对双阳县试验区的 TM CCT 作了精处理，得到了控制点上位置残差中误差 ±0.51 像元(±16.8m)的结果。同时取得在精纠正中作投影差改正的数学模式和算法研究的成果，并开发了相应软件。

[关键词]: 投影差,共线方程式,多项式。

## 前　言

当前，国内外用于自然资源和环境调查监测的卫星遥感图像中，以 MSS 和 TM 图像居多，这两种卫星遥感图像均为行扫描方式获取数据的中心投影图像,图像的几何精处理通常用两种模式:多项式（或正交多项式）和共线方程式，这两种方式的共同点在于均需以地面控制点为基础,其纠正图像的思路不同①,两种方式作卫星行扫描方式图像的几何精处理均可达到 ±1 像元以内的精度。

多项式法(也称黑匣子方法)对经几何粗纠正的 TM CCT 作精纠正时可取用不超过 2 次幂的多项式，建立影像面与地面坐标系间的关系式。地面控制点分布要均匀，地面控制点数以"景"计不少于 20 个，以防止图像范围内定位精度不均。地形高差大的地区制作 1:5 万比例尺影像地图时，投影差的改正在几何精处理中要予以考虑,但投影差是由于行扫描方式图像的中心投影性质所引起的，是 TM 图像上客观存在的,其改正显然也是从中心投影的方式去改正，多项式法作几何精处理时投影差是无法改正的。

共线方程式法是基于中心投影的方法，其数学模式及处理流程见参考文献[2][3]。由于 TM 的 A DATA 是双向扫描搜集数据，以扫描带为一个单位(16 根扫描线为一个扫描带)，奇偶扫描带相同影像点错开约 45 个像元左右(变化 1～4 个像元)，这样的原始图像尚未发现利用上述这两种方式作几何纠正的论文，有关 TM A DATA 的问题另文阐述。经几何粗纠正的 TM CCT 其图像内部的几何关系与 A DATA 的几何关系相比已发生了变化。用共线方程式处理是基于共线方程式法也是一种有一定可塑性的数学模式，其可塑性主要反映在方位元素是扫描带数(时间)的多项式函数，这里的方位元素已是借用语，不代表传感器的真实位置与姿态。

---

①见参考文献[1]。

行扫描方式卫星遥感图像几何精处理的速度问题主要取决于灰度再采样时海量数据的计算公式的繁简。此前的辅助计算(如分区边缘，小区射影变换系数，几十个控制点上的收敛计算等)相对于灰度再采样的计算时间而言，可以说是小值。如：1600×1600大小的几何精处理，使用FACOM M-180AD计算机全部计算时间为1分38秒，其中灰度再采样前的辅助计算仅用4秒[1]。

共线方程式法是几何精纠正中加入投影差改正的合适的几何精纠正模式，算法简单，易于实现。现分四部分阐述。

## 一、行扫描方式卫星遥感图像的投影差概念及其影响

投影差一词来源于航空摄影测量学,航空摄影测量的信息源是中心投影的航空摄影像片。因地形高差引起的投影差方向是以像底点为中心的360°辐射方向(图1),以像片投影中心而论，是一个张角连续变大的圆锥形辐射方向。

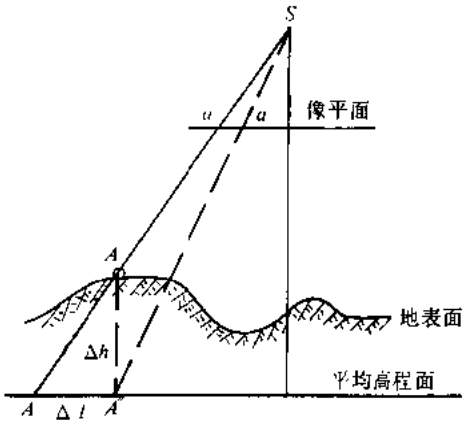



图 1

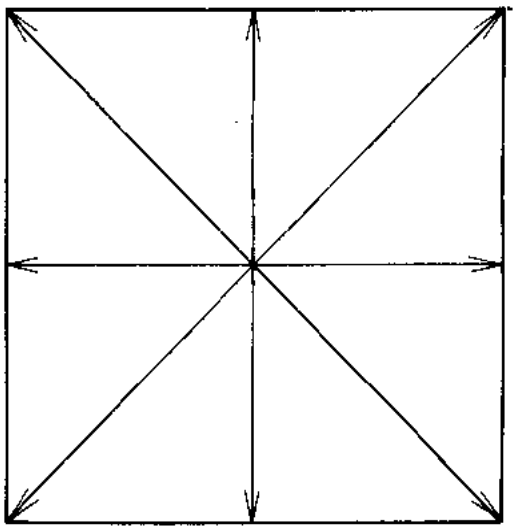


图 2

投影差的实质如图2所示,其中$aa'$即为像片上因地形高差$\Delta h$而引起的投影差,反之$\Delta l$为$A$点的坐标位置改正。由于投影差的存在，像平面与平均高程面不能建立简单的射影对应关系。

TM CCT图像(或MSS)是一种多投影中心组成的中心投影图像[2]。TM CCT图像的每一个扫描带是扫描镜一次扫描同时获取的,严格地说,一个带中16根扫描线的像元号数相同的16个像元是同时获取的。可认为一个扫描带有一个投影中心,这个投影中心在影像面上的投影(称之为带中心)的影像坐标是8.5根扫描线，二分之一每条扫

---

[1] 见参考文献[3]。

[2] 见参考文献[1]。

描线的像元个数。

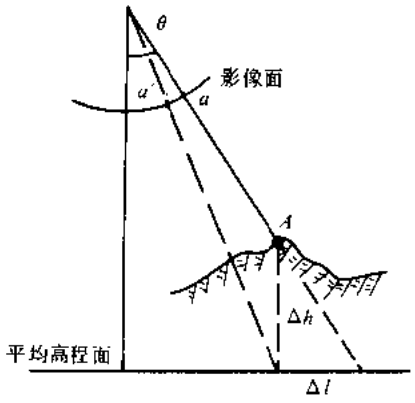



图 3

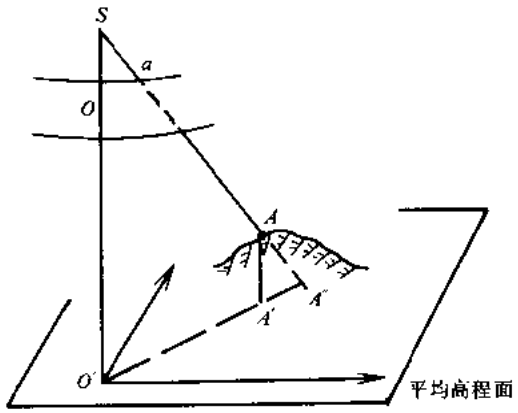



图 4

现分析一下一条扫描带中投影差的问题(图 3),由图 3 可知,投影差与航空像片大体相同,TM 图像数据获取时是近东西方向扫描,一次扫描宽度为 16 根扫描线，每根扫描线包含 6920 个像元，可见是近东西方向长(约 185km)，近南北方向短(约 0.5km)的长条带。这个长条带中 o 为带中心(图 4)，$a$ 为距 $o$ 第 8 根扫描线上的一个像元，$AA'$ 是高差，$H$ 为卫星高度。这里取 $H = 705300m$，则:

$$AA' = A'A'' \cdot H / A''O' \tag{1}$$

$$A''O' = H \cdot tan(8 \cdot \Delta\theta) \tag{2}$$

式中: $\Delta\theta = 0.0000425$(弧度)

取: $A'A'' = 30m$，代入(2),(1)式得: $AA' = 88131.6m$,即一条扫描带之最边缘一根扫描线较之通过带中心的扫描线在近南北方向上要产生近 1 个像元的投影差时其 $A$ 点与平均高程面要有近 90km 的高差。若要产生 0.1 像元的投影差时，$A$ 点也需比平均高程面高出 8746.36m。

由上可以认为,一条扫描带内投影差的方向是与扫描方向线重叠的，以带中心为中心左右两边(近东西方向)投影差方向相反。一景 TM A DATA 由 358 条扫描带组成，每条带的投影差与扫描方向线重叠，那么整景 A DATA 的投影差方向也是与扫描线方向重叠或平行的。

LANDSAT-4,5 的轨道倾角是 8.2°,粗纠正的 TM 图像总体上说是由 A DATA 旋转了约 8.2°。仿(1)式得:

$$\Delta A = A'A'' \cdot H / A''O' - A'A'' \cdot H / (A''O' \cdot cos8.2^\circ) \tag{3}$$

取像元数为 3000，$A'A'' = 30$m，则: $\Delta A = 2.42$m。

由上面简单推算可知,粗纠正的 TM 图像在其扫描线方向上改正投影差时，其最大误差为投影差的 1 / 12.4。这个比例，若使其最大误差为 1 个像元量级的话,则 TM 图像边缘至少要有能产生 12.4 像元投影差的高差，这个高差应为 2902m。若取平均

高差处理的高程面为平均高程面，这种误差要小一半。一般而论,TM 粗纠正图像按其扫描线方向作投影差改正是可行的。

现以简单方法推算一下地形高差引起的投影差的大小。也可将投影差化为像元单位，近似推算适用高差范围，结果示于下表，以曲线表示于图 5。

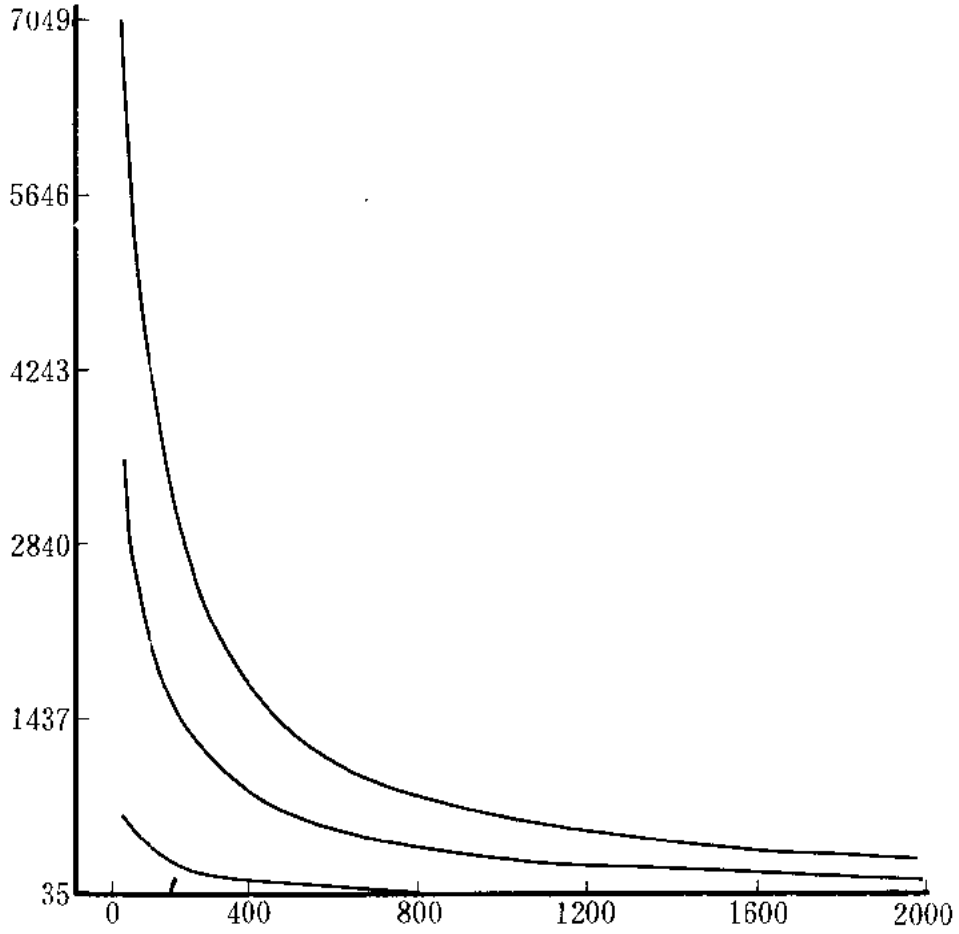



图 5

表中第二栏是距中心像元的瞬时视场角个数。第三、五、七栏是以 m 为单位，实际上是代表产生 0.1 像元、0.5 像元、1 像元的量级。产生这样大的投影差所对应的高差值分别在四、六、八栏中。图 5 中纵坐标是高差，单位为 m；横坐标为距中心像元的瞬时视场角个数。三根曲线由上至下分别代表 1 个、0.5 个、0.1 个像元三种情况。

| No | Pixel size | Hight | Pixel size | Hight | Pixel size | Hight |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 100 | 3 | 705.0 | 15 | 3525.0 | 30 | 7050.0 |
| 1 120 | 3 | 587.5 | 15 | 2937.5 | 30 | 5874.9 |
| 2 140 | 3 | 503.6 | 15 | 2517.8 | 30 | 5035.7 |
| 3 160 | 3 | 440.6 | 15 | 2203.1 | 30 | 4406.2 |
| 4 180 | 3 | 391.7 | 15 | 1958.3 | 30 | 3916.6 |
| 5 200 | 3 | 352.5 | 15 | 1762.5 | 30 | 3524.9 |
| 6 220 | 3 | 320.4 | 15 | 1602.2 | 30 | 3204.5 |
| 7 240 | 3 | 393.7 | 15 | 1468.7 | 30 | 2937.4 |
| 8 260 | 3 | 271.1 | 15 | 1355.7 | 30 | 2711.4 |
| 9 280 | 3 | 251.8 | 15 | 1258.9 | 30 | 2517.7 |
| 10 300 | 3 | 235.0 | 15 | 1174.9 | 30 | 2349.9 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11 | 320 | 3 | 220.3 | 15 | 1101.5 | 30 | 2203.0 |
| 12 | 340 | 3 | 207.3 | 15 | 1036.7 | 30 | 2073.4 |
| 13 | 360 | 3 | 195.8 | 15 | 979.1 | 30 | 1958.2 |
| 14 | 380 | 3 | 185.5 | 15 | 927.6 | 30 | 1855.1 |
| 15 | 400 | 3 | 176.2 | 15 | 881.2 | 30 | 1762.3 |
| 16 | 420 | 3 | 167.8 | 15 | 839.2 | 30 | 1678.4 |
| 17 | 440 | 3 | 160.2 | 15 | 801.0 | 30 | 1602.1 |
| 18 | 460 | 3 | 153.2 | 15 | 766.2 | 30 | 1532.4 |
| 19 | 480 | 3 | 146.9 | 15 | 734.3 | 30 | 1468.5 |
| 20 | 500 | 3 | 141.0 | 15 | 704.9 | 30 | 1409.8 |
| 21 | 520 | 3 | 135.6 | 15 | 677.8 | 30 | 1355.5 |
| 22 | 540 | 3 | 135.5 | 15 | 652.7 | 30 | 1305.3 |
| 23 | 560 | 3 | 125.9 | 15 | 629.3 | 30 | 1258.7 |
| 24 | 580 | 3 | 121.5 | 15 | 607.6 | 30 | 1215.3 |
| 25 | 600 | 3 | 117.5 | 15 | 587.4 | 30 | 1174.7 |
| 26 | 620 | 3 | 113.7 | 15 | 568.4 | 30 | 1136.8 |
| 27 | 640 | 3 | 110.1 | 15 | 550.6 | 30 | 1101.4 |
| 28 | 660 | 3 | 106.8 | 15 | 534.0 | 30 | 1067.9 |
| 29 | 680 | 3 | 103.6 | 15 | 518.2 | 30 | 1036.5 |
| 30 | 700 | 3 | 100.7 | 15 | 503.4 | 30 | 1006.8 |
| 31 | 720 | 3 | 97.9 | 15 | 489.4 | 30 | 978.9 |
| 32 | 740 | 3 | 95.2 | 15 | 476.2 | 30 | 952.4 |
| 33 | 760 | 3 | 92.7 | 15 | 463.7 | 30 | 927.3 |
| 34 | 780 | 3 | 90.4 | 15 | 451.8 | 30 | 903.5 |
| 35 | 800 | 3 | 88.1 | 15 | 440.5 | 30 | 880.9 |
| 36 | 820 | 3 | 85.9 | 15 | 429.7 | 30 | 859.4 |
| 37 | 840 | 3 | 83.9 | 15 | 419.5 | 30 | 838.9 |
| 38 | 860 | 3 | 81.9 | 15 | 409.7 | 30 | 819.4 |
| 39 | 880 | 3 | 80.1 | 15 | 400.4 | 30 | 800.8 |
| 40 | 900 | 3 | 78.3 | 15 | 391.5 | 30 | 783.0 |
| 41 | 920 | 3 | 76.6 | 15 | 383.0 | 30 | 765.9 |
| 42 | 940 | 3 | 75.0 | 15 | 374.8 | 30 | 749.6 |
| 43 | 960 | 3 | 73.4 | 15 | 367.0 | 30 | 734.0 |
| 44 | 980 | 3 | 71.9 | 15 | 359.5 | 30 | 719.0 |
| 45 | 1000 | 3 | 70.5 | 15 | 352.3 | 30 | 704.6 |
| 46 | 1020 | 3 | 69.1 | 15 | 345.4 | 30 | 690.7 |
| 47 | 1040 | 3 | 67.7 | 15 | 338.7 | 30 | 677.4 |
| 48 | 1060 | 3 | 66.5 | 15 | 332.3 | 30 | 664.6 |
| 49 | 1080 | 3 | 65.2 | 15 | 326.2 | 30 | 652.3 |
| 50 | 1100 | 3 | 64.0 | 15 | 320.2 | 30 | 640.4 |
| 51 | 1120 | 3 | 62.9 | 15 | 314.5 | 30 | 629.0 |
| 52 | 1140 | 3 | 61.8 | 15 | 309.0 | 30 | 617.9 |
| 53 | 1160 | 3 | 60.7 | 15 | 303.6 | 30 | 607.3 |
| 54 | 1180 | 3 | 59.7 | 15 | 298.5 | 30 | 597.0 |
| 55 | 1200 | 3 | 58.7 | 15 | 293.5 | 30 | 587.0 |
| 56 | 1220 | 3 | 57.7 | 15 | 288.7 | 30 | 577.3 |
| 57 | 1240 | 3 | 56.8 | 15 | 284.0 | 30 | 568.0 |
| 58 | 1260 | 3 | 55.9 | 15 | 279.5 | 30 | 559.0 |
| 59 | 1280 | 3 | 55.0 | 15 | 275.1 | 30 | 550.2 |
| 60 | 1300 | 3 | 54.2 | 15 | 270.9 | 30 | 541.8 |
| 61 | 1320 | 3 | 53.4 | 15 | 266.8 | 30 | 533.5 |
| 62 | 1340 | 3 | 52.6 | 15 | 262.8 | 30 | 525.5 |
| 63 | 1360 | 3 | 51.8 | 15 | 258.9 | 30 | 517.8 |
| 64 | 1380 | 3 | 51.0 | 15 | 255.1 | 30 | 510.3 |
| 65 | 1400 | 3 | 50.3 | 15 | 251.5 | 30 | 503.0 |
| 66 | 1420 | 3 | 49.6 | 15 | 247.9 | 30 | 495.9 |
| 67 | 1440 | 3 | 48.9 | 15 | 244.5 | 30 | 489.0 |
| 68 | 1460 | 3 | 48.2 | 15 | 241.1 | 30 | 482.3 |
| 69 | 1480 | 3 | 47.6 | 15 | 237.9 | 30 | 475.7 |
| 70 | 1500 | 3 | 46.9 | 15 | 234.7 | 30 | 469.4 |
| 71 | 1520 | 3 | 46.3 | 15 | 231.6 | 30 | 463.2 |
| 72 | 1540 | 3 | 45.7 | 15 | 228.6 | 30 | 457.1 |
| 73 | 1560 | 3 | 45.1 | 15 | 225.6 | 30 | 451.3 |
| 74 | 1580 | 3 | 44.6 | 15 | 222.8 | 30 | 445.5 |
| 75 | 1600 | 3 | 44.0 | 15 | 220.0 | 30 | 439.9 |
| 76 | 1620 | 3 | 43.4 | 15 | 217.2 | 30 | 434.5 |
| 77 | 1640 | 3 | 42.9 | 15 | 214.6 | 30 | 429.2 |
| 78 | 1660 | 3 | 42.4 | 15 | 212.0 | 30 | 424.0 |
| 79 | 1680 | 3 | 41.9 | 15 | 209.5 | 30 | 418.9 |
| 80 | 1700 | 3 | 41.4 | 15 | 207.0 | 30 | 414.0 |
| 81 | 1720 | 3 | 40.9 | 15 | 204.6 | 30 | 409.2 |
| 82 | 1740 | 3 | 40.4 | 15 | 202.2 | 30 | 404.4 |
| 83 | 1760 | 3 | 40.0 | 15 | 199.9 | 30 | 399.8 |
| 84 | 1780 | 3 | 39.5 | 15 | 197.7 | 30 | 395.3 |
| 85 | 1800 | 3 | 39.1 | 15 | 195.5 | 30 | 390.9 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 86 | 1820 | 3 | 38.7 | 15 | 193.3 | 30 | 386.6 |
| 87 | 1840 | 3 | 38.2 | 15 | 191.2 | 30 | 382.4 |
| 88 | 1860 | 3 | 37.8 | 15 | 189.1 | 30 | 378,2 |
| 89 | 1880 | 3 | 37.4 | 15 | 187.1 | 30 | 374.2 |
| 90 | 1900 | 3 | 37.0 | 15 | 185.1 | 30 | 370.2 |
| 91 | 1920 | 3 | 36.6 | 15 | 183.2 | 30 | 366.4 |
| 92 | 1940 | 3 | 36 3 | 15 | 181.3 | 30 | 362.6 |
| 93 | 1960 | 3 | 35.9 | 15 | 179.4 | 30 | 358.9 |
| 94 | 1980 | 3 | 35.1 | 15 | 177.6 | 30 | 355.2 |
| 95 | 2000 | 3 | 35.2 | 15 | 175.8 | 30 | 351.6 |
| 96 | 3000 | 3 | 23.4 | 15 | 117.0 | 30 | 234.0 |

从上表及图 5 可知丘陵或山地丘陵区，要保证 TM 图像几何精处理精度，加入因地形高差引起的投影差改正是难以避免的。

## 二、用共线方程式法作 TM CCT 精纠正的技术流程

共线方程式法作卫星行扫描方式的遥感图像(MSS,TM)的精纠正的原理及数学模式是基本相同的①,本文不再赘述,这里仅将处理过程与结果略加说明。

1、控制点选读

这次 TM CCT 精纠正是为制作 1／5 万系列专题制图的影像基础地图，制作 1／5 万影像地图而进行的。区域范围为:

4794000 到 4872000

21689000 到 217454000

TM CCT 是 1986 年 5 月 31 日获取的资料，粗纠正由地面站完成。选点按区域范围均匀分布共选取 11 个点。从以往 MSS 的精处理模式研究试验结果表明②, 共线方程式法一般情况下有 18 个未知数,至少需 9 个地面控制点, 只要点位正确,坐标读取无误,20 个控制点与 9 个控制点精度上无明显差别。这次选取的 11 个控制点是从 1／5 万地形图上以 0.1mm 精度读取地面坐标和高程，在图像终端上以 ± 1 像元的精度读取图像上相应点的图像坐标。

2、收敛计算，求系数

观测方程式为:

$$\begin{cases} f \cdot tan(ML \cdot \Delta\sigma) + f \cdot \dfrac{a_1(X-X_0)+b_1(Y-Y_0)+c_1(Z-Z_0)}{a_3(X-X_0)+b_3(Y-Y_0)+c_3(Z-Z_0)} = 0 \\ f \cdot tan(\theta+\gamma) + f \cdot \dfrac{a_2(X-X_0)+b_2(Y-Y_0)+c_2(Z-Z_0)}{a_3(X-X_0)+b_3(Y-Y_0)+c_3(Z-Z_0)} = 0 \end{cases} \tag{4}$$

误差方程式为:

$$\begin{cases} V_x = (x) - x + \dfrac{\partial x}{\partial X_0}\Delta x_0 + \dfrac{\partial x}{\partial Y_0}\Delta y_0 + \dfrac{\partial x}{\partial Z_0}\Delta Z_0 + \dfrac{\partial x}{\partial \varphi}\Delta\varphi + \dfrac{\partial x}{\partial \omega}\Delta\omega + \dfrac{\partial x}{\partial \kappa}\Delta\kappa \\ V_y = (y) - y + \dfrac{\partial y}{\partial X_0}\Delta X_0 + \dfrac{\partial y}{\partial Y_0}\Delta Y_0 + \dfrac{\partial y}{\partial Z_0}\Delta Z_0 + \dfrac{\partial y}{\partial \varphi}\Delta\varphi + \dfrac{\partial y}{\partial \omega}\Delta\omega + \dfrac{\partial y}{\partial \kappa}\Delta\kappa \end{cases} \tag{5}$$

① 见参考文献[1][2][3]。

② 见参考文献[3]。

其中：

$$\begin{cases} X_0 = A_1 + B_1 \times L \\ Y_0 = A_2 + B_2 \times L \\ Z_0 = A_3 + B_3 \times L \\ \varphi = A_4 + B_4 \times L + C_4 \times L^2 + D_4 \times L^3 \\ \omega = A_5 + B_5 \times L + C_5 \times L^2 + D_5 \times L^3 \\ \kappa = A_6 + B_6 \times L + C_6 \times L^2 + D_6 \times L^3 \end{cases} \tag{6}$$

这里：$A_i, B_i, C_i, D_i$ 为多项式待定系数，$L$ 为扫描带号。

收敛计算结果：$P_x = 0.22$ 像元　$P_y = 0.8$ 像元　$P_{xy} = 0.51$ 像元

$G_x = 5.9m$　$G_y = 23m$　$G_{xy} = 16.8m$

(6)式系数为：

$A_1 = -4227.589$　$B_1 = 0.4582713D + 03$

$A_2 = 0.725974D + 05$　$B_2 = -0.1182050D + 02$

$A_3 = 0.6693248D + 06$　$B_3 = 0.8124908D + 01$

$A_4 = 0.8540155D - 03$　$B_4 = 0.9061487D - 0.5$

$C_4 = -0.16253657D - 06$　$D_4 = 0.493721d - 09$

$A_5 = -0.4344801D - 04$　$B_5 = 0.2740479D - 05$

$C_5 = -.3357847D - 07$　$D_5 = 0.1116636D - 09$

$A_6 = -0.2791383D - 01$　$B_6 = 0.2090126D - 03$

$C_6 = -0.2416739D - 05$　$D_6 = 0.6643872D - 08$

3、灰度重采样

TM CCT 的几何精处理的灰度重采样，采用与 MSS CCT 相类似的方法①。MSS CCT 是分成 350 像元×78 条扫描线的小区，小区内线性内插求影像坐标，邻元法灰度"搬家"，小区间隔是经误差统计后确定的。考虑到 TM CCT 几何质量比 MSS CCT 的几何质量要好以及小区整景分割的完整性，TM CCT 的灰度重采样中，小区间隔取 400 像元×112 条扫描线，即双阳县范围的 TM CCT 分成 20×36＝720 个小区，共 777 格子点，每四个相邻格子点组成一个小区，正算求得格子点地面坐标，与固定影像坐标($I$，$L$)一起，求出地面坐标与影像坐标间变换关系式系数。只要有一组地面坐标，即可由程序自动搜索到相应的小区，用这一个小区的变换系数算得对应的影像坐标，这组影像坐标不取整时，即可运用三次卷积内插法或双线性内插法内插出这个点的灰度。若取整，即可用最近邻内插法求相应的灰度值。按地理坐标格网以确定的重采样间隔，将相应灰度值按地理坐标格网点顺序重新排列组成新的纠正后的数据文件，即地理坐标格网化灰度值阵，完成重采样的全部过程。本次双阳县范围的 TM CCT 精处理，重采样间隔 30m，近邻内插法，共纠正完成 1880 像元×2600 线的灰度值阵(试验样片 7,8)。

① 见参考文献[3]。

## 三、TM CCT精纠正中高差引起的投影改正

使用共线方程式法作 TM CCT 精处理的全过程可知，重要的在于小区格子点(角点)的计算及小区射影变换系数的计算,这些计算均在灰度重采样前进行。灰度重采样过程中,按小区变换系数计算影像坐标时,不应再增加非必要的运算，即使增加一个加法运算也会使整个重采样所用机时明显地增加。

如前所述,辅助计算的增加由于数据量有限,对全过程机时影响较小,投影差改正的运算放在辅助计算中较为有利,在灰度重采样中插入投影差改正是不可取的。本实验研究的投影差改正运算是在灰度重采样前建立投影差改正数"阵"，灰度重采样过程中采用查表寻址方式取得投影差改正数，再增加一次加法运算，以此思路研究了相应的计算模式和算法并开发了软件。使用的原 DEM 是 80m 间隔，有关 DEM 的生成方法及间隔量的确定，本文不再论述。

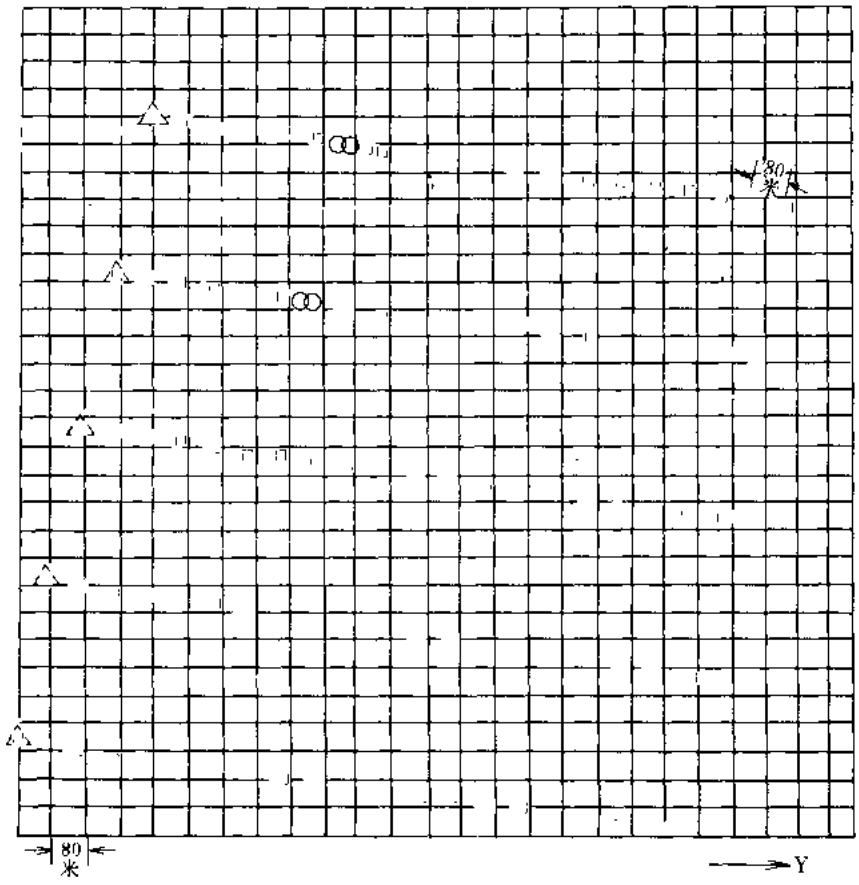



图 6

1、按小区格网点对 DEM 再内插

投影差方向与扫描方向线重合前已论证。小区格子点在卫星前进方向上间隔 7 个扫描带(112 条扫描线)，在扫描方向上间隔 400 像元。由(6)式可知，每个扫描带的投影中心的 $X_0$，$Y_0$，$Z_0$ 可计算得到，扫描带投影中心的地理坐标是按直线函数变化的，此直线相对

于地面坐标系的夹角可简单算出。

$$A = arctan(Y_{01} - Y_{0252}) / (X_{01} - X_{0252}) \tag{7}$$

也即扫描线方向与地面坐标系方向夹角为$A$。在扫描方向上从投影中心起算，用原DEM间隔(80m)作为增量，这些间隔点的坐标可按下式计算:

$$\begin{cases} X(I) = X_{0j} + W_0 \cdot sin(A) \\ Y(I) = Y_{0j} \pm W_0 \cdot cos(A) \quad (I = 1,1175), \quad (j = m,n) \end{cases} \tag{8}$$

其中:$W_0 = \Delta L \cdot I$，$\Delta L$为DEM间隔，计算像元号数小于带中心像元号时(8)式反号。(m,n)是相应于南北向按112扫描线(7扫描带)间隔，扫描方向按80m间隔的循环变量。

由(8)式得到的$X(I),Y(I)$用双线性内插法在原DEM中内插出其高程，基本公式为:

$$Z = (1 - \Delta X)(1 - \Delta Y)Z_{i,j} + (1 - \Delta X)\Delta Y Z_{i,j+1} + (1 - \Delta X)\Delta Y Z_{i,j+1} + \Delta X \Delta Y Z_{i+1,j+1} \quad (9)$$

式中$Z_{i,j}, Z_{i+1,j}, Z_{i+1,j+1}, Z_{i,j-1}$为$X(I),Y(I)$坐标四周最近四个包围点的高程值;$\Delta X$，$\Delta Y$为$X(I)$，$Y(I)$相对于四点中左上角点坐标归算后的坐标增量,以此算法得到$X(I),Y(I)$的高程。部分点与点间的位置关系示于图6，其中四方块即为$X(I),Y(I)$点位。

2、求算小区格子点地面坐标的投影差改正

如图6所示，代表80m间隔点(扫描方向上)位置用小四方块表示，在一条横线上的这些小四方块与小区横线重合(即扫描方向)，横线间间隔在图像上是112条扫描线。现在需在横线上求算400像元间隔点,即格子点的地面坐标改正。

图像上格子点的像元数经正切改正后,按共线方程的正算公式求得地面坐标,格子点地面坐标改正阐述于下。

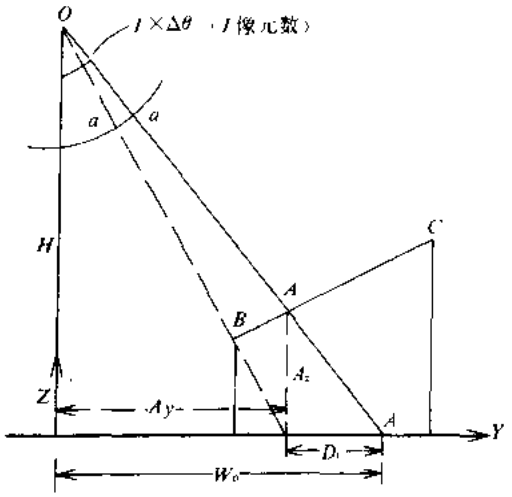



图 7

如图7所示，在$YZ$平面内，即通过扫描线方向的垂直平面内，$B$，$C$为间隔80m的按"三"之"1"所得到的DEM间隔点。$B$，$C$点的$Z$，$Y$坐标分别为:

$(Z_1(J,JJ), YY(J_1))$和$(Z_1(I_2,J_2), YY(J_1+1))$

这里:$J = IFIX(XX(J_1) - W_1) / 80) + 1$

$JJ = IFIX(YY(J_1) - W_3 / 80) + 1$

$J_1$ 为"三"之"1"中新 DEM 的横向序号，$J_1 = IFIX(Y(I))$

$I_2, J_2$ 是对应于( $XX(J_1 + 1), YY(J_1 + 1)$ ) 的 $Z_1$ 变量的下标。

$Y(Z) = Y_{oi} + W_0$

$aA$ 直线的斜率: $k_1 = W_0 / H$

$BC$ 线段的斜率: $k_2 = [YY(J_1 + 1) - YY(J_1)] / [Z_1(I_2, J_2) - Z_1(J, JJ)]$

$aA$ 的直线方程为: $Z = H - [YY(J_1) - Y_{oi})] / k_1$

$$R = Z_1(J, JJ) + [YY(J_1) - Y_{oi})] / k_1 - H \tag{10}$$

$$R_1 = Z_1(I_2, J_2) + [YY(J_1 - 1) - Y_{0i})] / k_1 - H \tag{11}$$

视 $R, R_1$ 的正、负、零判断 $aA$ 是否与 $BC$ 相交，否则:$J_1 = J_1 + 1$，重复上述步骤，直至循环搜寻到 $aA$ 直线与 $BC$ 线段相交。

上述过程完成后,实际上是确定两直线的交点这样的简单问题,现仅把使用的计算公式列于后:

$$A_y = [H - Z_1(J, JJ) + Y_{oi} / k_1 + YY(J_1)k_2] / (1 / k_1 + k_2)$$

$$A_z = H - (A_y - Y_{oi}) / k_1$$

投影差坐标改正量:

$$D_y = A_z(Y(I) - Y_{oi}) / H \tag{12}$$

$$Y'(I) = Y(I) - D_y \tag{13}$$

上述步骤及算法即可计算出 777 个格子点的 $Y$ 坐标的投影差改正量，并改正之。其实验性结果在图 6 中以圆圈符号表示(示意点位仅示意 4 点),经验证是正确的。

3. 灰度重采样时，按重采样间隔设定的地理坐标格网点相应的图像坐标的投影差改正。

777 个格子点上投影差对其 $Y$ 坐标的影响及改正已在"三"之"1"、"2"中完成。这毕竟是有限的数据量和运算量，灰度重采样是海量数据，如前所述,用重采样前建立投影差改正数"阵"的方法,这个阵用一个二维变量存放，这个二维变量的下标用规化后的格网点坐标取整值,这样在灰度重采样时,由格网点坐标取整隐函,将投影差改正量调来与小区内插出的图像坐标($I$，$L$) 中的 $I$ 相加即可。这样灰度重采样中的计算量增加了一个加法和两个取整，对机时的影响是有限度的,也就是说,在灰度重采样前要建立一个与上述二维隐函变量一致的投影差改正量"阵",这个过程是"三"之"2"的逆过程。如图 7 所示，已知 $A_y, A_z$ 求 a′a。

严格说起来，这个"阵"的间隔和数量应与格网点一样,这样一来，建这个阵的计算量要超过灰度重采样所需计算量,这是不可取的。实际上,重采样区域内需要作投影差改正的往往是局部范围，且考虑到坡度及能产生 0.5 像元投影差之差的高差范围各地区不尽相同,取一个通用的建"阵"间隔标准是不实际的。在地形连续地区，30m 间隔内(一个像元)由于取用相邻点的高程使投影差改正之差能达到 0.5 像元时①,如前表所示，这 30m 水平距离内就是在 TM 景幅最边缘也需要 120m 高差,这种地形相当于坡度为 76° 的高山地,

① 见参考文献[4]。

这是处在TM景幅边缘时的极端情况。

实际应用中,首先应查明区域范围内最大高差及能产生的最大投影差，再计算全区内坡度最大区域能产生限差值投影差的水平距离阈值($X,Y$两个方向取最小值)作为建"阵"间隔。

现仅将建"阵"的基本计算方法阐述于下(见图 8):

1、按(7)式计算投影中心连线与地面坐标系间的夹角$A$。

2、$X_1$是地理格网点所处横线的$X$值。

则:$\begin{cases} X = X_1 \\ X = Y_{0252} + Y / tan(A) \end{cases}$

联立解之得地理格网与投影中心连线交点的坐标($X_1$，$Y_1$)。

3、$YY$为$B$点的$Y$坐标

$$\begin{cases} X_2 = X_1 + (YY - Y_1) \cdot tan(A) \\ Y_2 = Y_1 + X_2 \cdot tan(A) \end{cases}$$

($X_2$，$Y_2$)为B点在投影中心连线上的垂足B′的坐标。

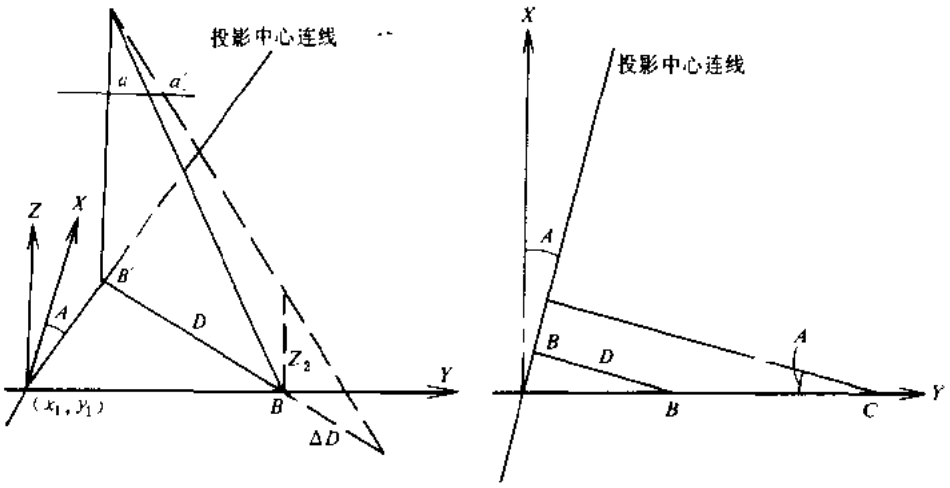



图 8

4、按$X_1$，$YY$依(9)式在原DEM中内插出B点高程$Z_2$。

5、按(6)式:$\begin{cases} X_2 = A_1 + B_1 \cdot L \\ Y_2 = A_2 + B_2 \cdot L \end{cases}$ ($L$不取整)

求出扫描带数$L$,及扫描线数$LL = L \cdot 16$

6、$D = \sqrt{((Y_2 - Y_1)^2 + (X_2 - X_1)^2)}$

7、$AN = arctan(D / H) / \Delta Q$ 按实数计算

8、$\Delta D = (D \cdot Z_2) / (H - Z_2)$ B点高程引起的D增量

9、$AN_1 = arctan((D + \Delta D) / H) / \Delta Q$

10、$\Delta AN = AN_1 - AN$　像元改正量,记入"阵"中的 B。

按上述方式处理,即可得出像元改正量"阵",在"三"之"3"的灰度重采样中,地面坐标格网点的 $X, Y$ 坐标按格网点间隔与"阵"元素间间隔算定一个系数,将格网点坐标($X$, $Y$)归化后即可作为"阵"二维隐函变量的下标变量值,直接从"阵"中取出投影差改正量,待用小区系数算出像元号和扫描线号后,将从"阵"中取出的投影差改正量加到此像元号上,按改正后的像元号数从原图像文件中用三种内插法之一种去取灰度,完成新的地图化数据文件。

**四、几点讨论**

1、由上述可知,利用共线方程式法作 TM　CCT 的精处理是完全可行的,纠正精度在±1 像元以内。

2、利用共线方程式法,在地形起伏大的地区作 TM 的几何精处理中,加入因地形起伏引起的投影差改正是可行的。

3、由表可知,在地形起伏大的地区,为制作 1:5 万比例尺影像基础底图、1:5 万影像地图及修编 1:5 万线划基础底图时,地形起伏引起的投影差改正问题必须予以考虑。具体处理设计要分析精纠正区域内高差分布,在 TM 景幅内所处的位置等结合起来考虑。

4、投影差改正以灰度重采样前列表建"阵"方式为好,"阵"的间隔大小需分析区内的坡度和最大高差,最高制高点处的位置(在 TM 景幅中),分析统计后再确定"阵"的间隔。

5、本研究成果可扩展应用于中心投影或射线波束方式获取图像的需改正投影差的处理过程中。

参考文献

[1]　李树楷:"遥感图像的几何模式问题"中国科学院遥感所成立十周年论文集"遥感应用的实践与创新"P29–P49, 1989.12 测绘出版社

[2]　李树楷:"卫星多谱段扫描图像 MSS 的定位问题"地理学报第 39 卷 4 期 P382–P395, 1984.12

[3]　村井俊治,李树楷:"写真测量原理に基づいたLANDSAT MSS 画像の几何补正に关する研究"(日)写真测量とリモートセンシング Vol.22 No.4 P24–P32, 1983.12

[4]　王之卓:"摄影测量原理续编"测绘出版社　P182　1986

# LANDSAT TM 双向扫描误差改正模式研究

李树楷　　刘　彤

[摘要]:LANDSAT 4，5 上搭载的 TM(Thematic Mapper) 传感器与 MSS 传感器有所区别，TM 是 MSS 的改进型，MSS 是单向扫描采集数据，TM 是正、反向扫描时均采集数据，TM 双向扫描面的微小差异使正、反向扫描在扫描方向上产生了位置偏移(这里称为双向扫描误差)。偏移量是卫星行进时刻(数据采集时间)T 的函数，且是一种包含有高频成分的复杂函数。其偏移的直观解释是图像上地物不连续。作为美国资源卫星的用户，仅使用美国接收处理设备中的固定软件,对于了解 TM 传感器图像的特征,便于更好地应用这种图像而言是远不够的。

本研究从分析 TM A DATA 的图像特征入手,参考了有关 TM 数据特征的文献，以直接数字相关的方法，完成了 TM A DATA 双向扫描误差改正模式的初步研究工作。开发了相应的算法和软件，取得了一景 TM A DATA 双向扫描误差改正处理需 CPU 2.15 小时(VAX11—785 机)的实验结果。

[关键词]:双向扫描误差,TM A 数据,直接数字相关。

## 前　言

遥感图像的应用已从目视判读、计算机光谱信息的分类、分析发展到当前的多种判据，多种数据（GIS 支持）、多种遥感图像复合分析处理的阶段。LANDSAT MSS,TM 图像数据在各种目的应用中仍是重要的信息源，用户得到的多为数据处理中心处理过的图像（片）和 CCT。从定性分析的要求出发，符合客观规律的辐射校正和几何校正是必须的，满足人们"直观感觉"的图像"漂亮"而作的处理是与事无补的。从定位和定量分析的要求出发，随着遥感技术的发展及处理技术的推进，定位精度的提高显得愈来愈重要。

粗纠正图像的真实定位精度非一句话可说清楚，尤其是定位精度的提高伴随而来的必须在地形起伏大的地区进行地形高差引起的投影差改正，当处 TM 景边缘部份时，有 117m 高差可引起 0.5 像元的投影误差；500m 高差时投影差为 2.1 像元；1000m 高差时投影差为 4.3 像元；2000m 高差时可引起 8.4 像元的投影误差量。这是在多种遥感信息或非遥感信息的复合分析时,不得不考虑的问题。

图像处理设备中带来的或常用的是用多项式法作几何精处理,是无法引入投影差改正的。依中心投影三点共线原理出发的带有附加参数的共线方程式法作几何精处理是作投影差改正和精处理的最佳几何精纠正模式。使用带有附加参数的共线方程式模式最适合处理未加任何几何改正，保持传感器数据采集时的中心投影关系的原始数据，即所谓 MSS、TM 的 A 数据，MSS 的 A 数据处理的研究工作已于 8 年前完成。

TM 的 A 数据中的双向扫描误差的改正问题，诚然,美国的卫星，美国的处理设备，设备中的软件只是执行软件，不可得知，加之我国资源卫星也采用了双向扫描采

集数据这类工作方式，研究双向扫描误差改正模式不仅对 TM　A 数据使用共线方程式法有意义,且对我国资源卫星数据的处理更具有直接意义,也正是本研究的目的和意义所在。

下面分四部分加以阐述。

## 一、LANDSAT　TM　A 数据的几何特征分析

LANDSAT　4，5 号上搭载的 TM 传感器是一种行扫描传感器,由扫描镜、主光学系统、主焦面上的接收器件组及位于最末端的辐射致冷系统焦面上的近红外波段的两个接收器件组和一个热红外接收器件组组成。每个波段（可见光和近红外波段）均由 16 个接收器件组成一个接收器件组，热红外波段只有 4 个接收器件组成一组。

主透镜组后紧接一个扫描线校正装置是由一对平行镀镜作成。其作用是使来回扫描线在前进方向作运动补偿，使每根扫描线均与卫星轨迹垂直（图 1），扫描线校正装置在扫描镜转向时抬起来，使得下一线与前一线连续,以使来回扫描产生的折线的重叠和交叉得到改正，成为互相平行连续的扫描线。

这样扫描镜的一方向摆动可得到 1～5 波段及 7 波段各 16 根扫描线，6 波段是四根扫描线的数据。这些数据已经过校正装置改正成与卫星运动轨迹垂直的平行线组。

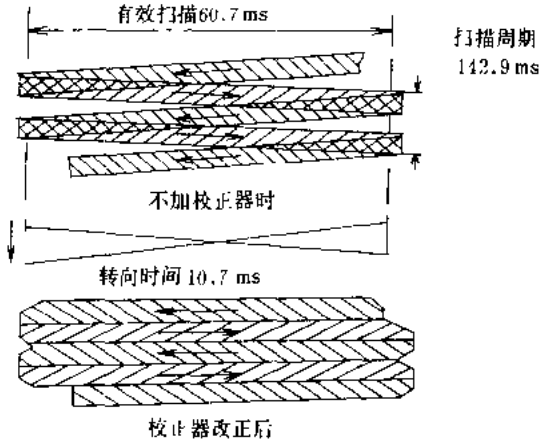



图 1[1]　TM 扫描线纠正

TM 扫描镜可覆盖地面的宽度为 185km,扫描时间为 142.925msec,扫描频率 6.9967Hz,有效扫描时间 60.743msec,扫描线长 6320 像元。

波段匹配精度:扫描线方向:　1–4 波段 0.1 像元

5–7 波段 0.08 像元

1–4 对 5–7 波段 0.19 像元

---

[1]取自: [日]地球观测衛星データ利用ハンドブック

飞行方向: 1–4 波段 0.13 像元

5–7 波段 0.10 像元

1–4 对 5–7 波段 0.27 像元

TM 与 MSS 的区别之一是:MSS 是由西→东扫描时收集数据，由东→西时,不搜集地面物体辐射能量数据; TM 由西→东(称前扫)，和东→西(后扫)扫描均搜集数据。虽经校正装置可使扫描线成为与卫星轨迹相垂直的平行线，但由于前扫和后扫的扫描断面稍有差异而形成 TM A 数据的图像上地面目标不连续的现象(图 2)。

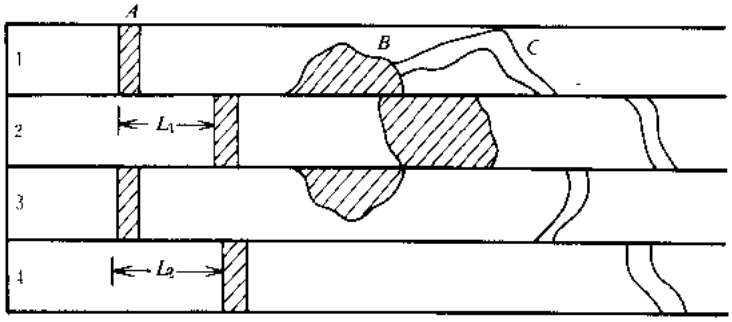



图 2 TM A 数据上地物不连续

图 2 中，1，2，3，4 表示扫描带号，每个扫描带由 16 根扫描线组成，是 TM 一次扫描（前扫或后扫）同时获取的数据。A 为道路的影像，B 为一个湖泊，C 为河流。偶数带上的道路影像均较奇数带上同一道路的影像错开一定数量的值$L$。经验证 $L1 \neq L2$，统计 200 条扫描带后发现，$L$的值为 $45 \pm 10$ 像元,且摆动量是随机的。在已将$L$值第一次改正后的图像上,检验了三条邻带线的地物连续性，所谓邻带线是指,每条扫描带的第十六根扫描线与下一条扫描带的第一根扫描线称之为邻带线。检验后发现,在扫描线的端点处（6300 像元左右）仍有地物不连续现象，当然这种地物不连续的错开值仅 4 个像元。这就给我们提出个新的问题，一条扫描线上处于两端的明显地物之间的像元个数与邻带的最近扫描线上相同的两明显地物之间的像元个数不等，有一个微小的差值约 4 个像元。在第二条带的第十六根线与第三条带的第一根线的比较中,又发现以扫描线中央像元为中心,离扫描线中心愈远处,同一地物不连续的错开方向左右相反，其值也是小值约 3 个像元。

这种现象的产生,从传感器设计上去寻找原因是徒劳的。现假定奇数带为前扫，偶数带为后扫，前扫时中心像元恰是传感器的像底点的话，那么后扫时中心像元显然不是像底点（图 3）。$\beta$ 角,$\beta'$角均以 3000 个 IFOV 计(图 3 所示),$OA$,$O'A'$均为 3000 个 IFOV 在地面上截取的长度,$O'A' - OA = 25.04m$,$O'B' - OB = -24.22m$。这样的量级也仅是约 1 像元的偏移量,不足以说明上述 3～4 像元的偏差现象，且左右两边出现符号相反的偏移现象,其解释为一边拉得不足,另一边已拉得过头。

如此种种,虽原因不详，但实际的 TM A DATA 决不是整根扫描线平移一个定量所能消除地物不连续问题的,这样认为应是符合实际情况的。

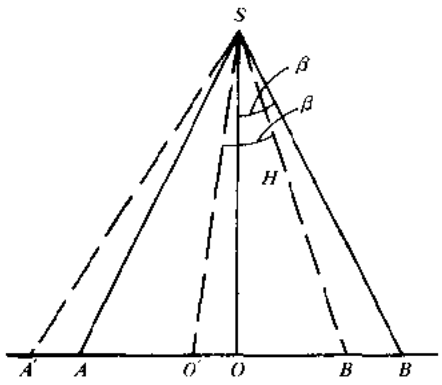



图 3

## 二、双向扫描误差改正的原理及数学模式

如上所述 TM 的 A 数据是一种奇偶带错开的图像上地物不连续的数据,这种数据乍看如同“天书”，是一种灰阶块杂乱无章的灰阶阵（试验样片 10）,一般应用分析人员无法利用这种数据。

TM 扫描镜的扫描速率为 13.9936 次扫描／秒，LANDSAT 4,5 号公称地速为 6.7km／sec，这二者是匹配的，也即 TM 的扫描线间所反映的地球表面地物是连续的。

自然界中各种不同的地物，换言之,某一地球表面范围内的物质,其在某一波段范围内的反射辐射能量分布也是一个连续的复杂曲面，图像上的灰阶变化及形状是区分大型的具有一定的形状的大小地面物体的重要依据，如山川、河流、道路、大块的农田、湖泊等等。所说的 TM 图像上地物的连续,即是指这些地物的连续，这种连续与否的判断，若依人们的眼睛而言，是根据灰阶的一致性，形状的相似及延展性，相互间的关系，人们日常积累的知识的判断等等去实现的。假如把一幅连续的图像等间隔地裁成平行的几百条，奇数条不动,把偶数条均相对于奇数条向同一方向（裁线的方向）移动大约某种距离（即偶数条移动的值不一定相等）之后将其固定，形成一幅新的图像，这幅图像用人眼观察会发现其杂乱无章且极难辨认。这种图像与我们所说的 TM 的 A 数据图像大体相同，用目视恢复这种图像的方法是在偶奇数（相邻的）条上寻找同类地物与上述相反的方向,分别以稍有不等的距离移动偶数条,直至图像的连续判断认为无误时,分别将偶数条固定,即恢复了原来的图像。这也正是本研究所采用的 TM A 数据双向扫描误差改正模式建立的依据。诚然目视方法的这种判断连续性是多指标的，正如上述的灰阶一致性，形状的相似及延展性，相互间的关系，人们日常积累的知识等等。

本研究从这种目视判断连续性的方法入手,用计算机数字模拟人类目视判断的功能,完全仿目视生理现象是困难的，模仿其主要功能能解决问题即可。

图 4 是 TM A 数据中,相邻扫描带接边处的扫描线上的灰度曲线，本实例为：第

十六扫描线标以 L＝16，余类推。16，17 是一对相邻线，32，33 是一对，48，49 是一对。横坐标是像元数，纵坐标是每个像元的灰度值。图 4 数据为 TM A DATA 123／31， 1988。第四波段与图中相同扫描线数的扫描线上第 1→260 个像元的灰度值曲线。

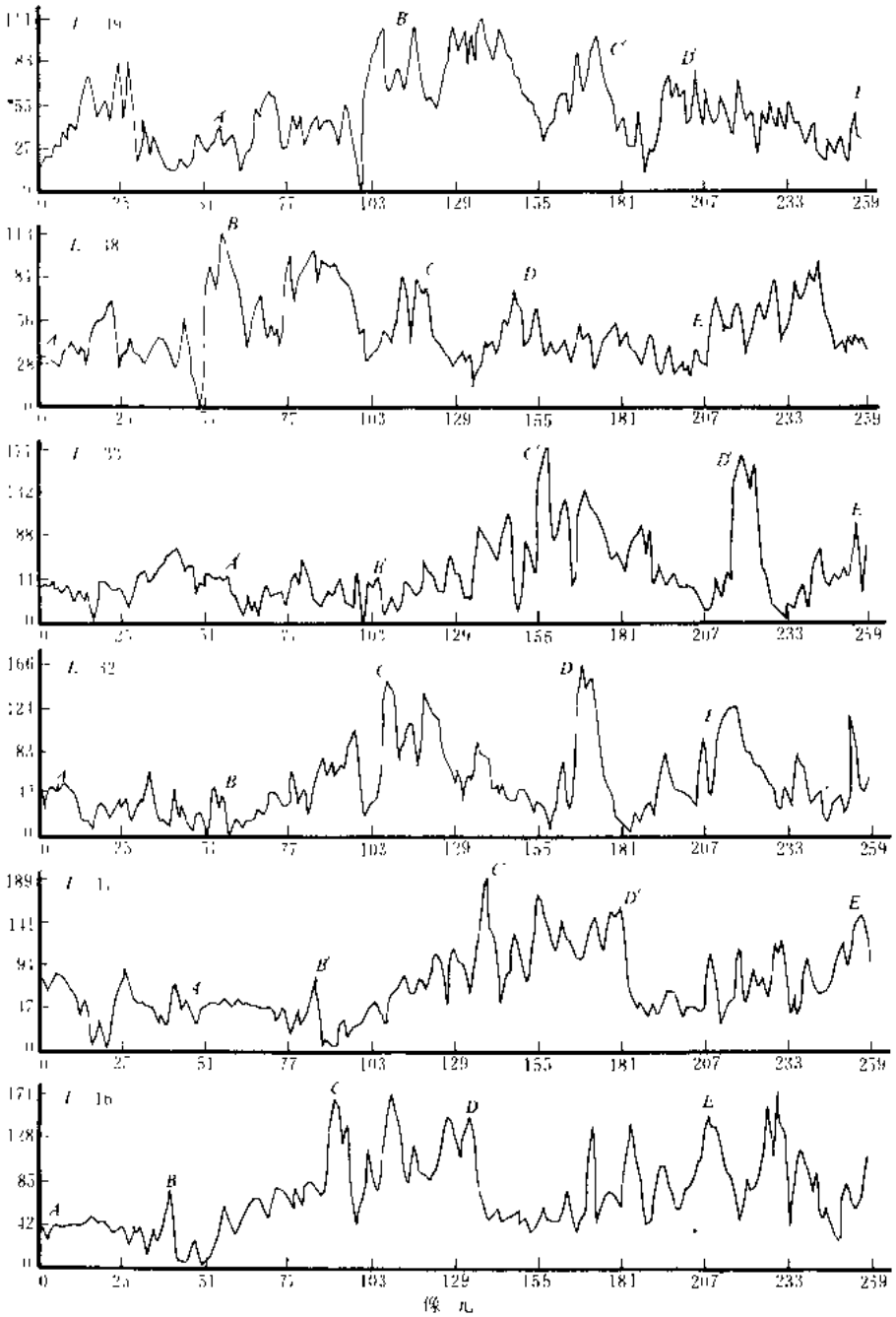



图 4　相邻扫描带的邻带线上的灰度曲线

从图 4 可以看出$L$ = 16曲线上的 ABCDE 曲线与$L$ = 17曲线上的 A′B′C′D′E′曲

线非常相似。同样$L=32$与$L=33$，$L=48$与$L=49$均具有这种相似性。$L=16$与$L=17$曲线上A与A′相差约45像元，$L=32$与$L=33$相差约48像元，$L=48$与$L=49$的A与A′相差约50像元。这与前述统计的200条扫描带其间隔为$45\pm10$像元的发现是相吻合的。

由图4可以看出，ABCDE与A′B′C′D′E′是相似，即存在着一定的差别。这种现象说明了小范围的相似性会比大范围的相似性差。其原因分析如下：TM在地面上的瞬时采样间隔是30m,即其搜集到的数据是30m范围内的辐射能量综合值（暂不考虑多种影响因素）。$L=16$与$L=17$是地面上两条各30m宽的条带。各种连续地物并不都是正好包括了这60m宽度，也不是恰好与扫描线正交，在$L=16$扫描线上,灰度曲线与$L=17$的灰度曲线差异的存在是一种必然的结果，诚然,若扫描线在地面的宽度为10m或5m甚至更小些时，这种相似性要比TM的30m地面宽度的相似性更好,无论如何,这种相似性的存在是肯定的。由于是同一轨道同一天，极短时间段内,由同一台TM传感器获取的数据，其灰度曲线的相似,反映了地物的相似性的结论,也应是有道理的。

判断两组数列（或函数）相似性最简单的数字计算方法应是直接数字相关。直接数字相关的基本公式如下[i]:设$x$代表$L=16$扫描线上一个像元$i$的灰度,而$y$代表$L=17$扫描线上相应像元的灰度，则每条扫描线上共$N$个像元灰度的平均值$\bar{x}$和$\bar{y}$为:

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}x_i \qquad \bar{y}=\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}y_i \tag{1}$$

两条扫描线上$n$个像元的方差$\sigma_{xx}$,$\sigma_{yy}$分别为:

$$\sigma_{xx}=\frac{1}{n}\sum_{i}^{n}(x_i-\bar{x})^2 \qquad \sigma_{yy}=\frac{1}{n}\sum_{i}^{n}(y_i-\bar{y})^2 \tag{2}$$

经改化成:$\sigma_{xx}=\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}(x_i^2-2\bar{x}x_i+\bar{x}^2)=\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}x_i^2-2x\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}(x_i)+\bar{x}^2$即:

$$\sigma_{xx}=\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}x_i^2-\bar{x}^2 \qquad \sigma_{yy}=\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}y_i^2-\bar{y}^2 \tag{3}$$

两条扫描线像元灰度阵的协方差$\sigma_{xy}$为:

$$\sigma_{xy}=\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})=\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}x_iy_i-\overline{xy} \tag{4}$$

两条扫描线像元灰度点组的相关关系，可由（4）式所表达的协方差方式表达。也可以用相关系数$\rho$表达，相关系数$\rho$为:

$$\rho=\frac{\sigma_{xy}}{\sqrt{\sigma_{xx}\sigma_{yy}}} \tag{5}$$

两条扫描线上像元灰度数列按一定的数列宽度，依次进行计算比较，这种比较是通过两条扫描线像元灰度数列的协方差或相关系数$\rho$的计算,所得出的最大协方差值

---

[i] 见参考文献[1]。

或最大相关系数处就是所寻求的相关位置。

TM A 数据每条扫描线包括 6930 个像元。这次试验所用的 TM,每条扫描线是 6656 个像元。由于$L=16$与$L=17$两条扫描线上其相似曲线部分的起始点（或相关位置）是错开约 45±10 像元，那么整条扫描线的所有像元灰度数列作相关，则既无必要也不可能。显然,作相关计算的灰度数列也不能太小，数列太小,则前述的相似中存在的误差可能使相关很困难，甚至失去相关。

从图 4 可以分析一下,100 个像元的灰度数列中,其灰度曲线间的相关性即可表达出来，诚然,200 个像元灰度数列,可能更好地表达其相似性。这中间像元灰度数列的大小与相关性和计算机机时是密切相关的。本次试验是首次试验,确定像元灰度数列为 100 个像元范围。

计算相关系数的个数，也即搜索最大相关系数的范围是多大。在前面 200 个扫描带统计检测中得到的结果是 45±10 像元,也即搜索范围是 20 个像元。但毕竟是仅统计了 200 个扫描带，以此为依据可否通用于一般，尽管不是肯定的结论，毕竟是统计计算的结果，确定以 20 个像元作为相关系数计算的次数,从中取最大相关系数的位置,即为正确相关的位置。其偶数带相对于奇数带的移动量即由此值来确定。诚然,相关系数计算的次数,直接影响到计算机的处理机时。在"一"中已述，在已将移动量作了第一次改正后的图像上，在作相关系数计算的像元灰度数列的远端，发现有 3,4 个像元的地物不连续现象。尽管从传感器设计指标上,无从找出这种现象的原因是什么，把$L=16$和$L=17$这样的相邻带边缘的成对扫描线上，距离远的明显地物之间，作为所包含的像元数有微小差异来处理,应是没有什么问题的。其处理方法为,在一对扫描线的始端、中间和末端，分别以 100 像元灰度数列作 20 次相关系数计算，分别得到 3 个相对位移量（偶数带相对于奇数带），以相关系数最大的位移量作为偶数带扫描线的位移量，按各两个相对位移量差值，以其它两端点间像元个数作为距离，依照按距离分配误差的方法（分配量仅为 3,4 个像元量）,即可得到满意的结果(见试验样片 11)。

## 三、基本算法及改正试验

TM A DATA 双向扫描误差改正的原理及数学模式，如"二"中所述，是仿目视判断的原理出发,采用直接数字相关的数学模式，当然也可采用奇偶带分别处理的方式，即：所有的奇数扫描带作为一种图像（给名字以 A 图像），所有的偶数带作为另一个图像(给名字以 B 图像)，这样一来,A 图像中均为前扫描图像（或后扫）,B 图像中均为后扫描图像（或前扫）。在这样的图像中,前、后双向扫描误差已不复存在。与 MSS 的单向扫描图像的 A DATA 性质一样,A 图像、B 图像分别选取地面控制点(是同一坐标系统）收敛计算出$\omega$角,以两$\omega$角之差将 B 图像旋转之，得到与 A 图像地物连续的新的图像文件。这种方法另文介绍，这里不再赘述。

TM A DATA 中的扫描带（包括 16 条扫描线）内不存在双向扫描误差问题,每扫描带内地物是连续的。需要计算相关系数的扫描线是本扫描带的第十六根扫描线与下一扫描带的第一根扫描线组成一对像元灰度数列。在这一像元灰度数列中,前 260

个像元、中间 160 个像元和最后的 160 个像元作为计算相关系数的灰度数列。这样一景 TM A DATA 共 358 条带,5728 条扫描线中,要计算 357 对扫描线，每对扫描线要对 100 个像元灰度数列计算 63 次，要读两遍磁带数据并写一遍改正后的数据，这个计算量还是可观的。当然，这是对"景"单位处理而言的。

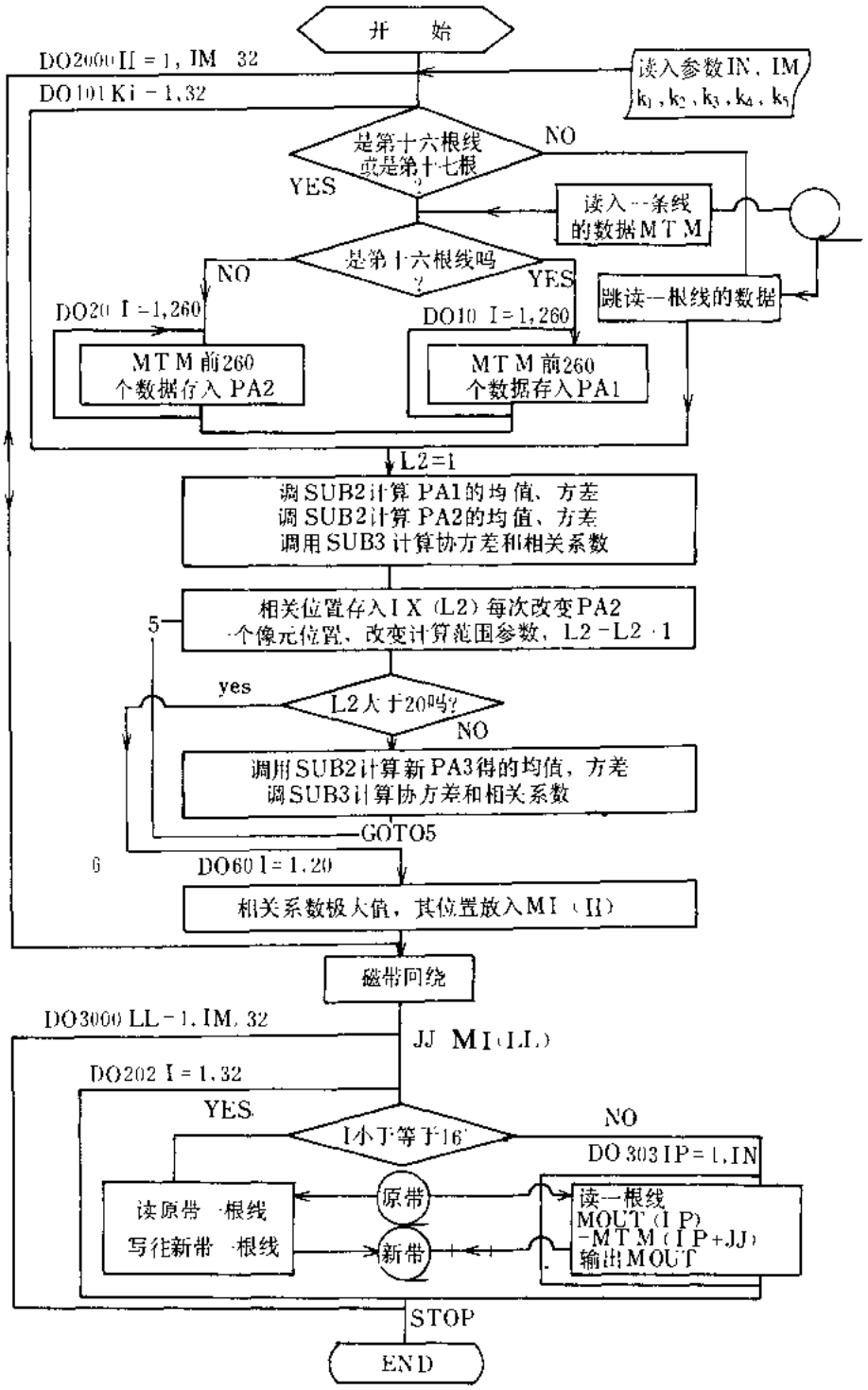



图 5

每对邻带扫描线分别在始端、中间、末端三次计算相关系数,取其最大值的位移量作为偶数带相对于奇数带的位移量,也是提高相关精度的一种方法，一般相关系数小于0.5的是属弱相关,尤其是在地物的灰度差较小的区段内是容易发生的。提高相关精度的另一条途径是将计算的像元灰度数列"对"以同样参数作反差增强或拉伸,使灰度曲线尖锐化，以提高相关精度。关于反差增强的算法及灰度曲线尖锐化的算法为通常方法，本文不再介绍。

基本算法为读取一条带仅在缓冲区内放置三对变量1160个数据，其余跳读。每计算完一对像元灰度数列的最大相关系数，随即保留后一带的三个变量580个灰度数据，再读下一条带的数据时,又与保留的三个变量中的数据,计算相关系数。如此循环读完一遍磁带数据后随即计算出所有偶数带的位移量,这样的处理使得无用的数据均跳读，对计算机内存的要求不高,一般微机系统上即可进行。

应用程序原理流程图示于图5。

本次试验取用1988年，北京附近的TM A数据，其轨道号为123／31，第四波段，每条扫描线6656个像元。一景5728条扫描线。以VAX-11-785机，CPU为2.15小时。试验比较图片示于(试验样片12、13)。

## 四、结论及今后的课题

1、TM A数据双向扫描误差,用直接数字相关的处理模式是可行的，其原理是人眼仿生的一部分。直接数字相关是最简单，效果尚可的数学方法,已取得了初步的试验结果。一景TM A数据，在VAX-11-785机上，CPU为2.15小时。地物的连续性精度为人眼分辨不出的程度。

2、本研究仅改正TM的双向扫描误差引起的图像上地物不连续问题，TM的接收数据中，没有作这类改正的有关数据①。且与通常的利用传感器姿态数据与否的几何处理是不同的两个概念。

3、在地面地物灰度反差很小的地区，正好落在计算相关系数的区域时，一种处理方案是如何提高相关精度，另一种方案是如何自动选择强相关范围。本研究虽取得初步研究成果，但这些问题仍是本研究的课题。

4、本研究成果可扩展应用于存在双向扫描误差的各类线扫描图像(包括CCD线阵)中，包括我国资源卫星ZY-1的数据处理。

## 参 考 文 献

[1] 王之卓:"摄影测量原理"测绘出版社，1979 P266。

[2] [日]"地球观测データ利用ハンドブック"，宇宙开发事业团。1986年P1-22-1-36，2-36-2-46

① 见参考文献[2]。

# 遥感信息对地定位技术的变革性进展

李树楷　　徐庚庆　　钱育华

[摘要]:以往遥感对地定位模式的研究,几乎无例外地均以地面控制点为基础,建立遥感图像空间与地理坐标空间的对应关系,从而实现遥感图像对地定位。其变换模式有:共线方程式、多项式、影像数字相关、随机场内插法等。对于卫星遥感图像而言,均取得了1个像元的对地定位精度。GPS全球定位系统的出现,使遥感图像从空中直接对地定位,生成地学编码图像成为现实。

本文阐述了以往遥感信息对地定位方法存在的缺点:大量人工劳动的介入,全部依赖地形图造成的困难,受地区及行政境界限制等,而动态GPS遥感信息对地定位,具有全时域、全球空间、全天候、快速高精度的特点,使遥感信息对地定位方法产生了巨大的变化。阐述了动态GPS在航空、航天遥感图像对地定位中的应用前景,以及灾害监测、全球环境监测、遥感综合应用的前景。并提出了发展动态GPS遥感图像对地定位技术系统的设想。

[关键词]:动态GPS对地定位技术,全时域,全天候,差分定位。

## 前　言

遥感对地定位技术，就其完整性而言，始于美国阿波罗(APOLLO)号宇宙飞船，完成了月球表面的摄影制图。其时采用地形摄影机、恒星摄影机、全景摄影机、测高仪获取摄影相机投影中心的位置和姿态参数，实现了对月球的摄影测量。70年代的美国资源卫星1，2，3号使用了卫星跟踪网STRN，TDRSS系统，航天飞机采用惯性测量设备IMU测定空间位置。姿态角测定也各不相同、Landsat 1, 2, 3采用地面陀螺系统，Landsat 4用带有恒星控制的惯性测量系统。Landsat 5已采用GPS全球定位系统。

GPS(Global Positioning System)全球定位系统是美国海军导航卫星系统NNSS(Navy Navigation Satellite System)的发展和改良。NNSS系统因一次定位需时较长不能用于高速动态定位，且每天仅可利用几小时，不能全时域利用。NNSS与GPS的区别示于表1。1988年3月在美国空军及有关部门协调下确定将GPS全球定位系统的操作卫星由原来的21颗(18颗加3颗备用星)增至24颗，1992年全部发射上天。

美国民间公司1982年开始研究Triad导航系统，操作卫星称之为GEOSTAR,轨道高度为3.6万km。根据报导,价格低廉，以米级精度定位。已知高程的定位点能以分米精度定位。

欧空局正在建设中的NAVSAT导航卫星系统是全球定位系统,也是一种民用卫星导航系统。苏联的全球卫星导航定位系统是GLONASS。

世界许多国家(包括我国)，鉴于全球导航定位系统具有解决不少学科重大问题的潜力和国际战略目的，均热心于开展应用试验、数据处理模式、接收机的研究，并研

制自己的系统。

表1 GPS与NNSS的比较

| | NNSS | GPS |
|---|---|---|
| 开发年代 | 1950年左右 | 约1972年 |
| 实用开始年代 | 1967年一般公开,2000年废止 | 预定1989年，1992年完成 |
| 应用目的 | 船舶导航 | 船舶、飞机、宇宙飞行的导航 |
| 应用区域 | 全球 | 全球、宇宙空间 |
| 可利用的时间带 | 在上空时一次10—20分钟，一日数次经过，一天可用几小时 | 任何时间，目前一日数小时 |
| 定位精度 | <100m | <100m(一般用)，<16m(军用) |
| 测量上的用途 | 地面控制点设置 | 地面控制点设置，基线精密测定 |
| 测量上可达精度 | <数m | <数m(单点)，<数cm(干涉计) |
| 测定方式 | 卫星电波的多普勒效应 | 电波到达所需时间(到卫星距离) |
| 电波频率 | 150MHz-400MHz | 1557.42MHz(L1)-1227.6MHz(L2) |
| 高度 | 1000km | 约20000km |

遥感信息对地定位技术，由于传感器的位置、姿态测定装置精度的限制，以往仅将从卫星获得的位置、姿态参数作为初始值利用。地面控制点数据一直是卫星遥感对地定位的数据来源。众所周知，遥感应用中必须解决的两大问题：一是定性（回答是什么）；二是定位（回答在什么地方，数量）。其中的定位问题,将由于GPS全球定位系统及其它定位系统的发展和应用,而面临开创性的变化。下面仅就GPS全球定位系统作三方面的叙述。

## 一、GPS全球定位系统国内外应用现状

美国国防部开发的GPS全球定位系统(略称：GPS。下同)的最初目的是飞行器、船舶导航。有关船舶导航问题本文不再叙及。现仅就应用试验较多的三个方面的问题阐述如下：

1、大地测量中三角点位及基线测量方面的应用。这是各国应用试验研究较多的方面,三角点位及基线测量是遥感、测绘制图的数学基础,也是地震预测、地壳变形、板块运动研究的主要技术手段。

1983-1986年间，美国用GPS在原大地网上施测了1700多个点。联邦德国已进行31次联测，施测了1600多条基线。众所周知的阿拉斯加～加拿大GPS联测，平均边长1000km。联邦德国1986年用T1-4100接收机作10个边长为100-300km点的联测。这些试验结果与原有方法比较，高程之差小于5cm，平面坐标精度达几厘米，相对精度达$2\sim5\times10^{-7}$，且证实了GPS的稳定性。1983年联邦德国用四台V-1000接收机联测35个点76条基线，边长为5-20km的二等网，最后点位平面坐

标中误差为 1−2cm，椭球高的中误差为 1−3cm。相对精度达 1−2ppm。如用干涉法可达 0.1ppm，可满足地壳变形观测之要求。1985 年瑞士布短边网用 GPS 联测，得到平面位置 5mm，高程精度为 15mm 的结果。

加拿大、澳大利亚、日本等均作了类似试验。如日本 1987 年 2 月,在筑波用 3 台 GPS4000SK 接收机对原三条基线作了测量，误差为 6mm,相对精度为 0.281ppm。

我国国家测绘局、军测系统等也作了大量试验研究。1987 年军测系统用 WM101 接收机在我国北部地区分别以长、中、短三种距离的基线场和等级网上作了试验，相对精度达到 1−2ppm。

1989 年军测系统在河南、山东、河北一带又进行了三种距离 GPS 基线与定位测量试验,取得了相对精度为 1ppm 的结果。

武汉测绘科技大学、部分省测绘局、石油部门等均进行了类似的试验研究。同时我国在后处理模式、接收机研制方面也有了相当进展。如 GPS 9301，GPS 9302 接收机的问世，全国 40 多个接收站已组成跟踪网。

2、摄影测量中摄影站点及地控点测定方面的应用。"利用 GPS 和 INS(惯行导航系统)进行航空摄影测量"已列为联邦德国的国家课题,由慕尼黑国防大学天文−物理大地测量教研室及摄影测量与制图教研室共同承担。1986 年−1987 年国防大学进行了理论研究和飞行实验取得了初步成果,由 GPS 测量得出的坐标同地面测量坐标相比较精确到 2cm, GPS 与 INS 的匹配试验结果尚未看到。

1985 年美国大地测量局(NGS),利用 T1−4100GPS 接收机与 WILDRC−10 航空摄影机匹配,作了两次飞行试验，荷兰 Delft 大学利用 TR5SB 和 NR52GPS 接收机与上述相类似的航空摄影机匹配,于 1987 年进行过两次飞行试验。这几次试验,利用 GPS 系统的载波相位观测值和动态定位技术使航空摄影机定位精度优于 5cm。

日本 1989 年利用 GPS 测定空中摄影点和地面几个点的位置，采用单点和相对定位的混用方法作了模拟试验。认为用微分测位法及复合惯性导航系统，在摄影点的位置能以 1m 的精度测定时，地面有一个控制点就可获得准确的摄影点的方位元素。在采用单点法能得到 10m 精度时，地面上只要有两个控制点,即可准确获得摄影点的方位元素。地面点位及其距离均用 GPS 测定。还认为对于宇宙摄影测量利用 GPS,可显著提高宇宙摄影像片的外方位元素的精度。

我国地矿部在对我国塔里木盆地航空物探导航飞行中,应用了 GPS 成功地完成了多次未曾完成的航空物探飞行任务。

3、其它方面的应用现状。建设斯坦福直径为 1km 的对撞机和欧洲核研究中心直径为 9km 加速器的地面控制都采用 GPS 测量。英吉利海峡海底隧道的地面控制，油田地面沉降的观测及大坝变形观测等均应用过 GPS 技术。

## 二、GPS 在遥感信息对地定位技术方面的应用前景

如"一"中所述,GPS 已在 Landsat 4,5 上安装使用，随着 GPS 系统的建成及处理方法的完善，对遥感对地定位技术同样将产生变革性影响。

1、航天遥感图像对地定位技术

航天遥感图像目前主要包括两部分，其一是胶片摄影系统的图像。LFC，MC，MKT-6, KATE-140, KATE-200, KFA-1000 及我国卫星像片等，均属此类。其二是扫描系统(或叫电-光系统),如 LANDSAT1-5 和预定在 1991 年发射的 LANDSAT-6、法国 SPOT 等。

A、胶片摄影系统

胶片摄影系统中,主要用高分辨率黑白胶片、彩红外胶片、光谱片等,这类图像的空间分辨率很高，几何变形小,其几何定位技术往往以卫星辅助数据为辅,地面数据为主,处理设备是在原航测设备上加一定的软件。由于摄影点的姿态和位置参数精度不够(或没有),长期以来,人们采用地面控制点数据强制符合的方法,以恢复或改正摄影瞬间的几何关系,从而达到对地定位目的。为了获取合理的经济效益，兼顾精度和效率，研制了从高精度到满足一般要求，从极昂贵的设备(一台设备百万美元级)到相对廉价的设备系列。当前,计算机的多功能、高效率、小型化、廉价化的发展趋势是很明显的,光机电型的航测设备近些年来却看不出有廉价化的明显趋势。为了处理胶片摄影图像和维持仍以胶片为信息载体的国家基本图的生产,不得不继续购置昂贵的航测设备,从某种意义上说,这是摄影点的姿态和位置参数精度不够,不能满足实际要求的必然现象。

GPS 及其它导航定位系统的出现，采取一定的技术措施获取高精度摄影点外方位元素是可能的。众所周知，外方位元素已知，则定位处理简单，处理设备可大大简化，可以说 GPS 及其它导航定位系统的出现，将导致摄影测量理论研究方向和设备研制方向的变革。

B、扫描式图像

航天扫描图像的波谱域、波段宽度、波段数随应用的需要及设备研制水平的提高，日趋细化、多波段化。传感器位置与姿态参数记录数据在 LANDSAT 1-4,SPOT 等图像对地定位时，只能作为初始值利用(或不用)，实际应用中主要靠地面控制点定位。GPS 等系统将给出航天扫描图像传感器的姿态、位置参数的准确数据，图像的对地定位模式也将是很简单的，即使需要地控点也是极少量的。随着专家系统的研制成功,实现航天遥感图像获取、精纠正、图像处理、信息系统、计算机制图（影像、线划、影像线划结合等）一套自动化处理是完全可能的。

2、航空遥感图像对地定位技术

A、航空胶片摄影图像

使用片种与卫星大体相同。如前所述，航空遥感胶片摄影图像的对地定位主要靠地面控制点来实现,所用设备可以说都是航测设备，其理论、方法是成熟的。采用 GPS 与 INS 匹配应用或一种复合技术等,取得适用的摄影点外方位元素，可以实现航空遥感胶片摄影图像无地面控制点对地定位。近来数字摄影机(暂称为摄影机)，实时数据获取设备已出现,数字摄影测量的理论已成熟。几十年来,以胶片为唯一信息载体的航空摄影测量，将出现信息载体以磁带、光盘等新型载体与胶片并存的局面。权威性的昂贵的航测仪器设备逐渐与简单设备或廉价的计算机并存,信息载体长期保存是必要的，但是，即时定位(或测图)，即时使用的美妙前景将会出现,免去查找、携带大量份量很重的地形图之劳苦。诚然,这需要作大量的研究工作，但这的确是对延用了

几十年的摄影测量与航空胶片摄影遥感图像定位的概念、理论、方法、仪器设备的严正挑战,使人们看到了这一令人鼓舞的发展前景,受到国内外学者的密切注视。

B、扫描式航空遥感图像

多年来,由于飞机平台位置及姿态变化,较之卫星平台剧烈以及扫描图像的特有几何特征,航空扫描式遥感图像对地定位问题仍是急需要深入研究的课题。相对于卫星遥感而言,机载遥感具有机动灵活的特点,设备研制有更大的宽容度(体积、重量等),根据应用目的,波段更换较易实现。因此获取的信息日益显示出较强的应用潜力。但由于对地定位及掌握波谱特性及其规律的困难,至今甚至还做不出一张看起来像样的影像镶嵌图。波段匹配、图像处理几乎是在无理论根据的情况下进行,与其它遥感信息、非遥感信息的复合尚无章法可循。从应用角度出发而研制的有70～128波段的新型传感器—成像光谱仪已问世,我国不久也将出现,但其对地定位技术的研究尚未安排,地图化、复合分析更未考虑,暴露出遥感传感器等硬设备的研制水平远高于应用技术水平的尖锐矛盾现状。因此,尽快研究并解决GPS与INS匹配或其它形式的复合应用技术,以适用精度获取传感器位置和姿态数据,对于突破航空扫描遥感图像定位这一配套技术系统已成为当务之急。这对于航空扫描式遥感图像应用潜力和经济效益的发挥具有至关重要的决定性的推动作用。

全天候、全时域的波束式合成孔径侧视雷达图像,其全天候、全时域的特点及较之其他遥感图像不同的电磁波特性,因而成为遥感技术发展的一个新领域。对于测绘而言,也是一种全天候的数据获取技术,使人类测绘可在全时间域内进行。对于资源勘查、灾情监测等均有其特殊的意义和价值,也是遥感技术的前沿技术。GPS等的应用,遥感平台位置及波束发射角度等参数的精确获取,是侧视雷达图像定位和三维量测的关键,使本来复杂的微波遥感定位得以用相对简单的应用技术处理,这对雷达图像应用潜力的发挥更具有重大意义。

传感器位置与姿态准确数据的获取,对于航空航天遥感图像能以简单方式正确定位,使不同分辨率、不同波段、航空与航天、遥感与非遥感数据,以规范化格式复合分析综合利用,形成不受技术阻隔的信息处理流程,直至取得最终成果的设想成为现实。同样是对遥感信息应用的观念、技术路线、应用效果的一种飞跃。

3、在综合学科及其他领域中的应用前景

GPS的高精度、适用性,使得自然科学中多种学科的研究中有望取得突破性进展。如:费时费力耗资的地球板块运动监测、地震预报、地壳变形观测、麻烦而又危险的滑坡、泥石流的监测预报;耗时而又困难的冰川进退预报、雪溶量计算等。就全球范围而论,航天遥感图像给出了确定对象物性质的信息。GPS的发展,实现全球统一坐标系统内定位是现实的。全球航天遥感图像的对地定位将不再受国界和其他自然屏障的限制,气象卫星的对地定位可以相对高精度实现,全球大气圈、生物圈、水圈、岩石圈的综合研究将成为现实。展示了全球遥感综合应用研究的灿烂前景。

GPS及其它导航定位系统这种高技术的出现,使测绘界、遥感界面临变革性的挑战;对于生物、地学界及其他学科领域同样面临着需仰目而视,继而奋起直追的局面。以至对交通、通讯和人们的日常生活等许多领域都必将产生愈来愈明显的影响,也是政府部门在国际关系战略决策中不可忽视的因素。

## 三、发展我国遥感信息对地定位技术的设想

1、制定国家发展战略规划,全球导航与定位系统。如前所述,世界上先后已有多个系统问世。美国军方的 GPS(三维),美国民间系统 GEOSTAR(二维),欧空局系统 NAVSAT、苏联系统 GLONASS 等,其它国家也有类似计划。这些高技术系统的出现是可喜的,但各为其特殊目的服务。如美军方 GPS 系统之 L2 频道是军用,将来还要降低 L2 星历精度,使用 C／A 码精度低于 100m 等。我国相应的发展战略应是:尽量利用可利用的信息资源,同时发展具有我国特色的对地定位技术体系,根据世界各系统的可利用程度,采用尽可能的技术措施,如建立我国地面跟踪网,提供精确星历及其它补充系统。就我国国情,近期用几十、上百亿美元建立一个新系统是不实际的。但国家应对这项高技术给以足够的重视,进行跟踪国际发展水平的研究是刻不容缓的。

首先应即着手制定我国空间对地定位技术的发展战略总体规划,安排必要的人力、物力和资金,把规划落实到实处是非常必要的,避免一哄而起,却又形不成优势的现象再发生。

2、遥感对地定位作为空间对地定位高技术发展的一个领域,并作为国家总体机构的一个分支机构,这个机构应具有多学科综合研究的能力和组织联合攻关的能力,现在就应该组织人力、物力集中研究,提出方案。

遥感分支机构的研究方向是:

[1]遥感对地定位技术的理论及方法研究。

[2]新型实用遥感技术应用系统的研究。

[3]遥感对地定位技术应用规范化研究。

[4]典型应用试验与示范研究

遥感分支机构的社会职责是:

[1]向国家负责,向总体机构负责,国内开放,所有研究成果非部门所有。

[2]组织全国遥感对地定位的协力攻关。

[3]加强对外技术交流,不断提高应用水平。

实施方式:

[1]列入国家高技术攻关项目,组织联合攻关。

[2]自办公助,选择一些应用前景好,有一定基础的部门择优支持。

[3]组织协调组。

从国家高技术发展需要及追踪国际高技术发展动向出发,认为:方式[1]最好,见效快。当前国际上尚处实验研究阶段,我国立即起步,可以迎头赶上,争取到宝贵的跟踪时间。方式[2],只可因国情不允许不得已而为之,减慢了发展速度。第[3]种方式,据我国以往情况,往往效果不佳,很可能要浪费人力、物力和宝贵的追踪时间,形不成总体优势,跟不上国际上的发展速度。这要据国情定夺。

3、有条件的单位部门可率先着手研究,但要接受国家总体规划的指导和总体机构的组织和协调,尽可能避免大的重复。

总之,全球导航与定位系统的出现,由于具有高精度、快速、全时域、全球空间

等特点，已成为国际上引人注目的高技术领域。其成果对多种学科均具有变革性的意义，在遥感信息对地定位技术方面同样具有极为深远的影响,也是国际关系战略决策中不可忽视的高技术因素。希望引起国家科技发展决策部门高度重视，并采取相应的有力措施,建议列入国家"八·五"规划，尽快开展工作。

## 参考文献


[1]谢世杰: "第三代航天定位卫星《吉奥斯塔尔》(GEOSTAR)"

[2]王任享: "国外航天摄影定位与制图"军事测绘 1989 年 3 日期 P38-41

[3]李标芳: "GPS 在航空物探导航定位中的应用"中国测绘学会 30 年学术讨论会论文集 1989 年 4 月

[4]许其凤、郝金明: "华北地区的一次 GPS 测量实验及大地测量个别问题探讨"中国测绘学会成立 30 年讨论会论文集 1989 年 4 月

[5]刘基余: "提高 GPS 卫星定位精度的主要措施"中国测绘学会成立 30 年学术讨论会,论文集 1989 年 4 月

[6]王小丁，谢世杰: "GPS 在空中三角测量中的应用"军事测绘 1989 年第 3 期 P42～44

[7]谢世杰: "GPS 定位测量近况"军事测绘 1989 年 3 期 P28～36

[8]J.T. CONNOR:" GPS Fixed Wing FAA exploratory flight test" IEEE NTE ppell.l.cl18.1982

[9]J. R. Lucas: " Aerotriangulation Without ground control" photogrammetry engineering and Remote Sensing Vol.53. No.3 PP314-314. 1987

[10]R. D. TILL:"Helicopter GPS Navigation" IEEE PLANSPP206-213. 1982

[11]近津博文: "地上测量の观测条件を结合した写真测量の误差调整に对するGPSの利用"写真测量とリモートセンシンゲ Vol.27, No.1.1988

[12]土屋淳: "人工卫星による新しい测位システムGPSとは"[测量] Vol.37. No.2 1987 P13-20

[13]柿沼清一: "GPS 受信机による测量デモンストレシヨン"[测量] Vol.37, No6. 1987. P47-56

[14]村上亮: "GPSによる测位とその测量への应用"[测量] Vol.37, No.2 1987 P21-23

[15]渡边正宏: "LANDSAT 6 号について"[日] RESTEC 22 号平成元年 3 月 P41-43

[16]王之卓: [摄影测量原理续编]测绘出版社 1986 P229-241

[17]朱华统: "NNSS 和 GPS 近况"军测科技 1987 年第一期 P49-56

[18]苗履丰: "国外 GPS 定位技术的最新进展"中国测绘学会成立 30 年学术讨论会,论文集 1989.4

# GPS 在遥感信息对地定位应用中的试验研究

GPS 联合试验研究组

李树楷　徐昶　执笔

[摘要]:GPS(GLOBAL POSITIONING SYSTEM)全球定位系统具有全球范围、全天候、全时域、连续快速、高精度定位的特点,已引起广大科技工作者的关注,在动态对地定位及精确导航领域中的应用研究，尚处试验研究阶段。1988 年 Ackerman 以少量地面控制点，将 GPS 相位差分动态定位数据作为观测值，采用区域网平差方法，得到了厘米级精度的试验研究结果①; Leonard 的研究报告②和 Biggs 的研究报告③中,披露了用导航型 GPS 接收机,无地面控制点的单机定位精度分别为 3m 和 75m 的试验结果。未报导精度验证方法。

联合试验研究组于 1990 年 7 月～11 月在北京地区，使用 TANS PATHFINDER 导航型 GPS 接收机，航高 600m，同步航空像片比例尺为 1∶6000，像片重叠度 80%，以实测地面控制点作空中后交,所得到的投影中心位置为基准，得到 GPS 单机无地面控制点的定位精度(三维)X:7.982m; Y:7.451m; Z:2.725m 的结果。

本试验研究所得到的定位精度，完全满足灾害监测机载遥感图像对地定位的精度要求,可直接应用于灾害监测的机载实用系统，气象卫星图像定位及中、小比例尺地形图精度要求的遥感图像对地定位系统。

[关键词]: 相位差分，GPS，空中后交法，动态对地定位。

## 一、遥感信息对地定位的现状及存在的问题

遥感技术的发展，经历了两个阶段。航空摄影测量可以称为初期阶段,这一阶段是以黑白摄影胶片为信息载体，框幅式摄影机为传感器，以可见光(全色)作为工作波段范围的单波段遥感技术。现代遥感技术阶段是以黑白、彩色、彩色红外、多光谱胶片以及磁带、光盘为信息载体，以框幅式、行扫描方式、CCD 推帚式、全景缝隙摄影式、波束式的多种传感器为主要数据获取手段的遥感技术。其工作波段占有从紫外、可见光、近红外、热红外、微波等相当宽的电磁波谱域,带宽之小，波段数之多，更是其突出的特点。但是，无论是初期阶段,还是现代遥感技术阶段，其技术支柱只有两个:

---

①见参考文献[1]。

②见参考文献[2]。

③见参考文献[3]。

1、回答是什么（定性）。2、回答在什么地方，有多少数量（定位，定量）。其中后一个问题的实质是遥感信息的对地定位问题。迄今为止，遥感的对地定位主要有两种方式：

[1] 正变换：或称空→地型。即传感器的位置和姿态是具有足够精度的已知数据，利用简单的变换关系式，将遥感信息定位于相应的地面坐标系中。这种方式只有地面立体摄影测量具有类似的性质，而航空摄影测量及航空航天遥感图像迄今尚未实现。

[2] 逆变换：即利用地面控制点，建立图像坐标系与地面控制点坐标系间的变换关系。即把遥感图像依地面控制点强制定位于地面控制点坐标系中，这是现行的方法，这种方法的突出问题是需要地面控制点。依此产生的另外两个问题是：

(1)就航测制图而言，庞大的地面控制点的测设队伍，复杂的内业处理设备及作业程序，以年计的成图周期，已为众所周知，毋须赘述。遥感图像对地定位时，需查找大量的地形图，去人工选读遥感图像与地形图对应的地面控制点，花大量机时作几何纠正和重采样。一景遥感图像按 185×185km 的面积计，需 1／2.5 万地形图约 350 张；地形图更新周期以十年计，十年的时间里，不仅地物，甚至由于开发等原因，地貌也可因人为作用发生了变化，在地形图上选点难，甚至选不出控制点的情况也常常发生，荒漠或无图区，大面积水域区，遥感图像无法定位的现象也是存在的。这与遥感快速、准确、短周期的优点是一对尖锐的矛盾。

(2)全球环境的研究是国际上热门课题，定性研究用的卫星图像可以买到，定位定量问题，成为全球环境问题能否高质量的研究和采用何种方法研究的关键问题。

预计 1992 年完成的 GPS 全球定位这一高技术系统，将成为解决上述问题，使遥感应用再上一个新台阶的关键技术系统。

## 二、试验研究的目的

本试验研究从遥感信息对地定位精度、实时性的多档次出发，探求在下述三个方面应用的可能性。

1、常规遥感信息的对地定位，精度以像元计。一般以十天或月计周期内提供定位数据。经事后处理，实现正变换方式，遥感信息直接地学编码化（定位化），无需地面控制点或需极少地面控制点，按周期论，称之为准动态。

2、灾害监测遥感图像的对地定位，精度要求比“1”稍低，一般以小时计周期内，提供定位数据。在几小时内，将灾情监测遥感图像及分析结果提供防灾救灾指挥机关，以利防灾救灾和灾情监测（包括预警）。可称为中动态定位。

3、实时遥感数据获取，实时处理综合系统中的对地定位子系统，是当今遥感信息对地定位的前沿，即实时获取数据、实时定位、实时处理的综合系统。由于是实时定位，称为实时动态。

这三种情况，均需获取传感器的准确位置与姿态数据，使遥感图像脱离过去以地形图等地面控制数据源，实现正变换对地定位。

基于上述，研究 GPS 定位理论、方法、定位精度及应用 GPS 定位数据的理论、方法、技术处理流程，作为各种实用对地定位系统建立时的技术基础。

## 三、 GPS 全球定位系统的航空飞行试验

1990 年 7 月 28 日，8 月 17 日，11 月 3 日在北京地区进行了三次机载 GPS 全球定位系统的飞行试验。

1、试验条件及试验过程

[1] 主要仪器设备

a. GPS 接收机。采用美国天宝 (TRIMBLE)导航公司的 TANS PATHFINDER 导航型 GPS 接收机两台。它是一种中等动态型二通道 GPS 接收机，最多可跟踪八颗卫星，其性能指标为:

| | |
|---|---|
| 数据更新率: | 1s(典型值) |
| 第一次定位时间: | ＜2 分钟，二维定位(典型值) |
| | ＜3 分钟，三维定位（典型值） |
| 精度: | 定位 25m(SEP)、 速度 0.2m／s |
| 动态范围: | 速度 0–300m／s, 加速度 2g |

b. 2 台 WM101GPS 接收机（地面控制测量用）

c. RC–10 航空相机和 AΦA–T 相机各一台

d. E2DM503 电子经纬仪一台，红外测距仪一台

e. 运五型飞机一架

[2] 试验场：建立了 3×1km 的专用试验场。试验场中央是一条 3km 长，40m 宽的公路，公路上以 250m 间隔布设了 13 个标志点，其中 $P_1$,$P_2$,$P_7$ 点用两台 WM 101GPS 接收机测定，作为主控点，13 个标志点连成主控导线。以主控导线为基础,在公路左右约 250m 处，布置了 17 个控制点，并铺以 50×50cm 的黑纸标记。用红外测距仪和电子经纬仪完成了 30 个控制点的联测任务。经整体平差后,控制点精度为 0.2m。点位分布见图 1。

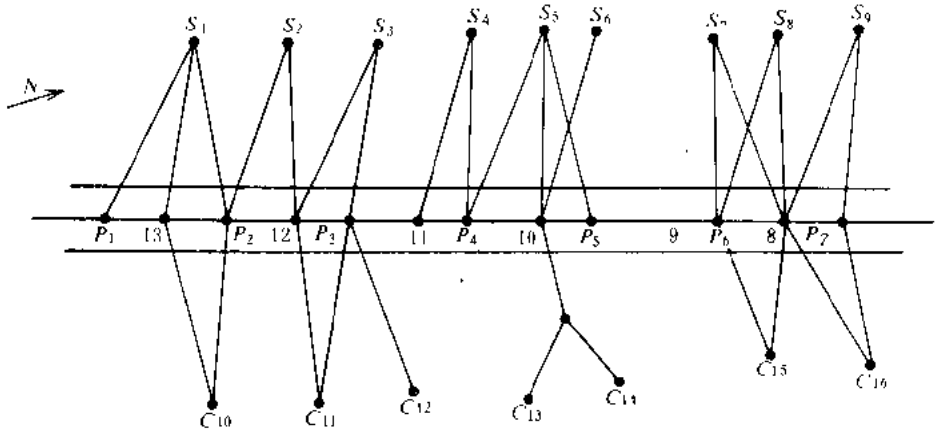



图 1 地面控制点分布图

[3] 飞行试验过程:第一次飞行主要验证了 TANS GPS 接收机的性能，第二次飞行，航高 600m，使用 RC—10 相机，f＝152mm，曝光时间 1／200 秒，航向重叠

60%，巡航速度 150km／h，像片比例尺 1∶4000。共飞五条航线，60 张像片。由于正处美国调整卫星参数期间(3 月-8 月)且只完成二维定位。第三次试验飞行，航高 600m，使用 AΦA-T 相机，f=98.499mm，曝光时间 1／100 秒，航向重叠 80%，巡航速度 130km／h，像片比例尺 1:6000，共飞三条航线，50 张像片。

[4]试验期间卫星分布状况:在 11 月 3 日 9 时 50 分，天空中可见星共 6 颗，分别为 2，9，12，13，14，18 号。选择 2，12，13，14 号星时，PDOP 值为 2.86,之后 PDOP 值逐渐减小，在 10 时 45 分时为 2.36。这期间卫星分布情况良好，由几何分布因子引起的误差影响较小。

2、数据处理(数据处理流程见图 2)

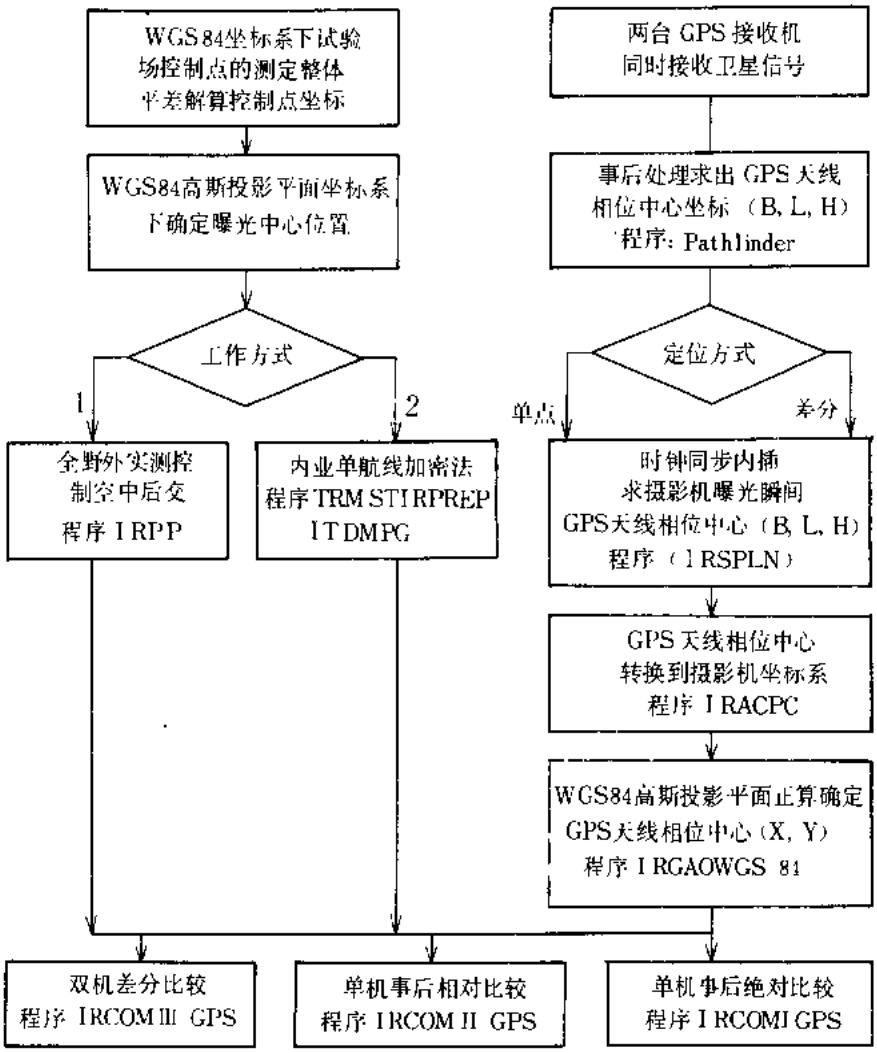



图 2　GPS 动态定位试验流程图

[1] 摄影测量室内量测及空中后交解求相机投影中心的外方位元素(X,Y,Z,$\psi$,$\omega$,$\kappa$)。

以试验场 30 个地面实测点作为像控点，像片量测用 PSK-2 精密立体坐标量测仪。以 5$\mu$ 精度量测像片坐标，使用通常的空中后交程序，在 ALTOS-68000 微机上，求算出投影中心外方位元素(见表 3)，空中后交精度为 0.7m。以三个线元素值($X,Y,Z$)作为评定 GPS 定位数据精度的基准。

[2] 相机投影中心与 GPS 接收机天线中心偏差向量的确定。TANS GPS 接收机分为三部分：天线、CDU、TANS。飞行前，GPS 接收机天线安置在飞机外壳顶端。并尽可能安在相机中轴线上，量测 GPS 接收机天线中心与相机投影中心的三维坐标偏差。其值为：

$$\triangle X = 0.449\text{m}\ ,\ \triangle Y = 0.016\text{m}\ ,\ \triangle Z = 1.785\text{m}$$

每张像片的外方位元素，由空中后交计算结果中得出，示于表 1.其中以弧度为单位。天线的偏差向量，示于图 3。其交换关系用矩阵表示为：

$$\begin{bmatrix} \triangle Xac \\ \triangle Yac \\ \triangle Zac \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} Xa - Xc \\ Ya - Yc \\ Za - Zc \end{bmatrix}$$

其中 M 为投影中心的方位矩阵

$$\begin{bmatrix} Xa \\ Ya \\ Za \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xc \\ Yc \\ Zc \end{bmatrix} + M^{T} \begin{bmatrix} \triangle Xac \\ \triangle Yac \\ \triangle Zac \end{bmatrix}$$

$$M = [R_{\varphi} R_{\omega} R_{k}] = \begin{bmatrix} a1 & a2 & a3 \\ b1 & b2 & b3 \\ c1 & c2 & c3 \end{bmatrix}$$

其中：

a1 = cos$\psi$cos$\kappa$−sin$\psi$sin$\omega$sin$\kappa$

b1 = cos$\omega$sin$\kappa$

c1 = sin$\psi$cos$\kappa$+cos$\psi$sin$\omega$sin$\kappa$

a2 = cos$\psi$sin$\kappa$−sin$\psi$sin$\omega$cos$\kappa$

b2 = cos$\omega$cos$\kappa$

c2 = −sin$\psi$cos$\kappa$+cos$\psi$sin$\omega$cos$\kappa$

a3 = −sin$\psi$cos$\omega$

b3 = −sin$\omega$

c3 = −cos$\psi$cos$\omega$

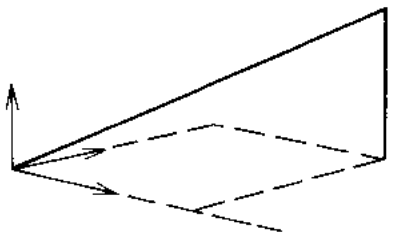


图 3

转换结果见表2,表中数据以m为单位。

表1

| No. | $\psi$ | $\omega$ | $\kappa$ |
|---|---|---|---|
| 1 | −.1722 | −.1376 | −2.1761 |
| 2 | −.1101 | −.1236 | −2.2759 |
| 3 | 0.0673 | −.0938 | −2.1488 |
| 4 | −.0772 | −.1484 | −2.0662 |
| 5 | −.0895 | −.1611 | −2.0570 |
| 6 | −.1072 | −.0450 | −2.0570 |
| 7 | −.9679 | −.0641 | −2.0677 |
| 8 | −.1010 | −.0641 | −2.0677 |
| 9 | −.0751 | −.0245 | −2.0920 |

表2

| △XAC | △YAC | △ZAC |
|---|---|---|
| 0.810 | 0.247 | 1.820 |
| 0.120 | 0.326 | 1.812 |
| −0.03 | 0.557 | 1.744 |
| 0.139 | 0.392 | 1.797 |
| 0.166 | 0.385 | 1.797 |
| −0.13 | 0.257 | 1.822 |
| −0.071 | 0.336 | 1.809 |
| 0.158 | 0.370 | 1.800 |

[3] 曝光瞬间GPS天线相位中心坐标($B$,$L$,$H$)求算。

用摄影测量方法验证GPS定位精度，其关键问题是摄影机与GPS接收机的时间同步问题。由于所用TANS GPS接收机没有与摄影机的接口，本次试验使用可显示1/100秒的电子表，并在中科院北京天文台用世界时校准,以电子表取代摄影机中的记录钟表，曝光时,将钟表显示摄影在胶片上。GPS接收机输出数据的更新率为1次/秒。以每张像片曝光瞬间的世界时，在GPS输出数据中,内插出相应于每张像片投影中心时刻的天线相位中心坐标($B$，$L$，$H$)，见图4。加天线中心与投影中心偏差改正数，为投影中心GPS定位最终的成果数据。

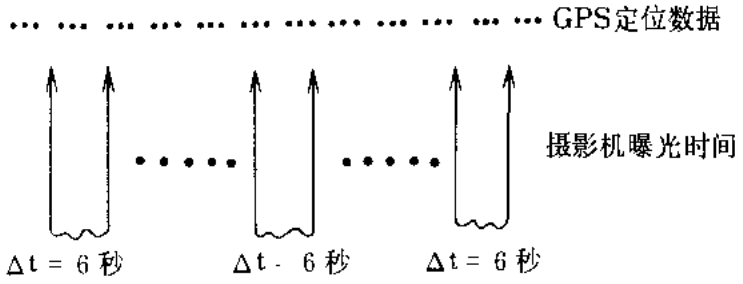



图 4

[4] WGS84高斯投影平面上各个坐标值的计算

野外实测地面控制点是在WGS84高斯投影平面坐标中进行，相应的空中后交计算也是在相同坐标系中进行。WGS84椭球参数采用国际大地测量与地球物理联合会

第十七届大会推荐常数：长半轴 A＝6378137m，地球引力参数$G=39986005\times10^{8}m^{3}s^{-2}$，规格化二阶带球谐参数$C2.0=-484.16685\times10^{-6}$，地球角速度$W=7292115\times10^{-11}rads^{-1}$。

[5] GPS 定位数据与空中后交数据的比较示于表 3。由 GPS 数据恢复的航迹示于图 5。

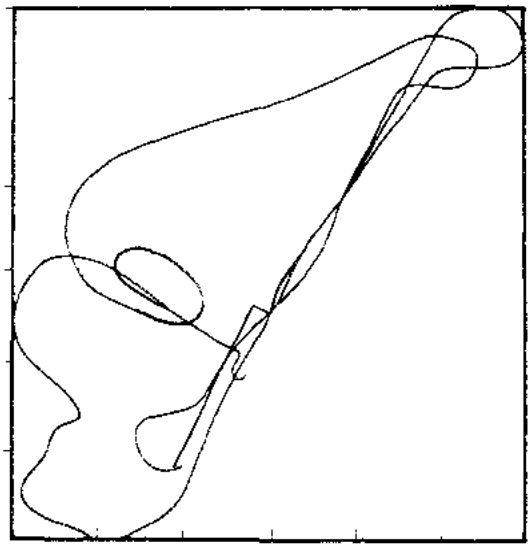


图 5　GPS 数据航迹恢复图

TANS GPS 动态测量试验数据分析　　表 3

(2″航带、单机伪距测量)

| 序号 | 时间 | X(m) | | ΔX(m) | Y(m) | | ΔY(m) | H(m) | | H(m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | XAC | XPC | | YAC | YPC | | HAC | HPC | |
| 1 | 10：59：44.85 | 7927.810 | 7920.084 | 7.726 | 4132.683 | 4133.179 | −10.496 | 502.036 | 572.132 | 0.096 |
| 2 | 10：59：04.05 | 7748.346 | 7741.158 | 7.188 | 4033.468 | 4039.870 | −6.384 | 585.830 | 584.918 | −6.91 |
| 3 | 10：59：09.65 | 7579.743 | 7570.929 | 8.814 | 3942.709 | 3949.836 | −7.127 | 588.596 | 592.052 | 3.456 |
| 4 | 10：59：16.75 | 7394.384 | 7385.887 | 8.461 | 3855.260 | 3860.257 | −4.997 | 581.238 | 582.957 | 1.359 |
| 5 | 10：59：21.55 | 7999.170 | 7992.166 | 7.004 | 3769.650 | 3777.985 | −8.335 | 586.652 | 585.597 | −1.05 |
| 6 | 10：59：27.05 | 7021.951 | 7014.139 | 7.812 | 3689.329 | 3700.792 | −11.463 | 598.837 | 597.368 | −1.47 |
| 7 | 10：59：33.05 | 6851.362 | 6841.970 | 9.392 | 3606.853 | 3611.457 | −4.604 | 594.092 | 595.850 | 1.758 |
| 8 | 10：59：39.05 | 6681.663 | 6674.012 | 7.651 | 3479.810 | 3480.526 | −0.716 | 589.796 | 588.044 | −1.59 |
| 9 | 10：59：44.65 | 6532.056 | 6516.081 | 7.475 | 3348.352 | 3355.447 | −7.095 | 610.916 | 604.337 | −6.57 |
| 均值 | | | | 8.000 | | | −6.75 | | | −0.54 |
| 中误差 | | | | 7.982 | | | 7.451 | | | 2.725 |
| 三维中误差 | | | | | | | | | | |

注：XAC，YAC，HAC 为曝光时刻 GPS 定位数据。

XPC，YPC，HPC 为空中后交求得的投影中心坐标。

3、试验结果分析

本次试验较理想地实现了单台 GPS 接收机动态定位精度评估，从表 3 可知，$X$ 方向中误差为 7.982m，$Y$方向中误差为 7.451m，$Z$方向中误差为 2.725m。

试验结果中，由于天线中心与投影中心偏差较小未计入。电子表虽有 1／100 秒显示，但当飞机巡航速度快时，1／100 秒将有 1.1m 误差产生(巡航速度为 400km／h)。对于定位精度高的接收机验证时，以有接口脉冲同步为好。以分米级的地面控制精度和 0.7m 精度的空中后交方法，验证标称 25m 单机定位精度的 GPS 接收机，其验证方法的精度是足够的。

## 四、结语及今后的课题

通过本次试验研究及取得的试验成果可知:

1、以本试验研究所得的单机 GPS 定位精度约为 8.0m 的精度指标可知，GPS 动态定位技术,完全可以用于灾害监测机载遥感实用系统中,作为对地定位子系统。

2、采用现有精度高的 GPS 接收机，以差分技术实现无地面控制的航空遥感图像对地定位（以专题图精度）是可能的。

3、美国政府加快了 GPS 系统的推进速度，到 1992 年 24 颗工作卫星全部上天。全时域利用将成为现实，加之高动态、高精度廉价的 GPS 接收机也已出现。特别是采用实时及事后差分技术，相对于单点定位而言,可明显提高定位精度。GPS 与惯性导航系统（INS）的组合使用，将会更完善地解决传感器投影中心（或脉冲发射中心）的位置与姿态的实时快速高精度的测量，GPS 动态遥感信息对地定位系统,是现有空间对地定位技术的变革性进展,其发展前景是可以预见的。

4、本试验研究成果,可扩展应用于类似精度和实时性要求的其它领域中。本试验研究作为 GPS／INS 复合对地定位系统的初期试验，逐步形成系统，具备多档次对地定位精度的功能，以满足水域、地面、航空及航天遥感或其它专业应用目的的需求，其科学意义和重大的经济与社会效益是显见的。

## 参 考 文 献

[1] Ackerman 1988, Impact of GPS on photogrammetry, 3rd South East Asian Surveying Congress

[2] Dr.Leonard "Applications of the Global Positioning System to Geographic Informations Systems data collection"

[3] Biggs 《GPS Navigation for large-Scale Photography》 PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING AND REMOTE SENSING, Vol,55, No, 12, December 1989, PP.1737-1741.

# 遥感应用技术系统的技术支柱

## —— 动态 GPS 遥感信息对地定位系统

李树楷　钱育华　徐　昶　宋华凯

[摘要]:遥感应用技术系统,随着专家系统、智能化计算机系统、新一代数据获取系统、分析决策功能的 GIS 系统、快速多功能的输出/输入系统及动态 GPS 遥感信息对地定位系统的发展,逐渐形成新一代的遥感应用技术系统,动态 GPS 遥感信息对地定位系统是其重要的技术支柱。本文从 GPS 的结构、发展趋势、特点及应用分类,介绍了 GPS 的概况及应用趋势,动态 GPS 遥感信息对地定位系统是 GPS 技术在遥感方面的应用。本文充分分析了以往遥感信息对地定位存在的问题,预测了 GPS 在遥感信息对地定位方面的应用前景、巨大的科学意义和效益,并提出了发展这一系统的设想和试验研究总体框图。

[关键词]:　动态 GPS 对地定位,惯性导航系统,实时差分,事后差分。

### 前　言

遥感技术的发展若以 70 年代美国第一代陆地卫星的发射成功算起,已走过了 20 几个年头。短短的 20 多年,遥感应用技术,遥感应用的范围,应用效益及应用水平均得到飞速的发展。以 LANDSAT 4,5 号上搭载的 TM (Thematic mapper) 专题制图仪和 GPS 全球定位系统为标志的第二代资源卫星已运转了六、七个年头。日本即将发射的 JERS—1 地球资源卫星堪称为第三代资源卫星,它不仅采用了以提高几何精度为目的的 CCD 线阵器件和立体观测功能,且搭载了合成孔径侧视雷达,其应用潜力也不可低估。

未来十年,新一代的遥感应用技术系统将出现,其有六个特点:

1、新型的数据源。机、星合成孔径雷达图像、成像光谱仪图像、CCD(Charge Coupled Device) 线阵器件广泛应用的新型传感器图像, DCS (Data Collection System)技术广泛收集的各种数据构成了新的超多波段、多种类的海量数据源。

2、以生物地学模型、社会经济发展模型、遥感信息特征模型、特殊专业模型、决策模型等逐步形成的以专家知识及推理功能为特征的各种专家系统将逐渐走向实用。多元、多维复合分析综合决策,将成为遥感信息处理的主流。

3、具有分析和决策功能的 GIS 有可能得到大的发展,遥感应用数据直接进入 GIS,增强 GIS 数据的实时性,逐步成为遥感技术的基础和归宿。

4、适应海量数据处理,智能型的机算机系统将逐渐取代现有的图像处理系统,适合人们思维判断的计算机语言将得到普遍应用。

5、输出输入系统的快速、多功能化是发展的必然趋势，以适应新一代遥感应用技术系统的要求。

6、1992 年,不迟于 1994 年，GPS 全球定位系统的 24 颗卫星全部发射上天,各种全时域、全天候、连续快速高精度 GPS 动态对地定位技术系统可投入广泛应用。与遥感信息定位有关的相应技术环节，均将产生方向性的变化。

新一代遥感应用技术系统的诸多特征可归结为:准确的定性，精确的定位，定量、快速、多功能的输出输入。其中动态 GPS 遥感信息对地定位系统及 GPS / INS 等组合对地定位系统，是新一代遥感应用技术系统的主要技术支柱之一。

精确定位是多元、多维复合分析的基础，是精确定量的基础。无地面控制的 GPS 对地定位，直接把遥感信息进行地学编码，是遥感信息进入 GIS 的关键。GPS 或 GPS / INS 遥感信息对地定位,使遥感信息定位脱离地形图，从地→空定位模式转向空→地定位模式，是遥感信息对地定位技术系统的理论、方法、处理流程的"翻天覆地"的变化,也使遥感应用技术系统的结构、内容得以变革性进展,促进了新一代遥感应用技术系统的生成。

本文分五个方面阐述新一代的遥感图像对地定位系统。

## 一、GPS 的结构、特点、发展趋势及应用分类

遥感对地定位技术，就其完整性而言，始于美国阿波罗(APOLLO)号宇宙飞船完成了月球表面的摄影制图。其时采用地形摄影机，恒星摄影机，全景摄影机，测高仪获取相机投影中心的位置和姿态参数，实现了对月球的摄影测量。70 年代的美国资源卫星 1,2,3 号使用了卫星跟踪网 STRNTDRSS 系统，航天飞机采用惯性测量设备 IMU 测定空间位置,姿态角测定也不同。Landsat 1,2,3 采用陀螺系统，Landsat 4 用带有恒星控制的惯性测量系统，Landsat 5 已采用 GPS 全球定位系统①,但至今检索不到 GPS 定位数据。这些系统由于精度低，其提供的位置与姿态数据,只能在地面站的系统纠正中使用。

美国国防部开发的 GPS 系统是美国海军导航卫星系统 NNSS(Navy Navigation Satellite System)的发展和改良,称之为第二代卫星导航定位系统。GPS 与 NNSS 的区别示于表 1。GPS 系统经过原理可行性验证阶段(1973-1979 年)，系统研制与实验阶段(1979—1984 年)，最后工程发展与完成阶段(1984—1988 年)。第三阶段调整了计划，预计 1992 年 24 颗卫星( 包括三颗备用星)全部发射上天，整个系统全部投入使用。

1、GPS 全球定位系统由三个部分组成。即空间部分、地面控制部分和用户部分(见图 1):

① 见参考文献[1]。

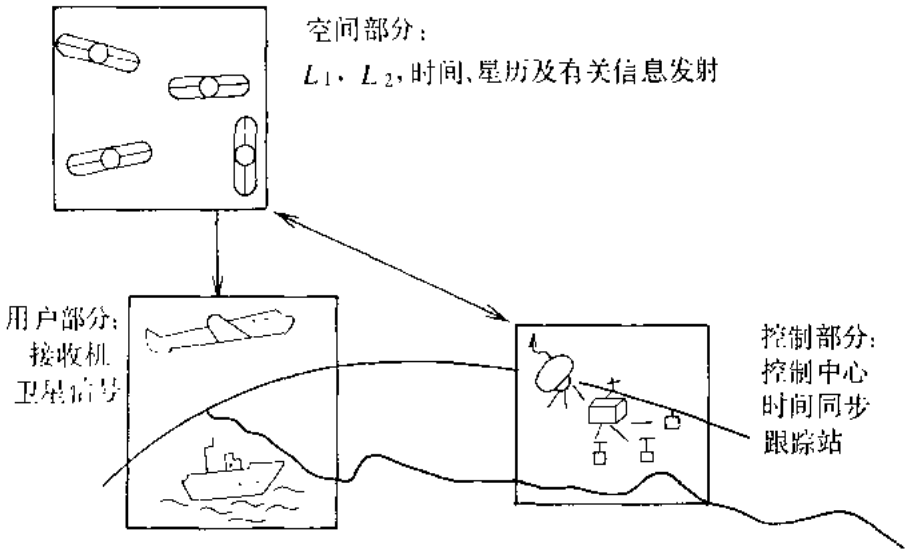



图 1　GPS 系统的构成

表 1　GPS 与 NNSS 的比较

| | NNSS | GPS |
|---|---|---|
| 开发年代 | 1950 年左右 | 约 1972 年 |
| 实用开始年代 | 1967 年一般公开 2000 年废止 | 预定 1989 年，1992 年完成 |
| 应用目的 | 船舶导航 | 船舶、飞机、宇宙飞行的导航 |
| 应用区域 | 全球 | 全球、宇宙空间 |
| 可利用的时间带 | 在上空时一次 10—20 分钟，一日数次经过，一天可用几小时 | 任何时间，目前一日数小时 |
| 定位精度 | ＜100m | ＜100m(一般用)，＜16m(军用) |
| 测量上的用途 | 地面控制点设置 | 地面控制点设置，基线精密测定 |
| 测量上可达精度 | ＜数 m | ＜数 m(单点)＜数 cm(干涉计) |
| 测定方式 | 卫星电波的多普勒效应 | 电波到达所需时间(到卫星距离) |
| 电波频率 | 150MHz 400MHz | 1557.42MHz(L1)1227.6MHz(L2) |
| 高度 | 1000km | 约 20000km |

空间部分由分布在 6 个轨道面上的 24 颗卫星组成。轨道高度约 2 万 km，轨道倾角 55°，周期为 12 小时[1]。全部完成后，在地球上任意地方、任意时刻，均可探测到最少四颗星。工作卫星上有长期稳定的原子钟及无线电发射机，无线电波为$L$波段两种频率：$L1=1557.42$MHz，$L2=1227.6$MHz。这两种波段频率采用三种伪随机噪声码 Y

[1]见参考文献[2]。

码、C／A 码和 P 码调制。C／A 码称为标准码，P 码称为精码。

地面控制部分由主控站(设在美国本土)和三个注入站、五个监控站组成。五个监控站对卫星连续监控取得各种观测资料，算得数据供主控站处理分析，完成轨道和时钟改正参数的计算。由注入站向每颗工作卫星注入导航信息和其它控制参数。

用户部分由天线、接收机、数据处理机和控制／显示装置组成。GPS 接收机随应用目的、数据处理方法、精度等分为很多种类，要根据专业应用目的的需要选择。

2、GPS 系统的最大优点是:全球全时域全天候连续导航定位，精度高(米级或厘米级)、速度快(秒单位)，可与其它传感器或测量系统组成多种复合系统(GPS／INS 系统，GPS／INS／AMSS 系统，GPS／INS／CAM 系统等)，抗干扰性强，操作简便。这些优点是 GPS 系统得以广泛应用的前提。

3、美国国防部开发 GPS 的初衷是飞行器及船舶导航。但已开展应用试验研究的领域很多。大地测量控制网及基线测量，这方面已处于全面应用阶段;摄影测量中,空中摄影站点及地面控制点测量；大型工程项目的工程测量；城市测量；飞行器导航、船舶导航；海上精确定位，海上武器发射测量，海上石油平台定位；野外勘探定位，探险定位等等诸多应用领域均开展了应用试验研究，有些已达全面应用阶段,军事或战略目的的应用试验研究及取得的巨大应用效果更是不难想见的。由于 GPS 系统的优点也必将在空间技术、地球物理、测绘、遥感、交通、全球环境、军事以及人们的日常生活中,带来巨大的变化和深远的影响。鉴于 GPS 具有解决众多学科、重大问题的潜力和从国际战略目的出发，许多国家均热心于开展应用研究,数据处理模式及接收机的研究，甚至研究各自的系统。如:苏联的 GLONASS，欧空局的 NAVSAT 等，形成一股"GPS 热"。

4、GPS 的应用分类,按应用方法而论,可分两类:

[1] 静态对地定位。主要用于大地测量，板块运动测定等等方面。这种方式定位所需时间长(几分钟到几十分钟)，定位精度高,可达毫米±1ppm 的量级。

[2] 动态对地定位。这一类其定位精度较低，可达分米级至米级，定位数据更新率可达秒级。主要是将 GPS 接收机安置在快速运动的待测平台上，如:飞机、卫星、火箭、气球、船舶、汽车等,以对这些平台导航定位。

动态 GPS 遥感信息对地定位属第二种，即快速动态对地定位。这一类对地定位国内研究者尚少。而第一类，即静态对地定位，国内已形成了庞大的作业队伍，并形成"全国 GPS 定位网协调委员会",以便于学术交流，协调全国 GPS 定位网的分工与进度。静态对地定位的研究,所需工作条件相对而言较为简单，而动态对地定位的研究,则除接收机外,尚需快速移动平台(飞机等)，传感器,空中与地面测量的配合，飞行设计等一整套技术流程及保障①，非一般单位可以自立的研究项目。

## 二、遥感信息对地定位技术的发展状况及存在的主要问题

①李树楷,徐昶执笔:"GPS在遥感信息对地定位应用中的试验研究",遥感分会,"九十年代遥感发展前沿与前景预测"研讨会论文。

迄今为止,遥感图像中应用最广的有两类:一类是框幅式遥感图像;一类是行扫描方式的遥感图像(包括 CCD 推帚式)。现分述如下:

1、框幅式遥感图像。框幅式遥感图像是一类重要的遥感图像。航天部分包括:LFC、MC、MKT-6、KATE-140、KATE-200、KFA-1000 以及我国国土卫星图像。航空部分包括:多光谱摄影图像、航空彩红外摄影图像、全色图像等。

框幅式遥感图像,相对于行扫描式遥感图像而言,具有空间分辨率高,几何保真度好的优点。由于摄影时,投影中心的位置及姿态数据在现有的系统中精度低(或没有这类数据),其对地定位采用了地→空定位方式,即利用地面控制点的影像坐标与地面坐标数据,采用强制符合等方法,以恢复或改正摄影瞬间投影光束的几何关系,建立起影像坐标空间与地面坐标空间的变换关系,从而达到定位目的。这是沿用了近百年的成熟的摄影测量方法①。现代遥感应用技术中,框幅式遥感图像的定位处理借鉴了这一方法,这类方法对于快速、适时、大信息量的遥感图像的对地定位而言,存在几个重要的问题。

[1] 地面控制点的测设问题。这是一项耗资、耗时的工程,由于地面作业,在自然因素(如沼泽、荒漠等)和人为因素(行政境界限制等)的条件下,往往也有无法测设地面控制点的情况产生。

[2] 设备问题。目前摄影测量设备,大多是光机电型的舶来品,价值从几十万人民币到百万美元级,是遥感图像普及应用的一大障碍。

[3] 技术队伍问题。地面控制点的测设及摄影测量设备的操作,均需要训练有素的技术人员,对于遥感应用技术队伍,以非摄影测量专业为主的地学家而言,是普及应用的难题。

[4] 利用已有地形图选取控制点的问题。地形图的更新周期少则 5 年,一般要 10 年以上。这么长的时间内,地物、地貌,尤其在经济发达区,其变化是很大的。在旧地形图上,选不出足够数量的地面控制点是屡见不鲜的。无合适比例尺的地形图,甚至无法选出控制点的地区(如荒漠等),在我国占有相当大的比例。遥感图像的对地定位显然成了严重的问题。

2、行扫描方式及其它方式遥感图像。行扫描方式遥感图像是目前应用广泛的遥感图像,航天部分有:MSS、TM、MOS-1、雨云图像等。SPOT 图像为 CCD 推帚式图像。航空部分有:多光谱扫描图像、红外细分光谱图像等。这类图像的波谱域、波段宽度、波段数,随应用目的及设备研制水平的提高,日趋细化、超多波段化,其几何保真度及空间分辨率一般比框幅式图像要差。这类图像由于平台的非平稳匀速直线运动,图像获取过程所需时间的连续性,景幅以单位计,图像获取时间(约 28 秒),比框幅式图像(1/100～1/500 秒)长得多,实际上已成为一种四维遥感图像。其定位问题比框幅式图像困难。

卫星行扫描遥感图像的对地定位问题,经国内外许多学者的潜心研究,已取得了系列成果②。如:多项式法、系统纠正法、带有附加参数的共线方程式法、随机内插法

---

①见参考文献[3]。

②见参考文献[4]。

等等。但基本的定位方式仍是地→空方式,即人工从地形图和影像上选取相应点，并读取影像坐标和地理坐标，依上述方法建立影像坐标空间与地理坐标空间的变换关系。

航空行扫描图像,由于飞机平台位置与姿态变化较之卫星平台剧烈,其定位问题,既非框幅式遥感图像所借鉴的摄影测量的通用技术所能解决，也非卫星扫描图像的定位模式所能模拟。据作者研究结果，数据获取时取得一定精度的平台的位置与姿态辅助数据是解决航空行扫描图像对地定位问题的可行途径①。

行扫描方式遥感图像对地定位中存在的主要问题是:

[1] 从地形图上选取控制点的问题。一景卫星 TM 图像面积为 185km × 185km，除"1"之[4]中存在的问题外，每景 TM 图像要在近 350 张 1／2.5 万地形图上选控制点，这也决非易事。为此，曾有人以建立控制点数据及影像库的方式，用影像相关技术自动寻取控制点，以图解决选点读取坐标等繁杂的人工劳务。但是由于不同波段影像上的灰度分布的差异往往较大,不同分辨率、不同高度、不同时相的同一波段影像灰度差别同样可能较大，势必要建庞大的库，且上述各种特征影像数据均要入库才有意义,否则将失去相关，得不到预期效果。建库之大，所需资金及劳务之繁重，需时之长及传感器更新换代之快，其实用价值如何,尚是一个很值得研究的新课题。无适用地形图和无图区尚无价值可言。

[2] 由于传感器种类很多，几何纠正方法的研究需要一定研究时间与之相应。人工选读控制、几何纠正模式建立及灰度重采样，地学编码化均需要大量机时。在图像处理中，这一过程需要 1／3 以上的时间，是与遥感技术快速短周期的优点不相适应。

[3] 航空扫描图像利用地面控制点作几何处理尚为亟待深入研究的问题。航空扫描图像如何与其它数据复合分析处理，同样是个亟待研究的问题。据作者研究结果，以足够精度获取遥感平台姿态和位置等辅助数据是解决航空扫描图像对地定位问题的可行途径。

3、其它方式的遥感图像尚有波束式的雷达图像、全景摄影图像、RBV 图像等。所有遥感图像对地定位之所以那么复杂,存在上述种种问题，其原因就在于采用了使用地面控制点的地→空模式。这是科学技术发展的必然阶段。解决上述问题的关键是:以足够的精度获取传感器投影中心的位置和姿态数据，从而实现空→地对地定位。

### 三、动态 GPS 遥感信息对地定位系统的应用前景预测

GPS 全球定位系统是一种应用范围十分广阔的具有巨大应用潜力的系统。动态 GPS 遥感信息对地定位系统,是 GPS 全球定位系统在遥感信息对地定位中的应用。该系统随工作方式不同又分为两种:

(1) 动态 GPS 遥感信息对地定位系统。使用的设备主要是 GPS 接收机，其位置数据由 GPS 确定，姿态数据则由位于同一平台上的多台 GPS 接收机所获得的位置数

①见参考文献[5]。

据推算得到，据 Ackerman 教授报导,姿态可达 1′的精度①。

(2) 动态 GPS 组合遥感信息对地定位系统。使用的主要设备是 GPS 接收机，用于获取位置数据。姿态数据则使用 INS 惯性导航系统等可给出姿态数据的设备。GPS 与 INS 可互相补充功能,INS 的漂移用 GPS 订正； GPS 的失锁由 INS 数据补充。

动态 GPS 遥感信息对地定位系统的应用前景,取决于两个重要因素:定位精度和数据更新率。遥感信息对地定位精度的要求，随应用目的不同，不同的遥感信息定位精度要求各异。总体而言，大体可分为四级:

[1] 国家地形图定位精度标准。

[2] 各类专题制图定位精度标准。一般以像元数作评定单位,通常为中误差一个像元以内。

[3] 灾害(火、水、地震等等灾害)监测图像的对地定位精度，机载为 10m 单位的等级。

[4] 荒漠无图区的遥感信息对地定位精度，机载为 20m 单位的精度等级。

这种多档次的定位精度要求，更易于根据遥感应用所要求的精度等级去选择相应定位精度等级的对地定位系统,使得动态 GPS 遥感信息对地定位系统有更大的适用性(见图 2)。以下分四个方面阐述其应用前景。

1、框幅式遥感图像的对地定位

一般而论,这类图像对地定位精度要求较高，采用 GPS／INS 复合对地定位系统，获得适用精度的外方位元素(位置和姿态)是可能的。众所周知，外方位元素已知，空→地方式的定位处理简单，处理设备大大简化，尤其是计算机技术的发展，框幅式遥感图像的对地定位将产生如下 5 个方面的变化:

[1]无地面控制点(GCP)对地定位或极少地面控制点的对地定位，可减少航测外业 70%的工作量和人力、财力投资。不再需要用于测图目的的大地控制网的测量。

[2]新一代摄影测量系统可能出现。其特点为:信息载体以感光胶片、磁带、光盘并存；传感器从光化学模拟到数字式摄影机；处理设备中昂贵的光机电航测设备与简单设备、计算机并存。

[3]沿用近百年的框幅式摄影测量概念、理论、方法、设备研制等方向性的变革。

[4]框幅式遥感对地定位方式的变化将引起以测绘地形图为主要任务的测绘技术流程、技术队伍的结构和技术管理上的巨大变化。

[5]实时数据获取，实时处理系统可能出现。这对民用，尤其对军用更具不可估量的应用潜力。

框幅式遥感图像系统可能产生的这些变化，使人们看到了令人鼓舞的发展前景，尽管还需要作大量研究工作。

2、扫描式遥感图像的对地定位

动态 GPS 遥感信息对地定位系统,可以秒间隔提供遥感平台的位置与姿态参数。通过简单插值,实时提供适用精度的每根扫描线中心像元的位置与姿态数据。实现空

① 见参考文献[6]。

→地方式无 GCP 对地定位。

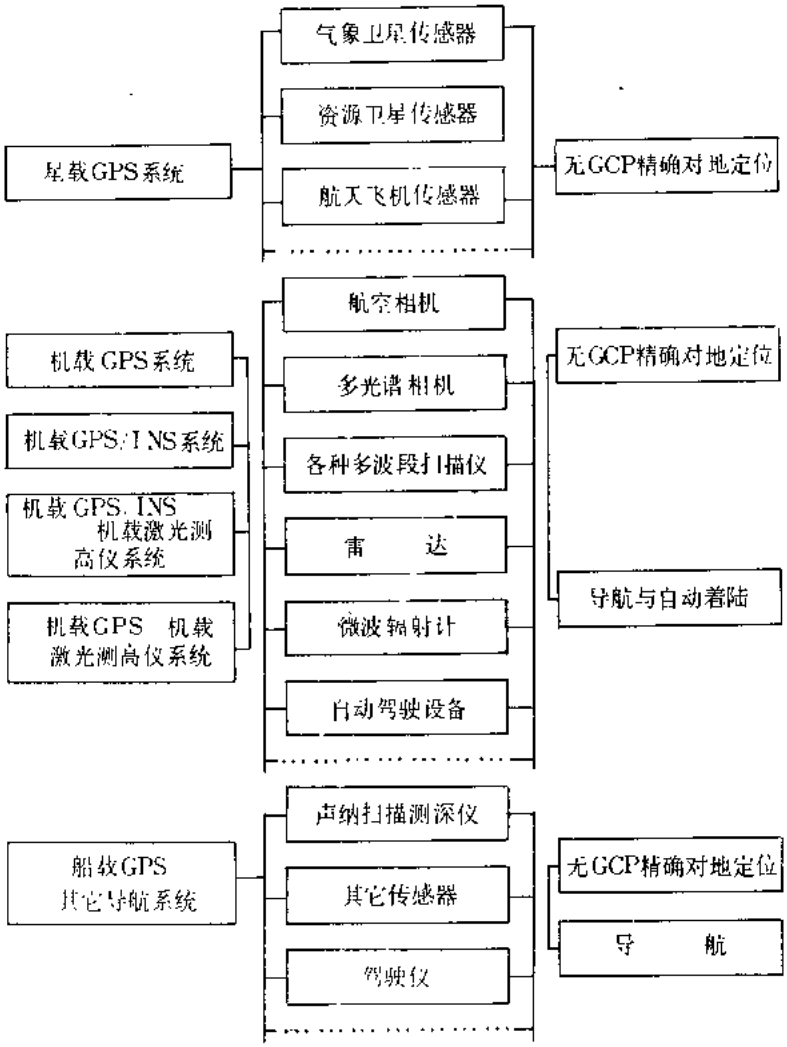



图　2

[1]　在摄影测量基本理论及已有几何纠正模式研究成果的基础上，重新确定简单的空→地定位的理论、方法、处理技术的研究方向。

[2]　平台位置与姿态变化剧烈的机载扫描图像的对地定位这一难题,可迎刃而解。为机载扫描图像参与复合分析奠定了定位基础。

[3]　扫描式遥感图像直接地学编码化。解决了人工选读控制点之劳苦，甩掉了沉重的地形图这一包袱，再不必为选取合适比例尺地形图或查询有无地形图而烦恼。遥感信息定位不再受行政境界及地区限制。

[4] 是新一代遥感应用技术系统的统一地理基础。加速了新一代遥感应用技术系统的自动化进程，以及作业流程和处理技术的变革。如：遥感图像应用信息直接进入GIS系统①，为GIS数据的现势性提供新的数据接口。

扫描式遥感图像对地定位技术的变革，为多元、多维数据复合分析的实现提供了技术基础，大大简化了几何处理复杂的过程，增强了自动化程度，成为新一代遥感应用技术系统的技术支柱。

3、实时性强的灾害快速遥感监测系统的重要技术环节

自然灾害的监测与评估，在防灾救灾中占重要地位，已列为全球范围的共同课题。灾害监测遥感实用系统最重要的是快速准确地反应能力，这中间包括信息获取系统、快速移动的平台、实时传输系统、实时灾情遥感信息对地定位系统和灾情信息处理系统。以小时为计时周期的灾害监测系统中，动态GPS遥感信息对地定位系统是重要的子系统。

实时GPS定位数据的获取，是用于涝灾监测的雷达图像实时定位及三维量测的关键。将灾区的位置随数据传输系统直接输送到监测终端上，使本来复杂的微波遥感图像的对地定位得以用相对简单的方法处理，无疑对于灾情图像抛开地形图直接对地定位，及时处理出灾区面积、位置、各种灾情数据，是保证监测系统的快速、准确反应能力的有力措施。据作者的试验研究证明，定位精度在10m以内的导航型GPS接收机，可做导航和对地定位子系统的主要设备，完善机载灾害监测遥感实用系统。同时证明，这种定位系统，可在作为灾害监测短周期宏观数据源的气象卫星上，搭载这一子系统。使灾害监测机、星组合系统，具有极强的对地定位能力和复合分析的能力。对于机、星传感器图像潜力的发挥，及灾害监测系统快速准确反应能力的发挥，以使在防灾救灾中发挥更大的作用，其意义是非常重大的，其应用效益是难以估量的。

4、全球环境研究的技术支持系统

人类生存在同一个地球环境中，任何一个国家和地区的环境问题都与全球环境密切相关。人类的活动在全球环境的制约下进行，又反过来影响全球环境的质量，全球环境的研究已成为热门课题，航天遥感图像给出的是确定对象物性质的信息，这些信息当今时代已不难买到。但是各种专题信息的统计量算，各类数字指标的基础，仍然是这些信息的准确定位，这些定位信息的取得，既不可能取自地形图，也不可能派测量队去各国实测。定位问题成为能否高质量开展全球环境研究及如何研究的首要问题。

LANDSAT 5号上已装载有GPS系统，据报导在轨道及其垂直方向上各为10m的定位误差，高度的误差为15m。但至今尚未查到GPS定位数据。这种数据，只有寄希望于我国资源卫星上装载GPS系统，才能将全球环境的研究扩大到国门以外。

动态GPS遥感信息对地定位系统的应用，使得遥感图像的对地定位将不再受国界和其它自然屏障的限制。全球大气圈、生物圈、水圈、岩石圈的综合研究将成为现实，展示了全球遥感综合应用的灿烂前景。

---

①见参考文献[6]。

## 四、发展动态 GPS 遥感信息对地定位系统的设想

美国 Magnavox 公司的 Stansell 说:像对待许多新技术一样，有的用户想尽可能快地使用 GPS，而另一些则保守，打退堂鼓，然而从长期看，它的精度、可靠性、覆盖面和简便性，会使大部分保守的人使用新系统。尽管美国实行了严格的政策，但也不会阻挠用户使用 GPS 的热情.因为除了信号来源外，这些信息看来可以比迄今所获得的其它系统能更好地服务于导航和定位口的。这位美国人对应用新技术的心理分析颇有见地。

按我国的国情，有如下设想:

1、纳入国家遥感技术发展规划

全球导航与定位系统，如前所述，世界上先后有多个系统问世。这些高技术的出现是可喜的，但各为其特殊口的服务。相应的战略应是:尽快利用可利用的信息资源，同时发展具有我国特色的对地定位技术体系。根据各个系统可利用程度，采用相应的技术措施,如建立我国地面跟踪网，自己提供精确星历等。对这项高技术给以足够的重视，追踪国际发展水平是刻不容缓的。

2、加强应用试验研究。根据试验研究的成果立即建立相应的应用系统，取得实效，在应用实用系统的运行中，不断增强研究的强度和深度是发展动态 GPS 遥感信息对地定位系统的指导思想。为此作者已根据 1990 年的三次试验成果，提出了"用 GPS 对地定位系统完善机载灾害监测实用系统"的项目建议。

3、组织多学科的具有综合研究能力的协同攻关组，是快速推进试验研究进程的有效科学研究组织形式。动态 GPS 遥感信息对地定位试验研究过程比较复杂，条件较多，如:飞机、试验场条件等等。这类试验研究条件非一般单位所具备,协同攻关，发挥各自的长处，是取得成功的关键。作者 1990 年的三次试验是由五个单位组成的联合试验组完成的。事实证明取得了成功。

4、扩大学术交流范围，互相取长补短，壮大动态 GPS 遥感信息对地定位系统的研究队伍,形成学术集团是推进该项研究发展的强大力量源泉。动态 GPS 导航与遥感信息对地定位专题研讨会的召开,是实现这一目标的重要步骤。

5、争取列入国家科技攻关项目、高技术项目和应用项目是发展动态 GPS 遥感信息对地定位系统的先决条件。

6、试验研究的设想框图示于图 3。

## 五、结束语

90 年代是遥感应用技术发展的第二阶段,这一阶段的特点已清晰可见。要集中攻关，不要分散；要目标明确，指标量化，不要弹性指数，模棱两可；要实事求是的科学态度，不要虚无漂渺的好大喜功。使遥感应用系统的水平再上一个新台阶，发挥更大的效益，推动科学技术的发展和国民经济的发展,是每一个科技工作者的义不容辞的责任。

动态 GPS 遥感信息对地定位系统，随着遥感应用技术的发展必将取得长足的进

展，又必将对新一代遥感应用技术系统的形成，提供强有力的技术支持。遥感应用的灿烂前景已可预见。

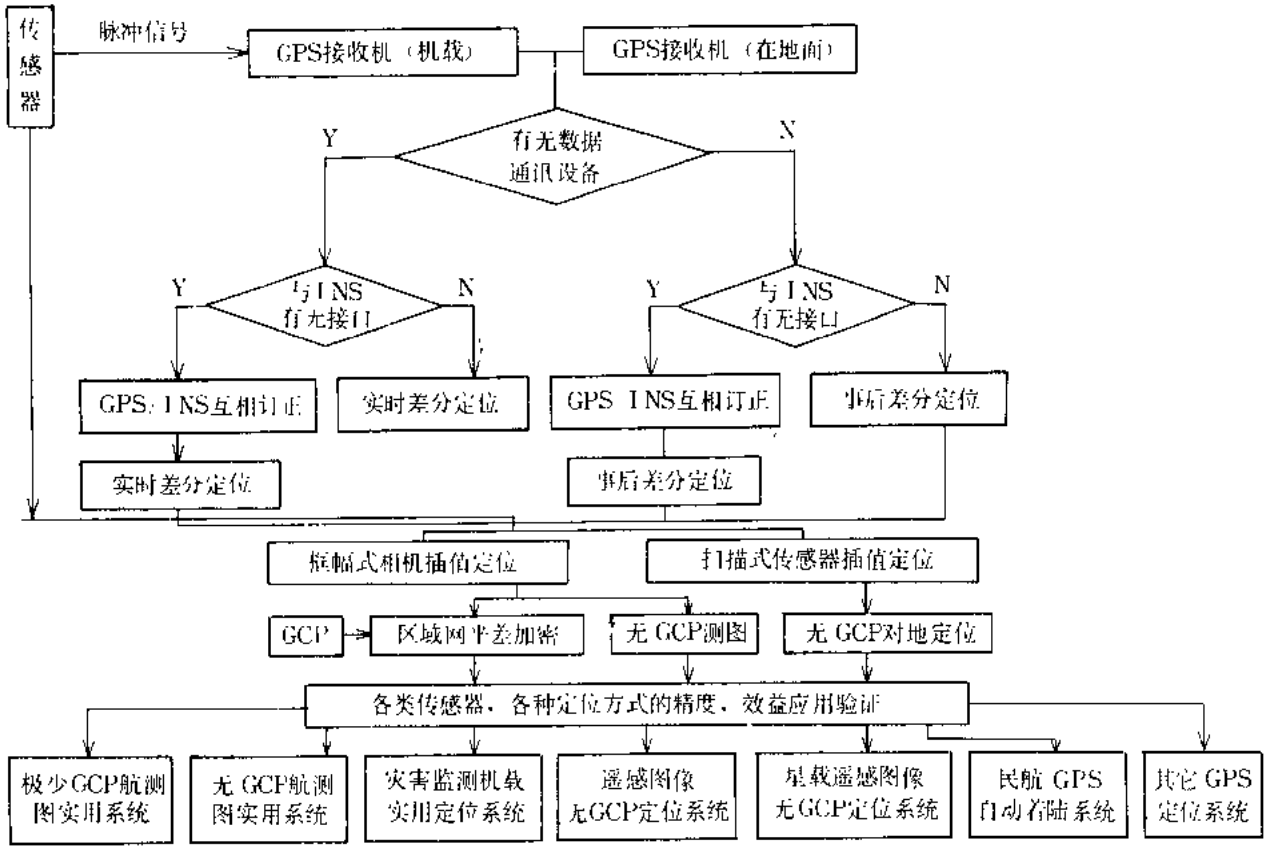



图 3

## 参 考 文 献


[1]《地球观测データ利用ハンドブック》(日)宇宙开发事业团，1986年。

[2] R.W.金 等著:《GPS测地》，解放军出版社，邹笃醇译。

[3] 王之卓:《摄影测量原理》，测绘出版社，1979年。

[4] 李树楷:"遥感图像几何模式的研究"《遥感应用的实践与创新》P29-49，1990年。

[5] Li Shu Kai:RESEARCH ON THE GEOMETRIC MODEL OF THE AEROSCANNING IMAGES. PROCEEDINGS OF THE TENTH ASIAN CONFERENCE. 1989.

[6] Ackerman:"ATTITUDE DETERMINATION BY GPS PRINCIPLE".

[7] Dr.leonard:"APPLICATIONS OF THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM.

## The Geometric feature of Remote Sensing Line Scan Image Data

Li Shukai

ABSTRACT

There are two types remote sensing image positioning for ground, the one is polynomial method, the other is collinearity equation method, much more used geometry gross processing image data in practical application. This paper, starting from plan character of line scanning sensor parameters and structure analysis, analysis data flow mode, explore instrument array ,sampling time sequence, scan–glass position error equation ,wave complex precise ,TM scan–line overlap correction , TM dual–direction scanning error and external reasons rotation of the earth ,terrain altitude difference ,satellite altitude change to remote sensing image positioning for ground affection, It is base researching relation geometry model by application aim. The model of collinearity equation with auxiliary parameters to process A data is optimistic model of high precision positioning for ground.

## The Geometric Mode Problems of Remote Sensing Image

Li Shukai

ABSTRACT

In the research of geometric mode of remote sensing image, ground control points are used as the necessary data to do precise processing. The modes mainly include collinearity equation, polynomial and the complex of systematic correction and low polynomial. After setting up the geometric modes of the single space scanning image and describing the characteristics of these modes, we have set up the geometric modes of three consecutive scenes space scanning image and aerial MSS. Both of them gained the mean square error are one pixel. It is difficult to resolve the geometric mode problems of various remote sensing images based on the compulsory conformity method. Adopting the complex application system of GPS (Global Positioning System) and INS (Inertia Navigation System), the position and state data of sensor can be gained timely with high precision,this reveals developing prospect of remote sensing geometry.

## Orientation of LANDSAT MSS Image

Li Shukai

ABSTRACT

LANDSAT MSS CCT data was generally rectified by polynomials,hardly thinking over the geometric characters. The residual error and its well–distribution depend on the ground control points and its distribution.

In this study, we use the co–linear equations in traditional photogrammetric as the mathematics foundation. The traditional photogrammetric single point rosection in space of a frame photography, here degenerates as the frame is substitutes by a line. The satellite orientation elements is the function of scanning time (or scanning line). The mathematical model has been established between the image pixels and the ground targets. We have also developed the corresponding software. The utility of the theory and software mentioned above was proved by experiment.

The results show that the residual error is within ± 1 pixel for the control points and check points, and having well–distributed. For one 1 / 1000000 scale LANDSAT image , if there are more than 9 G.C.P. and well–distributed, the satisfactory convergence can be gotten.

## Research on the resampling to the LANDSAT MSS CCT DATA

Li Shukai

ABSTRACT

The resampling model used in geometric correction of MSS CCT data affects the accuracy and computer CPU time.

This paper is focused on the establishment of mathematical model with the condition of collective line, the development of resampling method with linear interpolation in a small area based on statistical analysis for various error full utilization of available main storage. The accuracy of resampling is within ± 0.2 pixel. Experiment results show that the accuracy of this mathemetical model using the resampling method is within ± 1 pixel. Comparing with the existing software now available, this model save 44% of computer CPU time.

## Mulit–Scenes Consecutive Satellite Image Geometry Correction

Li Shukai Liu Tong

ABSTRACT

LANDSAT MSS, TM image is a kind of line–scan image, Satellite platform position and state variation is slower and single changing. Knowing from single satellite scene image geometry mode research that position variation is satellite time linearity function. State variation is one parameter third polynomial function of satellite time. This research verified that platform position can be wrote by one parameter fifth polynomial in condition of three scenes consecutive satellite image, the standard error of residual error of control points position by collinearity equation algorithm is ± 1.08 pixel and developed correspond resampling algorithm and total software. The collinearity equation with auxiliary parameters, which is variable polynomial, is also a kind of variation of image space to geo–coordinate space , then, there is a very much result in this paper for MSS, TM A DATA with collinearity equation model of auxiliarity parameters.

## Research on the Geometric Model of the Aeroscanning Images

Li Shukai Liu Tong Zhou Lihua

ABSTRACT

In the past, the geometric problems of the aeroscanning images are mainly focused on the geometric errors and possible adopted models, at home and abroad. It is exceptional for practical models and results. This study begins from analysing the geometric characteristics of the aeroscanning images (MSS), then, using the aided data to set up control correcting model. The mean square error of the control points acquired from this test is 1.0 pixel by the method of multinomial.

The matching mean square error of control points between the synchronous scanning images and the aerophotographs reaches 2 pixels. If improving a little accuracy of synchronism and shorting the time interval of synchronism, it is possible to obtain the result that the residual mean square error is less than one pixel. It is also obtained from this study that the mean square of the data of aerial inertia navigation corresponding to the data of three point intersection in space is $Mx = 17.9$ meters and $My = 13$ me-

ters. It is possbile that the data of inertia navigation are used to establish the control correcting model.

## Research on the DEM generating model for remote sensing

Li Shukai Liu Tong Zhou Lihua

ABSTRACT

In the past, the research of the DEM generating model, data acquisition has mostly used the method of the stereo photogrammetric and man collect. From the stereo model and topographic map, elect the terrain characteristics and fault points as a known control data. Its interpolation method has the bilinear finite element interpolation ,bi-cubic surface finite element interpolation ,shift curved surface and multiple function and so on.

In this research ,the topographic map is the data resources. Using the general digitization device, auxiliary staff members collects the control data on the contour line. Altitude of grid points is interpolated with dual cubic parameter spline function. It was obtained from this research that the mean square errors is the 0.1 contour line apart. It applies to produce DEM in efficient study on the remote sensing application.

## Research on the projection error correction by correction precision altitude difference for the LANDSAT TM CCT

Li Shukai

ABSTRACT

In the past, for the method of correction precision for line-scanning remote sensing image of the LANDSAT TM CCT, we have mostly studied the smooth area, which the projection error of the terrain altitude difference could be ignored. From this point of view,which the linescanning remote sensing image is the central projection image, some specialist suggest to do correction of the projection error with DEM data while the image is corrected precision in the area of the great altitude difference. But ,up to now, we have not found any paper on the method of projection error correction. In this test, we used mature collinear equation to do SHUANG YANG area's TM CCT cor-

rection precision . The test result is that the residual mean squares error is 0.51 pixel( ± 16.8m) in control point position, while correcting precision. We have obtained results of the mathematics model of the projection error correction and method of calculation and developed some software about it.

## The Study of the Correction Model of Daul-direction Scanning Error of TM Image

Li Shukai Liu Tong

ABSTRACT

The sensors of TM image are different from MSS on LANDSAT. The MSS data is collected with mono-direction scanning and TM data with daul-direction scan. The sensor of TM is a improved sensor of MSS. Position deviation in scanning direction is produced by the difference of normal and reversal direction scanning of TM sensor. The deviation value is a complicate function of T (data collection time of satellite) in which there is some high-frequency elements. The characteristics of TM A DATA image is analysed first in this study. Using direct digital correlation method, the study of correction model of daul-direction scanning error of TM image has been finished primely. Some algorithms and softwares are developed.The result is that 2.15 hours is necessary for the processing of correction of daul-direction scanning error with a scence TM A DATA.

## A revolutionary advance in remote sensing information location technology for ground

Li Shukai Xu Gengqing Qian Yuhua

ABSTRACT

In the past, researching of remote sensing image location for ground,control points on ground were base to set up corresponding remote sensing image space to geo-coordinate space, then, realized remote sensing image location for ground. Its transform modes included: collinearity equation, polynomial ,relation of digital image, and random-field interpose,etc. For satellite remote sensing image,had obtained

one-pixel accuracy.With GPS(Global Positioning System) accomplishing, it will be true that remote sensing image locates for ground from space, produces geo-code image directly.

This paper gives the shortcomings of remote sensing location for ground in the past: most man-power, difficults depending on topographic map, limited by region and administration, etc.The dynamic GPS remote sensing information location for ground is characters of all the weather.speed, high accuracy to make remote sensing information location for ground methods great revolution.This paper gives application perspectives of dynamic GPS in remote sensing image location for ground of Aeronautics and Astronautics,disaster monitoring, global environment monitoring, remote sensing complex application, have advanced plan developing the technical system of dynamic GPS remote sensing image location for ground.

## A Test of GPS Navigation and Position for Aerial Remote Sensing Image

Li Shukai Xu Chang

ABSTRACT

The test's equipments included two GPS PATHFINDER navigation receivers,two WM101 GPS receivers and AΦA T3camera,speed of aircraft was 150km / hour, flying height was 600 meters, photo scale was 1:6000.forward overlap was 80%. Projection centre solved by space restitution using ground control stations was assigned as standard. The test's accuracy of single-receiver absolute positioning accuracy without ground control points was 7.982m in X-direction ,7.451m in Y-direction, 2.725m in Z-direction.

The positioning precision in this test,almost supplied disaster monitoring need. It could be applied in airborne practial system of disaster monitoring, meteorological satellite image positioning and middle, small scale topomap positioning requirement.

## Technical Support of Remote Sensing Application and Technique System

### -- Kinematic GPS remote Sensing Information Positioning for the Ground

Li Shukai Qian Yuhua Xu Chang Shong Huakai

ABSTRACT

With expert system, intelligent computer, data acquisition system of a new generation, GIS analysis and policy function, multipurpose input and output system, and development of GPS kinematic remote sensing information positioning for the ground system, Remote sensing application and technique of a new generation will be formed gradually. Kinematic GPS remote sensing information positioning for the ground system is important technical support.

Kinematic GPS remote sensing information positioning for the ground system is GPS technical application on remote sensing. In this paper ,we introduce GPS general situation and application tendency from GPS structure, development tendency, specialities and application, analyse questions existed in remote sensing information position for the ground, forecast GPS application prospect on remote sensing, enormous significance,beneficial results in future, raise imagine of developing the system, experimental research general frame map.

## 主要应用程序目录

1、从卫星 MSS CCT 的辅助文件中读取位置与姿态参数计算多项式系数及其它数读出程序。

2、行扫描灰阶阵图像的灰阶输出程序。

3、消条痕程序。

4、单景共线方程式控制点上残差计算及系数迭代收敛计算程序。

5、再采样的小区变换系数计算及灰度重采样程序。

6、航空行扫描图像直线状地物法变换系数收敛计算程序。

7、航空行扫描图像重采样程序。

8、遥感适用 DEM 生成程序。

9、多幅连续卫星图像共线方程式法迭代收敛计算及控制点上残差中误差计算程序。

10、多幅连续卫星图像小区变换系数计算及再采样程序。

11、TM CCT 的几何精纠正中地形高差引起的投影差改正程序。

12、TM 双向扫描误差改正程序。

13、航空行扫描图像几何处理中获取辅助数据的空中后交计算程序。

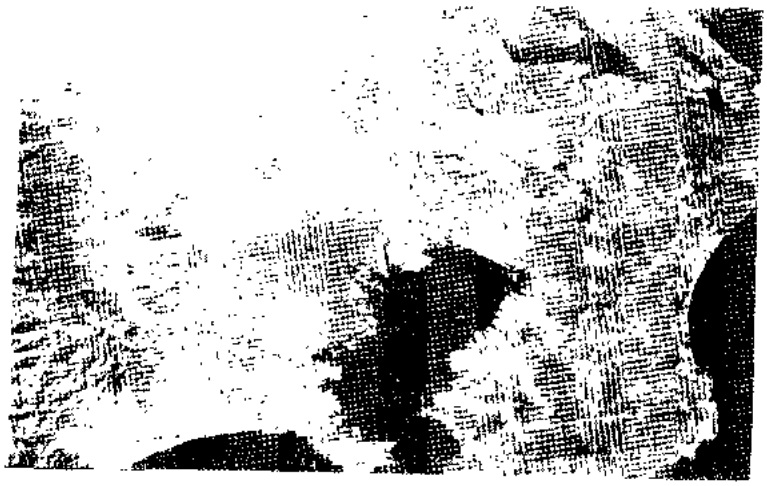
14、卫星位置与姿态变化曲线绘图程序。

15、小区逆变换法及控制点地面分布图绘图程序。

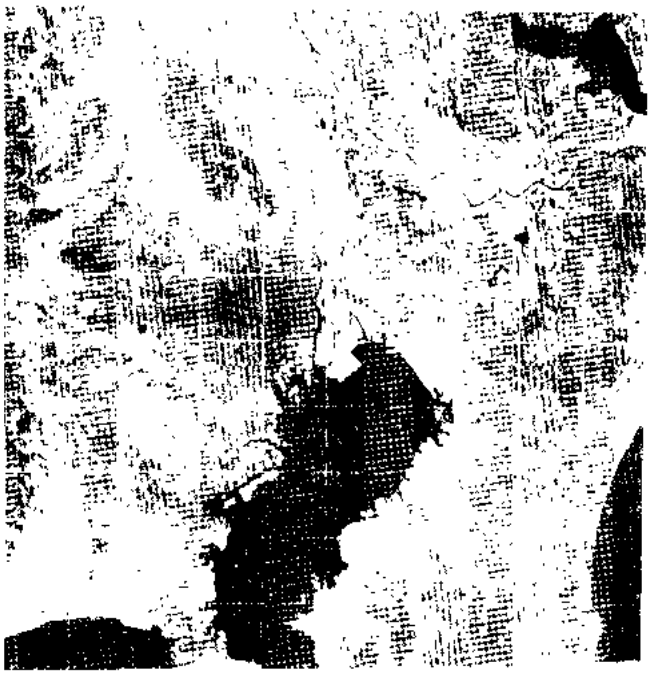
16、地学编码图像生成程序。

17、三角形网法再采样程序。

18、数字化等高线数据直接生成等高线三维透视图程序。



试验样片 1　单景 MSS　A 数据（格网为 1：5 万图幅）



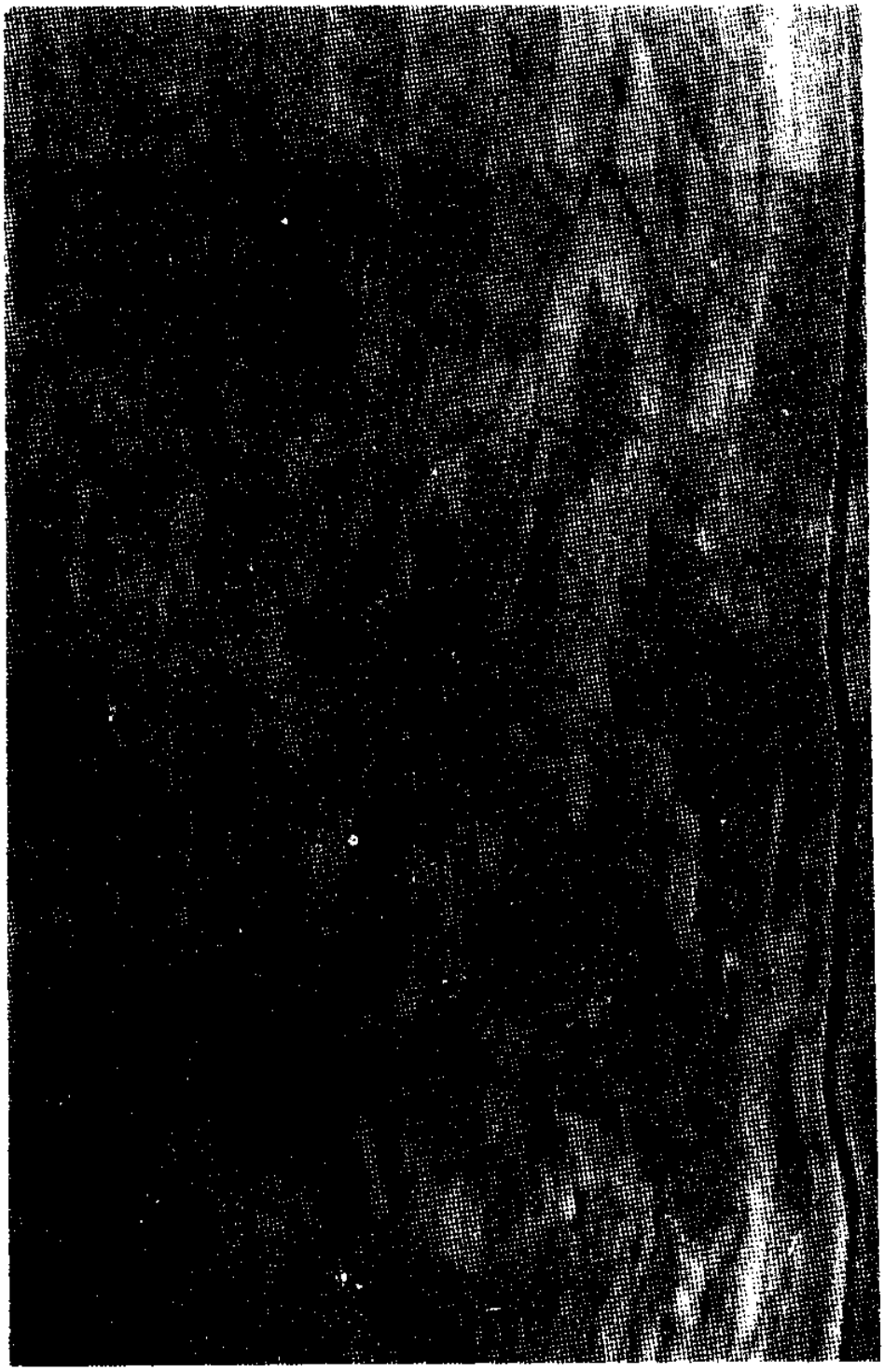
试验样片 2　单景 MSS　几何精纠正图像（格网为 1：5 万图幅）



试验样片 3　连续三景拼接之 MSS 图象



试验样片4　连续一次光学显微组织（×100）



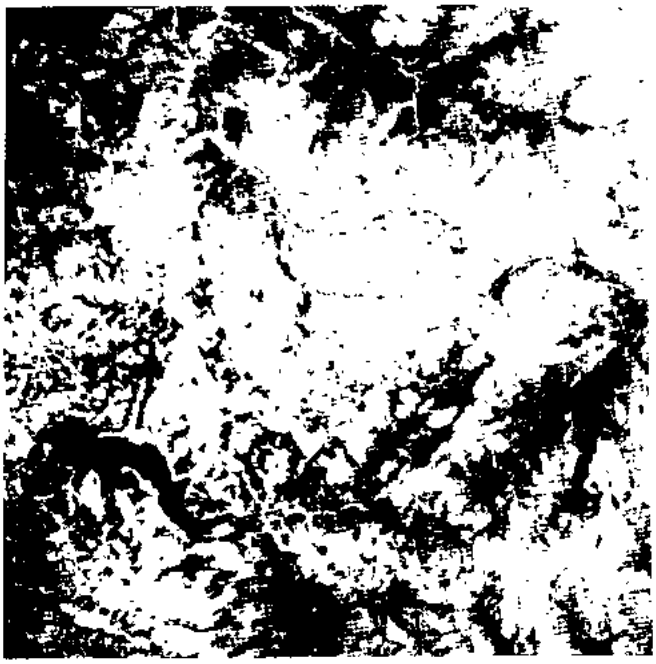
试验样片 5　航空 AMSS 原图像



试验样片 6　几何精纠正后的 AMSS 图像



试验样片 7　TM 原图像



试验样片 8　精纠正图像（512×512）

# BEIJING

4429 855
28435.95

10-56-5-2

4420 [illegible]
2845[illegible]



4411 379
28435.9

试验样片9　国际分幅（地学编码）卫星图像

4411 215
28457.7



试验样片 10　TM　A 数据的原图像



试验样片 11　TM　A 数据经双向扫描误差改正后的图像



试验样片 12　TM　A 数据右边缘图象



试验样片13　TM　A数据经双向扫描误差改正后影像移位情况