

GPS 全球定位系统在航空遥感精确定位中的应用

李德仁

(武汉测绘科技大学)

摘要

本文综述全球定位系统(GPS)在航空遥感自动精确定位中的应用现状和发展前景,着重叙述了GPS用于航空遥感定位的可能性和用机载GPS接收机按相位差分法进行航空遥感定位(空中三角测量)的一个典型试验结果。理论研究和实验表明,由于动态GPS定位技术具有很高的精确性和可靠性,它可用于从1:500到1:10万比例尺的各种地形图和专题图制作,以及诸如坐标地籍等高精度点位测定。文中还展望了GPS技术在航空、航天遥感中进一步利用的可能性。

关键词 全球定位系统 航空遥感 动态定位

一、全球定位系统(GPS)

GPS全球定位系统是英文 Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System 的字头缩写词 NAVSTAR/GPS 的简称。它的含义是:导航卫星测时和测距/全球定位系统。该系统是美军自七十年代初开始研制的新一代卫星导航和定位系统,由卫星部分、地面控制部分和用户接收机三部分组成。

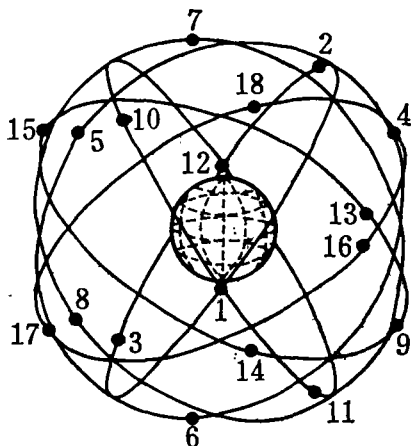


图1 GPS卫星轨道全貌

Fig. 1 Satellite orbits of GPS

卫星部分由18颗工作卫星和3颗备用卫星组成。工作卫星均匀分布在六个相对于赤道的倾角为 55° 的近似于圆的轨道面上,而轨道面的夹角为 60° ,轨道平均高度为20200 km,12恒星时绕地球一周,这样的布局可以保证全球任一测站能在任何时刻同时收到四颗以上卫星的信号(见图1)。卫星上安装有轻便的原子钟、微型计算机、电文存储和信号发射设备,均由太阳能电池提供电源。卫星上备有少量燃料,用来调节卫星的轨道和姿态。如果某一工作卫星

出现故障,备用卫星可随时根据地面控制站的命令飞往指定地点进入工作状态。

GPS卫星发射的是一对相干波,频率和波长分别为:

$$f_{L_1} = 1575.42 \text{ MHz}, \lambda_{L_1} = 19 \text{ cm}$$

$$f_{L_2} = 1227.60 \text{ MHz}, \lambda_{L_2} = 24 \text{ cm}$$

作为载波载有两类调制信号,一类为导航信号,另一类为电文信号。导航信号又分为两种,码率分别为 1.023 Mb/s 和 10.23 Mb/s。前者信号编码 1 ms 重复一次,用来快速捕获导航信号,故称捕获码,按设计仅用于粗略定位,又称粗码(C/A 码);后者七天重复一次,且各颗卫星不同,码的变化结构十分复杂,不易捕获,但能用于精密定位,故称精码(P 码)。两种码都是人为编制的一组类似噪声的信号码,通称为伪随机噪声码。电文信号同时以 50 bit/s 的速率调制在 L_1 和 L_2 上,电文内容包括卫星星历表、各项改正数和卫星工作状态等。每帧电文传播发 30 s,共 1500 bit,分为 5 个子帧,各 300 bit,借助电文信号,接收机可以选择图形最佳的一组卫星进行观测,以利于定位数据的处理。

地面控制部分是整个系统的中枢。它由一个主控站、若干个跟踪站和注入站所组成。地面控制部分的任务是保证整个系统的正常运转,包括管理和调整整个系统的工作状态,采集各类观测数据,计算卫星星历、卫星钟的钟差和漂移,各项改正数和定位信息,组成电文注入卫星存储器,以一组原子钟为基础,建立和维护一个高精度的 GPS 时间系统。

用户接收机部分由主机、电源和天线组成。主机的核心为微电脑、石英振荡器,还有相应的输入输出设备和接口。在专用软件控制下主机进行作业卫星选择、数据采集、加工、传输、处理和存储,对整个设备系统状态进行检查、报警和部分非致命故障的排除,承担整个接收系统的自动管理。天线通常采用全方位型的,以便采集来自各个方位任意非页字度角的卫星信号。由于卫星信号较微弱,在天线基座中有一个前置放大器,将信号放大后,再由同轴电缆馈入主机。电源部分为主机和天线供电,可使用经整流、稳压处理的市电,也可用蓄电池。

目前, GPS 的观测方法大致分为 4 类: (1) 多普勒法; (2) 伪距法; (3) 干涉法; (4) 载波相位法。为了满足高精度定位要求和分析研究的需要,除实时定位外,还可以将观测值录入磁盘、磁带或盒带,利用研究部门提供的软件进行后处理。例如用 GPS 数据进行空中三角测量时就需要利用相应的联合平差程序进行离线处理。

伪距法的定位原理比较简单。用伪距法定位时,接收机本机振荡产生与卫星发射信号相同的一组 P 码(或 C/A 码),通过延迟器与接收机收到的信号进行比相,当两组信号彼此重合时,测出本机信号延迟量即为卫星信号的传输时间,加上一系列改正,乘以光速,得出卫星至测站天线相位中心的斜距。如果同时观测 4 颗卫星,即可按距离交合法推算出测站位置和接收机时钟误差 4 个未知参数。伪距法定位精度较低,但可用于实时定位。如卫星、飞行器和船舶的实时导航。

载波相位法是目前讨论最广泛、深入的一种观测方法。它能提供出高精度定位的观测数据。所谓载波相位观测值实际上是卫星信号和接收机参考信息之间的相位差。由于载波相位法是利用卫星信号、载波波长为单位进行量度的,如果测相精度达到百分之一周期,则可使仪器测量分辨率达到 1.9 mm 和 2.4 mm。在精密大地测量地球重力学观测以及空中三角测量中,为了保证高精度,往往采用相对定位法。即把许多单测点瞬时载波相位观测量进行组合,形成单差方式、双差方式以及三差方式。这样做不仅处理方法简单突出,而且可以消除系统误差以提高精度。

当然,伪距法实质上也是一种相位测量法,只不过对波长较长的测距码进行相位量测($\lambda_P = 29.3$ m, $\lambda_{C/A} = 293$ m)。在同样的测相精度下,其分辨率只能达到 3 m (C/A 码)

和 0.3 m (P 码)。这就是在航空遥感中喜爱采用载波相位法测量的原因。

二、GPS 用于航空遥感精确定位的可能性

由于 GPS 全球定位系统可用于动态定位,因此,我们可以利用设在地面固定点上和在飞机上的 GPS 接收机来测定航摄飞行中摄站相对于该地面已知点的三维坐标。由 GPS 所确定的摄站位置,可作为辅助数据用于区域网联合平差。

在空中三角测量中利用 GPS 数据可达到什么样的预期精度和可靠性,已由作者和其它有关学者进行了研究。模拟计算结果非常吸引人,可总结如下^[1-3]:

(1) GPS 摄站坐标在区域网联合平差中是极其有效的,只需要中等精度的 GPS 即可满足各种比例尺测图要求(详见表 1)。

(2) 外方位线元素的利用一般比角元素更有效。附加的姿态测量在其精度很高时可用于改善高程加密精度。

(3) 利用 GPS 数据的光束法区域网平差将有较好的可靠性。这包括 GPS 数据自身的可靠性,像点坐标观测值和少量地面控制点的可靠性。

(4) 原则上讲, GPS 提供的摄站坐标用于平差可完全取代地面控制点,条件是 GPS 观测值在区域中必须连续而没有间断。此时区域网在 GPS 直角坐标系(世界大地基准 WGS 84)中平差。

(5) 为了解决基准问题,即为了获得国家坐标系(如高斯-克吕格坐标系)的加密成果,要求有一定的地面控制点。若区域网四角各有一个平高控制点,即可达到目的。但是,如果 GPS 坐标必须逐条航带进行变换,则区域的两端还需要二排高程控制,或另加飞两条构架垂直航带并且带 GPS 数据。

由于机载 GPS 接收机天线的相位中心不可能与航摄仪物镜后节点重合,所以产生了一个偏心矢量。如果将摄影机固定安装在飞机上,该偏心矢量为一常数,且在飞机坐标系(即像方坐标系)中的三个坐标分量可以测定出来(u_A, v_A, w_A)。

图 2 表示利用这种微分-组合导航系统获取空中控制的示意图。由在地面点 M 和在飞机上天线中心 A 的 GPS 观测值可得到 A 点在以 M 为原点的大地坐标 $\vec{r}_A(X_A, Y_A, Z_A)$ 。

由于偏心向量 e 亦已知,所以摄站点 S 在同一坐标系坐标亦可得知 (X_S, Y_S, Z_S)。这时需要利用像片角元素,因为偏心 e 的三个分量是在像方系统中检定的。

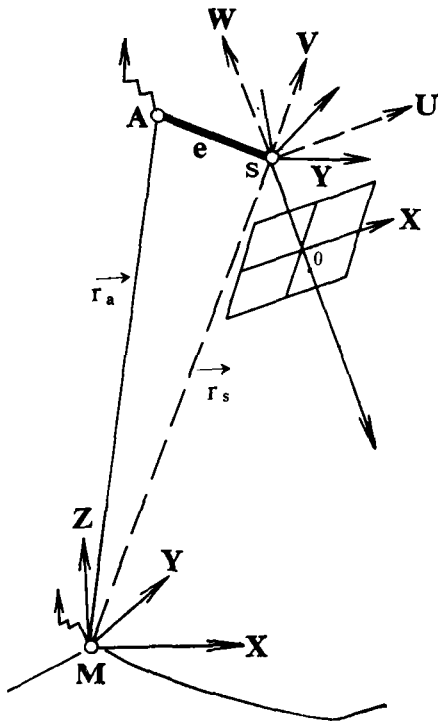


图 2 利用两台 GPS 接收机的航摄系统
Fig. 2 Airborne system with two GPS receivers

表 1 联合平差对 GPS 摄站坐标的精度要求
Table 1 Accuracy demands of combined adjustment on GPS station

测图比例尺	摄影比例尺	对空三的精度要求		等高距 (m)	对 GPS 的精度要求	
		$\mu_{x,y}$ (m)	μ_z (m)		$\sigma_{x,y}$ (m)	σ_z ③ (m)
1:10万	1:100000	5	<4	20	30	16
1:5万	1:70000	2.5	2	10	15	8
1:2.5万	1:50000	1.2	1.2	5	5	4
1:1万	1:30000	0.5	0.4	2	1.6	0.7
1:5000	1:15000	0.25	0.2	1	0.8	0.35
1:1000	1:8000	5 cm	10 cm	0.5	0.4①	0.15
高精度点位测定	1:4000	1~2 cm	6 cm	—	0.15②	0.15

注: 设 $\sigma_0 = 15\mu\text{m}$, ① $\sigma_0 = 6\mu\text{m}$, ② $\sigma_0 = 3\mu\text{m}$, ③ $\sigma_{01} = 15\mu\text{m}$.

由条件式:

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + R_{\varphi, \omega, k} \begin{bmatrix} u_A \\ v_A \\ w_A \end{bmatrix} \quad (1)$$

可列出天线中心 A 点由 GPS 数据求得的大地坐标线性化观测值方程式^[4]如下:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_s \\ \Delta Y_s \\ \Delta Z_s \end{bmatrix} + \frac{\partial X_A Y_A Z_A}{\partial \varphi \omega k} \begin{bmatrix} \Delta \varphi \\ \Delta \omega \\ \Delta k \end{bmatrix} + R_{\varphi, \omega, k} \begin{bmatrix} \Delta u_A \\ \Delta v_A \\ \Delta w_A \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_A - X_A^0 \\ Y_A - Y_A^0 \\ Z_A - Z_A^0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 X_A^0, Y_A^0, Z_A^0 是用待定未知数的近似值代入 (1) 式求得的计算坐标。而且偏心向量 e 的三个分量亦作为带权观测值处理。

三、试验结果

美国、西德、荷兰、芬兰等国学者自 1986 年以来进行了十分活跃的试验。这里主要介绍一次数据连续且具有良好控制的 GPS 动态试验,由荷兰 Meetkundige Dienst Van de Rijkswater-Steat 和西德斯图加特大学摄影测量研究所合作完成^[2,3]。

试验区具有良好的控制,摄影比例尺为 1:3800。区域已根据大量地面控制进行了空中三角测量,并以所得的摄站坐标作为“真值”(其标准差对于 X_s, Y_s, Z_s 分别为 4.3 cm, 4.2 cm, 和 1.9 cm), 用来与 GPS 观测结果进行比较。试验区域有 7 条航带共 130 张像片。

定位使用了两台 GPS 接收机,一台在地面已知点上,一台在飞机上。采用了 Serce 5 通道接收机,能够对 5 颗卫星锁相,在飞行过程中同时接收 5 颗卫星的信号(其中一次只收到 4 颗卫星)。

记录速度为每 0.6 秒一个记录。观测值包括相位观测值和 L_1C/A 码伪距观测值。

定位计算采用单差法(图 3)

$$\Delta\phi_{m,r}^i(t) = \phi_m^i(t) - \phi_r^i(t)$$

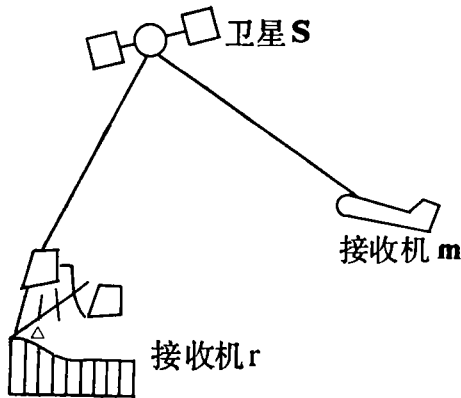


图 3 接收机与卫星之间的单差法

Fig. 3 Single differential method between receiver and satellite

1. GPS 坐标与摄站坐标“真值”的比较

如果直接用 GPS 定位方法求出的摄站坐标与其由空中三角测量求出的“真值”相比较,相差在几十米的数量级上,4 颗卫星测定的航线则达到 250 m 左右的误差,因此不能直接利用。

如果加入坐标平移的改正后,则均方根误差在 X、Y、Z 方向分别为 7 cm, 9 cm 和 6 cm,但是对于 4 颗卫星的航带,均方根误差仍达到几米。

进一步采用线性回归对 GPS 坐标和摄站“真坐标”进行回归拟合,则所有航带的坐标差之均方根值减少为 5.2 cm (对所有航带),若除去摄站坐标自身的摄影测量误差,仅为 3.8 cm (见表 2)。

令人惊奇的是,如果不利用地面静止接收机而仅利用机载接收机数据进行线性回归,也能获得同样好的结果(表 2)。

表 2 GPS 坐标与摄站坐标“真值”的比较

Table 2 Comparison between GPS coordinate and camera station “true coordinate”

项目	标准差 (RMS)	$\Delta x(\text{cm})$	$\Delta y(\text{cm})$	$\Delta z(\text{cm})$	坐标差 (cm)
有地面接收机	线性回归后	5.5	6.1	3.9	5.2
	减去摄影测量误差	3.4	4.5	3.4	3.8
无地面接收机	线性回归后	5.5	7.6	4.6	6.0
	减去摄影测量误差	3.4	6.4	4.2	4.8

上述试验结果表明,在较短的时间内, GPS 定位的系统误差实际上是线性变化的,在 Flevoland 试验时,每条航带飞行时间为 60 秒,消除线性系统误差后的精度可达到几个厘米。

然而在较长时间段内 GPS 的系统偏差就不再是线性的了。静态 GPS 定位的漂移在 78 分钟内在 X、Y、Z 方向上分别最大达到 5.1 m, 8.4 m 和 44.8 m。这些漂移与实际卫星的几何构形有关。因此,摄影测量和遥感学界今后应当研究的是如何测定和消除偏差、漂移和系统误差。

2. 利用 GPS 数据的光束法区域网平差

在联合平差中, 可以将 GPS 坐标看作为一组附加观测值(带有相应的权阵)参加平差计算, 此时可利用 (2) 式, 但应顾及 GPS 坐标存在的线性或非线性系统误差, 引入附加参数 ($a_0, a_1, \dots, b_0, b_1, \dots, c_0, c_1, \dots$)。这些附加参数的引入需要同时引入相应的地面控制。构成的仍然是镶边带状结构的法方程式。如果每个航带的 GPS 记录是独立而互不连贯的, 则应每条航带有自己的附加参数。

下面介绍 Flevoland 试验场利用 GPS 数据进行联合平差的试验结果。试验区域有七条航带, 130 片组成, 面积为 $2 \times 4 \text{ km}^2$, 摄影比例尺 1:3800, 航向重叠约 70%, 旁向重叠约 50—60%。区域内共有 877 个物点, 其中 283 个标志点、117 个自然点, 477 个用 PM1 转刺的点, 平均每点出现在 7 张像片上。

该试验区域网用 4 种不同方案进行平差计算:

AT4V2H: 控制点方案为 4V2H 的例常区域网平差;

AT6V3H: 控制点方案为 6V3H 的例常区域网平差;

GPSNL: 控制点方案为 4V2H 的 GPS 辅助空中三角测量, GPS 天线坐标由导航数据解出;

GPSED: 同上, 但 GPS 天线坐标由简单差分法解出。其中控制点方案为:

4V2H: 四角平高点加区域两端两排高程点;

6V3H: 在 4V2H 方案上再加中央一排高程点和两个平高点(约 8 条基线的间隔)。

像点坐标、控制点坐标和 GPS 天线坐标均作为带权观测值。除了通常的未知数(物点坐标、像片外方位元素, 自检校附加参数)外, 还引入每条航带 GPS 观测值的线性附加参数(对 X_s, Y_s, Z_s GPS 观测值各两个)。内方位元素和天线偏心参数则视为已知值。由于控制点坐标也是在 GPS 参考坐标系中, 故无需考虑基准的变换问题。

表 3 Flevoland 试验场区域网平差的精度

Table 3 Accuracy of block adjustment at test field flevoland

平差方案	实际精度 (cm)						理论精度 (cm)			
	平均误差			均方根误差			$\hat{\sigma}_0$	$\hat{\sigma}_x$	$\hat{\sigma}_y$	$\hat{\sigma}_z$
	V_x	V_y	V_z	u_x	u_y	u_z				
AT4V2H (1)	-1.4	-1.4	10.6	2.6	2.2	11.9	1.63	1.3	1.3	4.7
AT6V3H (2)	-0.8	-0.5	0.3	1.9	1.4	3.1	1.03	1.1	1.1	2.2
GPS NL (1)	-0.4	-0.4	-0.9	2.1	1.8	4.7	1.03	1.1	1.1	1.9
GPS ED (1)	-0.5	-0.9	0.2	2.3	1.9	4.1	1.03	1.1	1.1	1.8

(1) 41 个平面检查点, 33 个高程检查点;

(2) 39 个平面检查点, 29 个高程检查点。

平差计算后根据检查点计算出平均误差和均方根误差, 同时求出理论精度, 以资比较。结果列于表 3。从表中看出, 利用 GPS 数据的联合平差也能达到高精度摄影测量的要求精度。

四、进一步的发展与展望

根据目前的试验结果,可以发现在航空遥感中利用 GPS 数据仍有一些问题需要解决,这包括如何方便地确定相位观测值的整周期模糊度,如何解决在测区飞行及拐弯中可能出现的失锁现象以及如何消除 GPS 观测值中的各种系统误差问题。此外,由于 GPS 记录时刻并不正好是曝光摄影时刻,故需解决记录同步或者由 GPS 记录内插摄站坐标的问题。

关于 GPS 系统误差问题,如果用摄影测量方法解决,则需要引入地面控制点。因此可以考虑用大地测量中用的双差或三差法(见图 4 和图 5)。

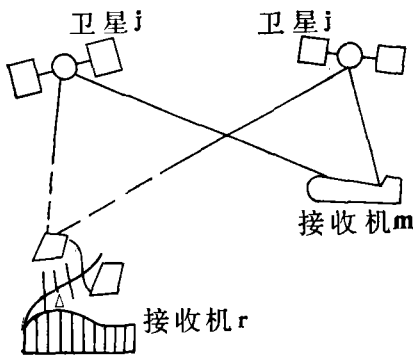


图 4 接收机和卫星之间的双差法

Fig. 4 Twice differential method between receiver and satellite

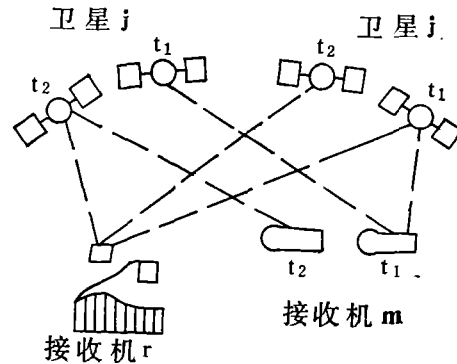


图 5 接收机与卫星之间的三差法

Fig. 5 Thrice differential method between receiver and satellite

双差法:

$$\text{即 } \Delta V \Phi_{mr}^{ij} = \Phi_m^i(t) - \Phi_r^i(t) - \Phi_m^j(t) + \Phi_r^j(t)$$

三差法:

$$\text{即 } \delta \Delta \Delta \Phi_{mr}^{ij}(t_2) = \Phi_m^i(t_2) - \Phi_r^i(t_2) - \Phi_m^j(t_2) + \Phi_r^j(t_2) \\ - [\Phi_m^i(t_1) - \Phi_r^i(t_1) - \Phi_m^j(t_1) + \Phi_r^j(t_1)]$$

进一步的发展还可以在飞机上利用三个 GPS 天线,使用差分 GPS 干涉测量确定飞行中飞机的姿态参数 (φ, ω, k) 。于是对数据进行检校和基准变换后最终将直接提供摄影机的六个定向参数。这样一来,航空遥感定位问题将变得非常简单,而且能在遥感图像获取的同时,实现图像的精纠正和地学编码。

GPS 定位与 INS 惯性导航系统组合起来也可以用来测定六个外方位元素,而且利于测定初始值。此外,车载和机载 GPS 接收机与 CCD 阵列扫描传感器结合,可直接进行断面遥感成像和快速处理系统,在铁路、公路设计和遥感应用中有很好的应用前景。

因此,目前已使用了六十年之久的由空中三角测量和地面控制点求像片定向元素的方法,将受到 GPS 技术等的冲击。将来机载 GPS 接收机用于空中三角测量,而星载 GPS 接收机将有助于实现自动定位和地学编码的自动化。加上影像的自动匹配和配准、

摄影测量与遥感的几何定位将实现全自动化。

参 考 文 献

- [1] 李德仁、单杰,利用导航数据的光线束法区域网平差的质量分析,测绘学报, No. 1, 1989.
- [2] F. Ackermann, GPS 对摄影测量的影响,测绘译丛, No. 3, 1989.
- [3] P. Friss, Empirical Accuracy of Positions Computed from Airborne GPS—Data in K. Linkwitz u. v. Hangleiter (Eds), High Precision Navigation, springer, Berlin/Heidelberg, 1989.
- [4] 李德仁,误差处理和可靠性理论,测绘出版社, 1988.

Application of Global Positioning System in High Accuracy point Determination of Airborne Remote Sensing Data

Li Deren

(Wuhan Technical University of Surveying and Mapping)

Abstract

The present status and future development about the application of GPS in high accuracy point determination of airborne remote sensing data are briefly summerized. The emphases are to describe the applicability of GPS in airborne remote sensing and to give a typical experiment result of aerotriangulation by using differential phase GPS measurement. Theoretical investigation and practical test show that kinematic GPS technique can be used for topographic and thematic mapping with a scale from 1:500 to 1:100 000, as well as for high accuracy point determination such as coordinate cadastre because it provides very high accuracy and reliability. The prospective applications of GPS technique in airborne and Spaceborne remote sensing are also discussed.

Key words Global positioning system Airborne remote Sensing Kenematic positioning.