

DGPS 测量飞机的在航 7 维状态参数*

刘基余 陈小明

(武汉测绘科技大学地学测量工程学院,武汉市珞喻路 39 号,430070)

摘要 针对 GPS 卫星 SA 和 AS 技术的人为精度降低措施,应用多个地面基准站的 DGPS 载波相位测量模式,精确地测得了飞机在航三维实时点位,对地摄影时元和三维飞行速度;其二维点位的外部符合精度达到了 $\pm 7.9\text{cm}$,高程外部符合精度为 $\pm 18.1\text{cm}$

关键词 机载 GPS 信号接收机; GPS 动态载波相位测量; 多个地面基准站

分类号 P228.42; P231.2

1 机载 GPS 测量概况

研究表明, GPS 动态差分测量 (DGPS) 技术能够消除某些 GPS 测量误差和 SA 技术的人为精度损失,将伪距解的实时点位精度提高到 $\pm 10\text{m}$ 左右,将 GPS 动态载波相位测量解的实时点位精度提高到亚 m 级甚至更优。因此,我们采用 DGPS 动态载波相位测量技术测定飞机的在航 7 维状态参数,可以满足大中比例尺航摄制图要求的摄站坐标精度。

表 1 用 DGPS 测得的飞机在航 7 维状态参数

Epoch/s	D_x / m	D_y / m	D_z / m	V_x / ms^{-1}	V_y / ms^{-1}	V_z / ms^{-1}	RM S/m	S
343 571.000	44 651.302	49 762.529	- 29 036.048	- 0.001	0.004	0.005	0.589	7
...
351 064.000	- 27 939.929	- 4 943.329	- 805.961	135.280	69.891	0.269	0.401	6
351 064.384	- 27 887.965	- 4 916.480	- 805.856					
351 065.000	- 27 804.655	- 4 873.436	- 805.687	135.270	69.901	0.273	0.403	6
351 066.000	- 27 669.379	- 4 803.542	- 805.405	135.274	69.897	0.284	0.399	6
351 067.000	- 27 534.106	- 4 733.651	- 805.096	135.273	69.891	0.319	0.392	6
351 068.000	- 27 398.826	- 4 663.781	- 804.776	135.281	69.864	0.329	0.392	6
351 069.000	- 27 263.544	- 4 593.918	- 804.445	135.285	69.857	0.338	0.387	6
351 070.000	- 27 128.254	- 4 524.082	- 804.124	135.293	69.287	0.320	0.395	6
351 071.000	- 26 992.961	- 4 454.248	- 803.800	135.295	69.828	0.323	0.395	6
351 072.000	- 26 857.665	- 4 384.427	- 803.489	135.298	69.815	0.308	0.394	6
351 073.000	- 26 722.372	- 4 314.601	- 803.182	135.292	69.826	0.303	0.396	6
351 074.000	- 26 587.083	- 4 244.768	- 802.887	135.288	69.834	0.290	0.395	6
351 074.967	- 26 456.215	- 4 177.199	- 802.605					
351 075.000	- 26 451.801	- 4 174.920	- 802.595	135.280	69.854	0.289	0.396	6
351 076.000	- 26 316.536	- 4 105.045	- 802.286	135.258	69.885	0.313	0.397	6

* 航空摄影相机的曝光时元,其测定精度可达 $\pm 1\mu\text{s}$

机载 GPS 信号接收天线的优劣,关系到机载 GPS 测量的成败。为确保成功,我们选用了美国 Sensor Systems 公司的 S67-1575-14 型双频动态天线。试验表明,该接收天线具有优良的动态接收特性。武汉测绘科技大学 4 台 Trimble 4000SST 双频接收机真正能作双频 (L_1, L_2) 动

收稿日期: 1996-01-29. 刘基余,男,60岁,教授,博士生导师,现从事卫星测量技术研究

* 国家自然科学基金和测绘科技发展基金资助项目,编号 49384008 及 90015

态载波相位测量,且不限制它们随机飞行的速度(一般接收机速度在 400m/s 以内)。其中两台内装了“事件时标输入器”和“秒脉冲输出插座”,能够将 Wild RC20 航空摄影相机的快门启开脉冲输入到双频接收机,而将快门启开的中央时刻写入 SST 数据流;通过解码处理而精确测得相机曝光时刻,进而内插出该时刻的三维坐标。Trimble 4000SSE 双频接收机同样适应于机载 GPS 测量的特殊要求。无论采用机载 4000SST,还是采用机载 4000SSE,均用我们自己研究成功的 DDKIN GPS 动态测量数据处理软件作数据处理,该软件能够精细地解算出飞机的在航 7 维状态参数,如表 1(机载 4000SSE,3 个基准站用 4000SST,1995 年 7 月 20 日于天津地区)。

2 DGPS 测量

机载 GPS 测量试验的目的是为了用于航空摄影测量的生产实践,如何评定在航摄测量地区所采集的机载 GPS 数据质量,是确认每个摄站坐标置信度的大问题。为此,我们采用了“动态图形数据检验法”。其基本点是用多个地面基准站进行 DGPS 测量(如图 1)。例如,在太原试验时,采用了 3 个基准站:一个基准站(JC00)位于太原飞机场内,以确保与机载 GPS 信号接收机的同步测量;另外两个基准站(0132 和 1691)处于太原航摄综合试验场的两个最边角点上。这样,在任一时刻,机载 GPS 测量点位与 3 个基准站能够构成 3 个动态数据检验三角形(见图 2),从而分别算得 3 个三角形的坐标分量闭合差。表 2 给出了以 JC00-1691、1691-0132、0132-JC00 三条基线与机载 GPS 测量点位构成的三组动态三角形的坐标闭合差。由表可见,三者的坐标闭合精度相差较小,且各自的平均闭合精度均接近于 1ppm。这表明,机载 GPS 测量数据具有较高的质量,而可用它解算出可靠的摄站三维坐标。因此,机载 GPS 测量用于航空摄影测量作业时,上述三角形坐标闭合精度可作为评定 GPS 数据质量优劣的依据。

表 2 用 3 个基准站解算的动态图形分量闭合精度

(三角形) 时元 /s	动态三角形坐标闭合差			边长之和 m	闭合精度 ppm
	dx /m	dy /m	dz /m		
(Triangle JC00-1691-Airborne-GPS)					
202 370.176	0.031	0.041	-0.019	60 516.616	0.906
202 372.224	0.029	0.028	-0.022	61 001.677	0.849
202 374.016	0.030	0.042	-0.019	61 436.017	0.895
202 376.064	0.030	0.034	-0.023	61 941.355	0.821
202 378.112	0.031	0.038	-0.021	62 454.097	0.854
202 380.160	0.030	0.037	-0.022	62 971.564	0.833
(Triangle 0132-JC00-Airborne-GPS)					
202 370.176	0.051	-0.071	-0.017	64 060.469	1.390
202 372.224	0.047	-0.065	-0.015	64 544.666	1.264
202 374.016	0.051	-0.072	-0.017	64 978.348	1.383
202 376.064	0.051	-0.070	-0.018	65 483.054	1.351
202 378.112	0.048	-0.062	-0.012	65 995.302	1.202
202 380.160	0.052	-0.073	-0.016	66 512.427	1.369
(Triangle 0132-1691-Airborne-GPS)					
202 370.176	0.013	-0.037	-0.031	59 639.115	0.838
202 372.224	0.011	-0.034	-0.030	60 101.718	0.776
202 374.016	0.014	-0.037	-0.031	60 520.188	0.830
202 376.064	0.014	-0.043	-0.036	61 011.731	0.947
202 378.112	0.010	-0.031	-0.028	61 515.385	0.698
202 380.160	0.015	-0.043	-0.033	62 028.364	0.907

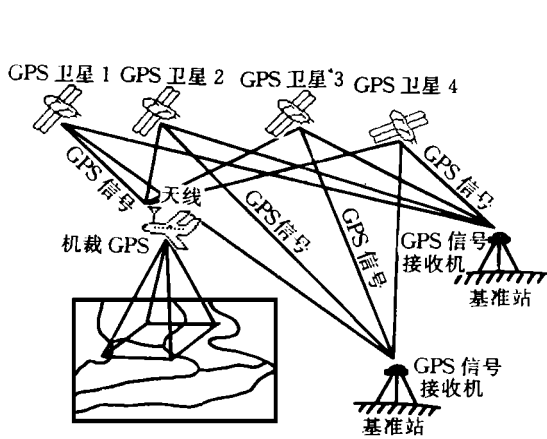


图 1 多基准站的 DGPS测量

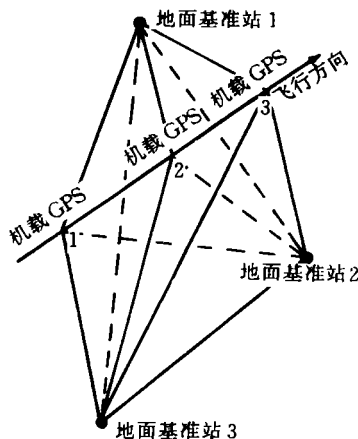


图 2 动态图形数据检验法

3 动静态解算成果比较

在中国境内的多次 GPS测量实践证明,用 Trimble 4000SST双频接收机能够获得外符合精度达到 cm级的三维点位坐标。为了寻求另一种 GPS动态数据质量的评定方法,我们采用了飞行前后的双重静态测量(初始化)方法。静态测量时间的长短,取决于待航飞机至基准站的距离。例如,1994年 4月 27日作机载 GPS动态载波相位测量时,停于机场的待航飞机(Lear Jet 36A)至第一个基准站的距离仅为 115.754m,而各作了 20min的静态测量。飞行前后初始

表 3 飞行前后初始化测量和飞行测量时的机载 GPS接收天线相对位置

测量模式	时元 /s	$\Delta X /m$	$\Delta Y /m$	$\Delta Z /m$
起飞前	285 080. 192	- 100. 644	4. 771	57. 009
	285 082. 240	- 100. 647	4. 778	- 57. 000
	285 084. 032	- 100. 645	4. 772	- 57. 010
	285 086. 080	- 100. 646	4. 767	- 57. 011
	285 088. 128	- 100. 646	4. 769	- 57. 006
	285 090. 176	- 100. 643	4. 771	- 57. 003
	285 092. 224	- 100. 643	4. 770	- 57. 004
初始化	285 094. 016	- 100. 646	4. 771	- 56. 998
	287 080. 064	- 1 068. 756	11 251. 430	- 12 003. 290
	287 082. 112	- 1 203. 011	11 294. 148	- 12 125. 271
	287 084. 160	- 1 344. 858	11 327. 073	- 12 244. 386
	287 086. 208	- 1 494. 772	11 350. 357	- 12 357. 886
	287 088. 256	- 1 654. 330	11 364. 959	- 12 460. 974
	287 090. 048	- 1 800. 909	11 369. 837	- 12 542. 615
飞行测量	288 652. 160	- 97. 528	20. 345	- 71. 946
	288 654. 208	- 97. 527	20. 344	- 71. 946
	288 656. 256	- 97. 526	20. 341	- 71. 944
静态测量	288 658. 048	- 97. 525	20. 336	- 71. 948
	288 660. 096	- 97. 530	20. 345	- 71. 940
	288 662. 144	- 97. 527	20. 335	- 71. 947
	288 664. 192	- 97. 531	20. 342	- 71. 944
	288 666. 240	- 97. 534	20. 343	- 71. 946

化测量数据,用随机 Trimvec Plus 软件作静态测量处理,其解算结果为:

起飞前飞机位置 $\Delta X_b = -100.646\text{m}$, $\Delta Y_b = +4.781\text{m}$, $\Delta Z_b = -57.013\text{m}$

着陆后飞机位置 $\Delta X_a = -97.535\text{m}$, $\Delta Y_a = +20.345\text{m}$, $\Delta Z_a = -71.936\text{m}$

飞行前后初始化测量数据和飞行中采集的 GPS 载波相位测量数据,用我们自己研制的 DDKIN 动态测量数据处理软件进行了联合解算,其结果如表 3 所示。由此可见,对于初始化测量数据而言,DDKIN 软件的逐点解算结果与 Trimvec Plus 软件静态 20min 测量解算结果 (ΔX_{ab} , ΔY_{ab} , ΔZ_{ab}) 之差在 2cm 以内。这不仅说明机载 GPS 测量数据具有较高的质量,而且证明 DDKIN 软件具有精确的动态点位解算能力。

此外,同一时元的飞行速度之差,亦能用于评定 GPS 动态数据质量。正如前述,我们的机载 GPS 动态载波相位测量采用了 3 个地面基准站。它们分别与机载 GPS 测量数据作 DGPS 解算时,于同一时元可以解算出三组飞行速度(如表 4 所示)。表 4 是 1994 年 5 月 10 日于太原地区所作的机载 GPS 测量成果。同一时元的机载 GPS 测量数据,相对于 3 个地面基准站 (JC00, 0132, 1691) 可以解算出三组飞行速度。例如,在 202 370.176s 时元,相对于 JC00 基准站的 X 方向的速度为 -94.518m/s ; 相对于 0132 基准站的 X 方向的速度为 -94.521m/s ; 相对于 1691 基准站的 X 方向的速度为 -94.519m/s ; 它们的最大较差仅为 3mm/s 。Y 方向的速度最大较差为 13mm/s , Z 方向的速度最大较差为 6mm/s , X 方向的速度最大较差仅为 5mm/s 。后续外部符合精度计算表明,二维点位达到了 $\pm 7.9\text{cm}$ 的外符合精度,高程外符合精度仅为 $\pm 18.1\text{cm}$, 满足航空摄影测量的作业需要(详见 [6] 所论)。

表 4 相对于 3 个地面基准站 (JC00, 0132, 1691) 的三维飞行速度于同一时元的较差

Epoch/s	$V_x / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			$V_y / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			$V_z / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		
	Air-00	Air-32	Air-91	Air-00	Air-32	Air-91	Air-00	Air-32	Air-91
202 370.176	-94.518	-94.521	-94.519	27.123	27.123	27.121	-80.439	-80.441	-80.441
202 372.224	-89.263	-89.259	-89.261	32.821	32.817	32.818	-84.619	-84.620	-84.620
202 374.016	-84.257	-84.261	-84.259	37.416	37.423	37.420	-87.983	-87.981	-87.982
202 376.064	-78.110	-78.109	-78.109	42.678	42.675	42.671	-91.453	-91.452	-91.456
202 378.112	-71.606	-71.603	-71.606	48.535	48.530	48.540	-94.106	-94.111	-94.104
202 380.160	-64.888	-64.892	-64.888	53.832	93.843	53.831	-96.344	-96.339	-96.345
202 382.208	-57.754	-57.753	-57.754	57.236	57.235	57.238	-98.978	-98.978	-98.977
202 384.256	-50.315	-50.314	-50.315	61.935	61.929	61.935	-100.198	-100.202	-100.200
202 386.048	-43.599	-43.600	-43.599	65.625	65.630	65.624	-100.884	-100.882	-100.884
202 388.096	-35.804	-35.804	-35.805	68.635	68.634	68.636	-101.652	-101.653	-101.653
202 390.144	-27.726	-27.727	-27.726	71.644	71.650	71.646	-101.666	-101.663	-101.664
202 392.192	-19.477	-19.476	-19.475	75.118	75.111	75.114	-100.618	-100.620	-100.619
202 394.240	-11.295	-11.294	-11.293	78.426	78.425	78.424	-98.810	-98.810	-98.810
202 396.032	-4.001	-4.002	-4.003	80.534	80.538	80.538	-97.085	-97.084	-97.084
202 398.080	4.276	4.279	4.276	82.034	82.034	82.035	-95.076	-95.076	-95.077
202 400.128	12.404	12.399	12.404	83.288	83.287	83.286	-92.589	-92.591	-92.590
202 402.176	20.450	20.451	20.451	84.000	84.003	84.000	-89.939	-89.938	-89.940
202 404.224	28.428	28.429	28.426	84.291	84.289	84.293	-86.850	-86.850	-86.849
202 406.016	35.153	35.151	35.151	84.143	84.148	84.146	-83.957	-83.956	-83.956
202 408.064	42.447	42.448	42.449	84.326	84.321	84.322	-79.646	-79.647	-79.647
202 410.112	49.666	49.666	49.666	84.120	84.124	84.123	-74.677	-74.677	-74.675
202 412.160	56.799	56.799	56.798	83.007	83.003	83.005	-69.788	-69.788	-69.789
202 414.208	63.421	63.421	63.420	81.247	81.248	81.250	-65.125	-65.126	-65.124
202 416.256	69.785	69.785	69.790	79.246	79.248	79.235	-59.968	-59.966	-59.972
202 418.048	74.979	74.979	74.975	77.043	77.045	77.055	-55.437	-55.436	-55.434
202 420.096	80.462	80.462	80.463	74.507	74.506	74.504	-49.806	-49.806	-49.805

实践证明, DGPS多基准站的动态图形数据检验法, 是一种评定 GPS动态数据质量的有效方法; 辅以双重静态测量措施, 能够确保机载 GPS测量的高精度。

致谢 感谢国家自然科学基金委和国家测绘局科技发展基金委给予的资助; 感谢李德仁院士及王光、李静年、蓝蔚、袁修孝、朱宜莹、王树根、赵金祥、赵建虎、武军骊等同志对机载 GPS测量实践的支持和合作!

参 考 文 献

- 1 李德仁. GPS全球定位系统在航空遥感精确定位中的应用. 环境遥感, 1991(3)
- 2 刘基余. A Real-time Solution for GPS Measured Distances Without Cycle Slips. Survey Review, 1993, 32 (247)
- 3 刘基余. Integration of Space-borne GPS and Terrestrial Measurements. In: Proceedings of the GPS Seminar-Workshop. Malaysia, 1993.
- 4 刘基余. GPS Kinematic Carrier Phase Measurements for Aerial Photogrammetry. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 51(5)
- 5 陈小明. GPS动态定位在空中三角测量中的应用研究: [学位论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1993

7D State Parameter Measurement for Flying Aircrafts with DGPS

Liu Jiyu Chen Xiaoming

(School of Geo-science and Surveying Engineering, W TU SM, 39 Luoyu Road, Wuhan, China 430070)

Abstract GPS kinematic carrier phase measurements can be used to determine seven dimensional state and three attitude parameters of a motional carrier such as an aircraft and low-earth-orbit spacecraft, on which an antenna is installed to receive GPS signals. It is known from airborne GPS test results for photogrammetry in China since 1994 that GPS carrier phase measurements in a motional environment have acquired external accuracies of $\pm 7.9\text{cm}$ for two dimensional positions and $\pm 18.1\text{cm}$ for point heights.

Key words airborne GPS receiver; GPS kinematic carrier phase measurement; multireference ground station