

GPS 卫星覆盖及定点定位精度的研究

蒋志凯 孙德斌 王建赤** 阚正金**

(大连水产学院)

摘要 在大连水产学院导航实验室对 GPS 卫星覆盖情况及定点定位精度的研究表明: GPS 卫星每天的二维和三维定位时间分别占全天的 82.8%~92.3%和 55.0%~74.3%, 覆盖情况良好。其中: 二维定位的 95%或然圆半径为 14.72 m; 三维定位时高度的 95%或然区为 22.54 m。

关键词 导航, GPS, 定位, 覆盖, 精度

中图分类号 U675.72

1 实验条件与方法

为了对 GPS 系统的卫星覆盖情况及该系统的定点定位精度进行研究, 我们采用了美国美洛华 (MagNavox) 公司生产的 MX4400 单频双通道 C/A 码 GPS 导航仪进行定点定位测量。

1.1 观测时间

从 1991 年 5 月 10 日世界时零点至 5 月 17 日世界时零点, 共进行了 168 h 的昼夜连续观测。

1.2 观测地点

观测点设在大连水产学院实验楼导航实验室内 (纬度 32°58'N, 经度 121°31'E)。

1.3 天线安装

天线装在大连水产学院实验楼楼顶 (天线高度 39 m)。

1.4 初始输入数据

纬度: 32°58'N 经度: 121°31'E

天线高度: 39 m HDOP: 100 VDOP: 100

最小仰角: 5° 各种航海数据: 0

1.5 所采集的数据

所采集的数据分为两类。

* 收文日期: 1993—02—22

** 王建赤, 阚正金系大连水产学院应用电子技术专业 91 届毕业生。

一类是用与导航仪接口的打印机打印出的数据,有: \$GPGDP (经纬度), \$GPGGA (导航卫星数), \$GPZDA (世界时时间) 和 \$CPMVXGP (天线高度)。

另一类是通过观测用手工记录的数据,有: HDOP, VDOP, 卫星星号, 卫星仰角, 卫星方位角, 卫星升起和降落的时间。

1.6 观测方法

采用等时间间隔采样法。连续开机 7 昼夜。采样时间间隔原定为 5 min 一次,后考虑到手工记录的数据较多,改为 10 min 一次。

2 GPS 卫星覆盖情况的观测结果与讨论

2.1 GPS 卫星及其健康状况

通过连续 7 昼夜的不停机观测,我们发现在大连地区上空出现的 GPS 卫星共有 15 颗。这 15 颗 GPS 卫星的星号分别为: 2, 3, 6, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 和 23。

上述 15 颗 GPS 卫星的健康状况大致可分作两类。一类始终处于健康 (H) 状态,如: 6, 13, 18, 23 号卫星; 另一类则在健康与不健康 (U) 状态之间变化,除 6, 13, 18 和 23 号卫星外的其余 11 颗卫星就属于这种情况。在属于第二种情况的 11 颗卫星中: 2, 14, 15, 21 号卫星处于健康状态的时间较长; 11, 12 号卫星处于不健康状态的时间较长。

2.2 GPS 卫星在进行二维定位时的覆盖情况

在用 GPS 卫星进行二维定位时,需有 3 颗卫星同时参与定位。其二维定位时间分布表如表 1 所示。

表 1 GPS 卫星二维定位时间表

日 期	二维定位时间分布 (UTC)	二维定位时间	占全天 24 小时的百分比 (%)
5 月 10 日	00 00~01 40, 05 00~05 10, 05 32~05 50, 06 00~07 00, 07 20~23 59	19 小时 50 分	82.8
5 月 11 日	00 00~01 50, 04 50~05 00, 05 10~05 40, 05 50~17 20, 17 50~23 59	20 小时 10 分	84.0
5 月 12 日	00 00~01 40, 02 10~03 00, 04 30~19 00, 19 20~23 59	21 小时 40 分	90.2
5 月 13 日	00 00~01 40, 02 00~03 00, 04 30~23 59	22 小时 10 分	92.3
5 月 14 日	00 00~01 30, 02 00~02 50, 04 30~13 50, 14 00~23 59	21 小时 40 分	90.2
5 月 15 日	00 00~01 30, 04 20~14 10, 14 20~19 00, 19 10~19 20, 19 30~23 59	20 小时 10 分	84.0
5 月 16 日	00 00~01 30, 01 50~02 00, 04 20~17 00, 17 30~23 59	20 小时 50 分	86.8

2.3 GPS 卫星在进行三维定位时的覆盖情况

在用 GPS 卫星进行三维定位时,需有 4 颗卫星同时参与定位。其三维定位时间分布表如表 2 所示。

2.4 GPS 卫星覆盖情况的讨论

地球上高度为 h 的静止卫星覆盖一角度为 φ_s 的球面切片,其覆盖范围的大小由运载体利用卫星定位时所允许的最小仰角来确定。如图 1 所示。

表 2 GPS 卫星三维定位时间表

日期	三维定位时间分布 (UTC)	三维定位时间	占全天 24 小时的百分比 (%)
5 月 10 日	00 00~01 20, 06 00~07 00, 08 20~12 00, 13 00~13 20, 13 30~17 30, 17 50~18 00, 18 20~18 40, 19 30~19 40, 19 50~22 00, 22 10~23 59	14 小时 20 分	59.7
5 月 11 日	06 10~07 00, 07 20~08 00, 08 20~09 00, 09 10~12 00, 12 50~13 00, 14 10~16 00, 16 30~16 40, 17 00~17 10, 18 00~21 50, 22 00~23 59	13 小时 10 分	55.0
5 月 12 日	00 00~01 20, 04 50~05 00, 05 30~05 40, 06 10~06 50, 07 10~08 00, 08 20~14 00, 14 40~14 50, 15 00~15 10, 15 20~16 00, 16 20~17 20, 17 50~18 00, 18 10~19 40, 19 40~23 59	15 小时 50 分	66.0
5 月 13 日	00 00~01 20, 04 40~06 00, 06 10~06 50, 07 20~08 00, 08 10~16 00, 16 10~17 10, 17 40~18 00, 19 20~23 59	17 小时 50 分	74.3
5 月 14 日	00 00~01 00, 05 00~05 30, 05 40~06 00, 08 20~13 50, 14 00~14 10, 14 30~16 00, 16 10~17 10, 17 40~18 30, 19 10~23 59	15 小时 50 分	66.0
5 月 15 日	00 00~01 10, 04 40~06 00, 06 10~06 40, 08 10~14 00, 14 40~15 00, 16 30~16 50, 17 30~18 20, 19 30~23 59	14 小时 50 分	61.8
5 月 16 日	00 00~01 10, 04 30~04 40, 05 00~05 20, 05 30~06 00, 06 10~06 40, 08 20~14 00, 14 10~16 50, 17 40~18 20, 19 00~23 59	15 小时 30 分	64.4

魏光顺^[1]等给出了如下关系式:

$$h = r_N \left[\frac{\cos \Delta_o}{\cos(\Delta_o + \varphi_z)} - 1 \right] \quad (1)$$

$$\varphi_z = \arccos \left[\frac{r_N \cos \Delta_o}{r_N + \Delta_o} \right] - \Delta_o \quad (2)$$

若不用覆盖面积而用地球表面弧长 $r_N \varphi_z$ 和最大可见距离 (即斜距) D_s 来表示卫星覆盖区域的大小, 则以最小仰角 Δ_o 作为参数, 我们可通过计算绘出图 2。

从图 2 中可以看出: 卫星轨道的高度越高, 卫星的视野就越宽, 其覆盖区就越大。

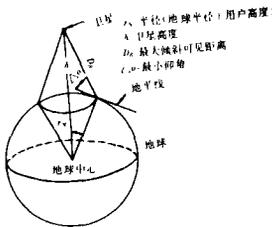


图 1 静止卫星的覆盖区

GPS 卫星的轨道是离地面 20 000 km 的圆轨道。处于 20 000 km 高处的静止卫星所覆盖的地面约占地球表面积的 38%, 用户视界以地球中心角计算达 152°^[2]。由于 GPS 卫星不是静止卫星, 再加上卫星轨道面的倾角较大, 利用地球自转, 1 颗卫星即可覆盖全球。但是根据 GPS 系统的工作原理, 实现二维定位需同时使用来自 3 颗卫星的导航信息, 实现三维定位则需同时使用来自 4 颗卫星的导航信息。因此, 我们在研究 GPS 卫星的覆盖问题时, 仅仅研究其对地球表面的覆盖程度是不够的, 还必须研究地球上任何地方所能同时看到的卫星个数、它们的健康状况、几何配置情况 (GDOP 的大小) 以及利用 GPS 卫星进行二维和三维定位在时间上的连续性问题。

世界上现有的第一代卫星导航系统是美国的子午仪系统 (NNSS)。从空间的角度看它虽能实现全球复盖,但从时间的角度看却有不能连续定位的缺点。美国之所以要研制第二代的 GPS 系统,除为了进一步提高卫星导航的定位精度外,还有一个重要目的是为了克服子午仪系统不能连续定位的缺点。因此,最大限度地缩短运载体在地球任何地方不能得到定位所必需的导航信息的最大时间间隔,对卫星导航系统而言是实现全球覆盖的连续导航的关键。本文正是从能否连续进行二维或三维定位的实用性出发,从时间覆盖角度来研究现有 GPS 卫星的覆盖现状的。

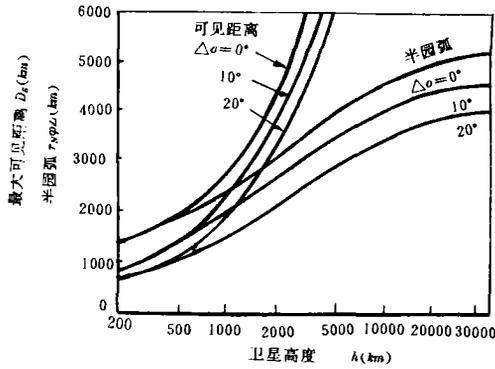


图 2 静止卫星高度与覆盖区的关系

GPS 系统原计划共有 3 条升交点赤经相差 120° 的轨道,轨道面倾角为 63° ,每条轨道上均匀分布 8 颗卫星,共 24 颗卫星。若按此方案实现,地球上任何地方至少能同时看到 6 颗卫星,最多能同时看到 11 颗卫星。后因经费不足,又将原计划的卫星网作了调整,改为设置 6 条升交点赤经相差 60° 的轨道,轨道面倾角为 55° ,每条轨道上均匀分布 3 颗卫星,共 18 颗卫星 (备用卫星除外)。若按后改方案实现,地球上任何地方至少能同时看到 4 颗卫星,最多能同时看到 9 颗卫星。这样的安排从空间的角度虽仍能覆盖全球,但在南、北半球将各产生两个与赤道平行的带状性能降低区,使高精度连续导航受到一定程度的影响。

由于 GPS 系统计划中的卫星尚未全部发射入轨,我国又处于上述的一个带状性能降低区内,加上定位时对最小仰角和 GDOP 值的限制,故在大连地区还不能利用 GPS 卫星进行全天的连续二维或三维定位。

大连舰艇学院^[3]于 1987 年 4 月 17~18 日和 1988 年 3 月 4 日曾分别对 GPS 卫星在大连地区的覆盖时间进行了两次短时间的观测,结果表明:1987 年 4 月可观测到的卫星有 6 颗,至少有 3 颗星覆盖的时间为 9.3~10 h;1988 年 3 月可观测到的卫星增为 7 颗,至少有 3 星覆盖的时间约 10.5 h,至少有 4 星覆盖的时间约 5 h。

我们于 1991 年 5 月于大连水产学院对 GPS 卫星在大连地区的覆盖时间的连续七昼夜的观测表明:可观测到的 GPS 卫星已增至 15 颗,每天可进行二维定位 (至少有 3 星覆盖) 的时间占全天 24 h 的 82.8%~92.3%,每天可进行三维定位 (至少有 4 星覆盖) 的时间占全天 24 h 的 55.0%~74.3%。可见,随着预定的 GPS 卫星的不断升空,三星以上的覆盖率正在不断增加,但不论是二维定位还是三维定位都尚未达到可连续定位的要求。

3 数据处理计算机程序

为了对在二维定位时测得的经度和纬度数据和在三维定位时测得的经度、纬度和高

度数据进行处理, 从而对 GPS 卫星的二维和三维定点定位精度作出分析, 我们采用将高度数据单独分离出来的方法, 用 FORTRAN 语言编制了两套程序, 即: 经纬度数据处理程序和高度数据处理程序。程序除了可计算并打印出各观测值的均值、标准偏差、95% 或然区和 95% 或然圆半径外, 还可通过 INPUT 语句实现对不同时间区间的观测误差计算和统计在不同误差区间内的观测值个数。

4 数据处理结果与讨论

4.1 经、纬度数据处理结果与讨论

将 7 昼夜共 1 008 次实测所得到的观测数据输入计算机进行数据处理, 可得到如表 3 所示的结果。

表 3 经、纬度数据处理结果

观测次数	φ_m	λ_m	σ_φ	σ_λ	$M_{95\varphi}$	$M_{95\lambda}$	R_{95}
1 008	38°52.059 8'N	121°32.932 7'E	0.002 786'	0.003 645'	10.31m	10.51m	14.72 m

由表 3 可见: 二维定位的 95% 或然圆半径小于 15 m, 且纬度误差与经度误差相差不大。

为了进一步研究 GPS 系统二维定位的精度随时间的变化, 我们还将 7 d 中同一时间间隔内的各次观测值分别加以处理, 其结果见表 4。

表 4 不同时间区间内的经纬度数据处理结果

观测次数	时间间隔 (世界时)	φ_m	λ_m	σ_φ	σ_λ	$M_{95\varphi}$ (m)	$M_{95\lambda}$ (m)	R_{95} (m)
42	00 00~00 59	38°52.057 8'N	121°32.931 8'E	0.001 059'	0.002 136'	3.92	6.16	7.30
42	01 00~01 59	38°52.058 1'N	121°32.932 3'E	0.000 997'	0.002 810'	3.69	8.10	8.90
42	02 00~02 59	38°52.058 4'N	121°32.932 5'E	0.001 074'	0.002 726'	3.98	7.86	8.81
42	03 00~03 59	38°52.059 3'N	121°32.933 1'E	0.002 847'	0.002 643'	10.54	7.62	13.00
42	04 00~04 59	38°52.060 4'N	121°32.933 5'E	0.003 624'	0.002 921'	13.41	8.42	15.84
42	05 00~05 59	38°52.062 7'N	121°32.933 4'E	0.004 427'	0.003 211'	16.38	9.26	18.86
42	06 00~06 59	38°52.061 4'N	121°32.933 4'E	0.002 962'	0.003 248'	10.96	9.37	14.42
42	07 00~07 59	38°52.062 3'N	121°32.928 9'E	0.004 451'	0.009 474'	16.47	27.32	31.90
42	08 00~08 59	38°52.063 0'N	121°32.937 9'E	0.005 677'	0.008 817'	21.00	25.43	32.98
42	09 00~09 59	38°52.060 9'N	121°32.935 2'E	0.001 599'	0.003 240'	5.77	9.34	10.98
42	10 00~10 59	38°52.061 1'N	121°32.933 5'E	0.001 574'	0.001 399'	5.82	4.03	7.08
42	11 00~11 59	38°52.060 9'N	121°32.932 6'E	0.001 279'	0.000 693'	4.73	2.00	5.14
42	12 00~12 59	38°52.060 1'N	121°32.932 1'E	0.001 111'	0.000 791'	4.11	2.28	4.70
42	13 00~13 59	38°52.059 6'N	121°32.932 2'E	0.001 310'	0.000 670'	4.85	6.70	5.22
42	14 00~14 59	38°52.059 7'N	121°32.934 1'E	0.002 166'	0.002 907'	8.02	8.38	11.59
42	15 00~15 59	38°52.059 7'N	121°32.933 1'E	0.001 412'	0.000 822'	5.23	2.37	5.74
42	16 00~16 59	38°52.059 6'N	121°32.933 0'E	0.001 471'	0.000 572'	5.44	1.65	5.69
42	17 00~17 59	38°52.059 2'N	121°32.933 0'E	0.001 476'	0.000 821'	5.46	2.37	5.95
42	18 00~18 59	38°52.059 1'N	121°32.932 4'E	0.001 498'	0.001 245'	5.54	3.59	6.60
42	19 00~19 59	38°52.059 1'N	121°32.931 8'E	0.001 465'	0.001 444'	5.42	4.16	6.84
42	20 00~20 59	38°52.058 6'N	121°32.931 4'E	0.001 427'	0.001 519'	5.28	4.38	6.86
42	21 00~21 59	38°52.058 2'N	121°32.931 1'E	0.001 334'	0.001 550'	4.94	4.47	6.66
42	22 00~22 59	38°52.058 0'N	121°32.931 0'E	0.001 226'	0.001 487'	4.54	4.29	6.24
42	23 00~23 59	38°52.058 0'N	121°32.931 1'E	0.001 177'	0.001 317'	4.36	3.80	5.78

为了更直观地看出 $M_{95\phi}$ 、 $M_{95\lambda}$ 和 R_{95} 随着时间的变化关系，我们分别绘出了它们随时间变化的关系曲线，如图 3、图 4 和图 5 所示。

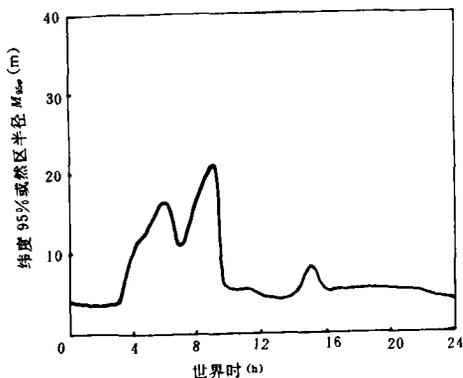


图 3 纬度 95%或然区与时间的关系

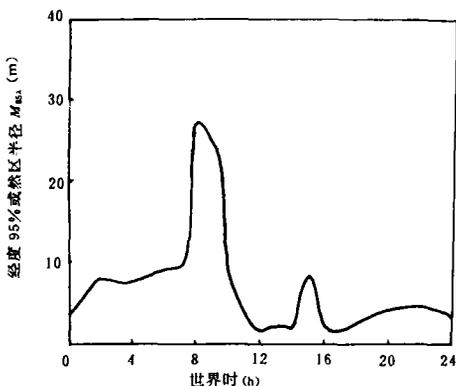


图 4 经度 95%或然区与时间的关系

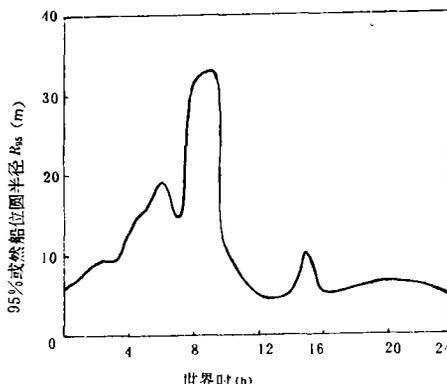


图 5 95%或然船位圆半径与时间的关系

由此可见，利用 GPS 卫星定位在每天不同时间的定位精度是不同的，但各天同一时间的定位精度却服从一定的规律。每日世界时 10 h 至次日 3 h（相当于北京时间 18 h 至次日 11 h）定位精度较高， R_{95} 为 4.70~8.90 m；每日世界时 3 h 至 10 h（相当于北京时间 11 h 至 18 h）定位精度较低， R_{95} 为 10.98~32.98 m。分析产生这一现象的原因是由电离层的变化所致。我们采用的是单频道 GPS 导航仪。白天电离层变化较为剧烈，对定位精度的影响较大；夜间电离层的变化较小，对定位精度的影响较小。

4.2 高度数据处理结果与讨论

只有进行三维定位，才能得到高度数据。由本文第 2 节中对 GPS 卫星覆盖情况的讨论可知，目前 GPS 系统尚未实现在全球任何地方的全天三维连续定位。在大连地区，每天可进行三维定位的时间仅占全天 24 h 的 55.0%~74.3%。在我们所进行的连续 7 昼夜的 1 008 次实际定位中，三维定位仅 636 次（即 7 d 中平均可进行三维定位的时间仅占 63%），其余均为二维定位。将三维定位所得到的高度数据输入计算机进行数据处理，可得到如表 5 所示的结果。

表5 高度数据的处理结果

观测次数	H_m	σ_H	M_{95H}
636	52.06 m	11.27 m	22.54 m

7 d 中按各天得到的结果如表 6 所示。

表6 各天高度数据的处理结果

观测日期	观测次数	H_m	σ_H	M_{95H}
5月10日	86	50.85 m	10.37 m	20.74 m
5月11日	80	56.50 m	12.26 m	24.52 m
5月12日	90	53.68 m	8.58 m	17.16 m
5月13日	106	50.08 m	8.08 m	16.16 m
5月14日	96	47.70 m	14.64 m	29.28 m
5月15日	86	55.96 m	8.49 m	16.99 m
5月16日	92	50.88 m	12.53 m	25.06 m

根据误差理论,误差分为系统误差和随机误差。本文仅对 GPS 定点定位的随机误差作了分析,未涉及有关系统误差问题。例如, GPS 系统采用的是 WGS-84 坐标系,而我国现一直沿用北京-54 坐标系。为消除此系统误差,必须进行相应的坐标变换。此外,本文对 GPS 定点定位的随机误差的分析是在随机误差服从正态分布的基础上进行的,但实际上定点定位的随机误差并不完全服从正态分布。因此,仍有进一步的工作可做。

参 考 文 献

- 1 魏光顺等. 无线电导航原理. 南京: 东南大学出版社, 1989. 317~319, 图 8-26~8-27
- 2 言中, 丁子明. 卫星无线电导航. 北京: 国防工业出版社, 1989. 194
- 3 海军大连舰艇学院. GPS 卫导接收机的应用和论证报告, 1988. 31~32
- 4 李庆海, 陶本藻. 概率统计原理和在测量中的应用. 北京: 测绘出版社. 1982

A study on the coverage of GPS satellites and positioning accuracy at a fixed point

Jinag Zhikai Sun Debin et al

(Dalian Fisheries College, Dalian 116024)

Abstract A study on the coverage of GPS satellites and positioning accuracy at a fixed point was carried on in Dalian Fisheries College. The result shows that the GPS satellites' 2D and 3D daily positioning time covers 82.8%—92.3% and 55.0%—74.3% of the 24 hours respectively. The GPS positioning accuracy at the fixed point was also analyzed by processing the data gained from the laboratory observation.

Key words navigation, GPS, positioning, coverage, accuracy