

# NNSS 和 GPS 的跟踪研究

蒋志凯\* 高音 孙德斌

(大连水产学院)

**摘 要** NNSS 和 GPS 是当今世界的两大卫星导航系统. 为掌握此二系统的发展趋向, 我们在大连水产学院导航实验室对它们进行了一系列的跟踪研究. 观测和数据处理的结果表明: (1) NNSS 的卫星总数从 1992 年 3~4 月的 7 颗降为 1994 年 4 月的 6 颗, 更新定位的平均间隔时间则从原来的 51.06 min 增为 60.68 min. (2) GPS 的卫星总数从 1991 年 5 月的 15 颗增至 1994 年 4 月的 19 颗, 每天可进行二维和三维定位的时间则分别从占全天 24 h 的 82.8%~92.3% 和 55.0%~74.3% 变为可全天 24 h 连续进行二维和三维定位. (3) 由于美国政府已对 GPS 工作卫星实施 SA, GPS 的水平定点定位精度已从 1991 年 5 月的 14.72 m (95%) 降为 1994 年 4 月的 73.87 m (95%). (4) NNSS 无疑将最终被 GPS 所淘汰, 但被淘汰的具体时间有待进一步观测.

**关键词** 卫星导航; NNSS; GPS

**中图分类号** U666

NNSS (Navy Navigation Satellite System) 是美国海军和约翰斯·霍普金斯 (Johns Hopkins) 大学应用物理实验室在 1958~1963 年期间研制的世界上第一个卫星导航系统, 1964 年正式投入使用 (主要为美国海军服务), 1967 年向民用用户开放<sup>[1,2]</sup>.

由于 NNSS 有不能连续定位和只能进行二维定位的缺点, 美国军方又于 1973 年开始研制第二代卫星导航系统 GPS (Global Positioning System)<sup>[3]</sup>. 尽管目前 GPS 的计划中卫星尚未全部升空, 但美国政府已宣布, 一旦 GPS 完善后, 将关闭 NNSS.

为了了解这两大卫星导航系统的现状和发展趋向, 我们对它们进行了一系列的跟踪研究.

## 1 对 NNSS 的跟踪研究

### 1.1 对 NNSS 的第一次观测

#### 1.1.1 实验条件与方法

为了解 NNSS 的工作情况, 我们于 1992 年 3 月 30 日世界时 00:00 到 4 月 4 日世界时 00:00 在大连水产学院实验楼的导航实验室 (纬度 38°52.04' N, 经度 121°33.55' E)

收稿日期: 1994-10-05

\* 蒋志凯: 1942 年生, 男, 教授, 大连 116024

利用两台日本古野 (Furuno) 公司生产的 FSN-70 单频道 NNSS 导航仪对 NNSS 卫星进行了连续 5 昼夜 (120 h) 的定位观测. 天线安装在实验楼的楼顶, 天线高度 39 m. 初始输入数据为: 纬度  $38^{\circ}52' N$ , 经度  $121^{\circ}33' E$ , 天线高度 39 m, 航向和航速均取 0.

### 1.1.2 所观测到的卫星及覆盖情况

经过 5 昼夜的观测, 共观测到 NNSS 卫星 7 颗, 它们分别是 30200、30230、30270、30310、30320、30490 和 30500.

在此 120 h 的连续观测中, 共取点 170 个. 其中, 更新定位 141 个. 平均每天更新定位 28.2 次, 两次更新定位的平均间隔时间为 51.06 min. 由此可看出 NNSS 卫星的覆盖情况和定位的不连续程度.

### 1.1.3 数据处理结果与分析

1) 用计算机对 NNSS 二维定位的经、纬度数据进行处理, 可得到表 1 所示的结果.

表 1 NNSS 第一次观测的经、纬度数据处理结果

机号	$\varphi_m$	$\lambda_m$	$\sigma_{\varphi}$	$\sigma_{\lambda}$	$M_{95\varphi}/m$	$M_{95\lambda}/m$	$R_{95}/m$
1	$38^{\circ}52.0834' N$	$121^{\circ}32.9678' E$	0.0879'	0.2440'	319.1	689.1	759.4
2	$38^{\circ}52.0739' N$	$121^{\circ}32.9502' E$	0.0980'	0.2179'	355.3	615.2	710.3

表 1 中:  $\varphi_m$  和  $\lambda_m$  分别为实测纬度和经度的均值;  $\sigma_{\varphi}$  和  $\sigma_{\lambda}$  分别为实测纬度和经度的标准偏差;  $M_{95\varphi}$  和  $M_{95\lambda}$  分别为实测纬度和经度的 95% 或然区;  $R_{95}$  为二维定位的 95% 或然圆半径.

从表 1 的结果可知, 两台同型号的 NNSS 导航仪同时、同地 (只是天线位置相差 2 m) 利用同一颗 NNSS 卫星定位, 所得到的经、纬度的均值间均存在一定的差值, 在当地纬度上可算出其平均位置相差约 36.2 m. 此外, 其或然圆半径也相差 49.1 m. 这说明用户设备本身会引入一定的定位误差. 其来源主要有: 本机基准振荡器的不稳定性、与多普勒计数有关的各种误差和机内噪声等. 此外, 机内计算机在进行定位计算时也会产生计算误差<sup>[4]</sup>.

2) 为了研究卫星对定位精度的影响, 我们又分别列出了利用各颗卫星定位的数据处理结果, 如表 2 所示. 表 2 中所用的原始实测数据均取自 2 号机, 以排除因用户设备不同所引入的误差.

由表 2 所示结果可知, 当利用不同的 NNSS 卫星定位时, 其误差散布程度不同. 其中, 30200 号卫星的定位误差散布最小, 而 30230 号卫星的定位误差散布最大. 但这并不全是卫星本身的原因, 而与卫星通过的最大仰角有关.

3) 为了研究卫星通过的最大仰角对定位精度的影响, 我们还列出了表 3.

由表 3 可见, 卫星通过的最大仰角在  $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$  之间, 定位误差的散布最小. 仰角过大或过小, 定位误差的散布就明显增大. 其原因是: 仰角过大, 相邻的距离差等值回转双曲面与地球表面的交线间的交角太小. 仰角过小, 卫星信号穿过电离层、对流层的距离

表 2 利用不同卫星定位的数据处理结果

星号	$\varphi_m$	$\lambda_m$	$\sigma_\varphi$	$\sigma_\lambda$	$M_{95\varphi}/m$	$M_{95\lambda}/m$	$R_{95}/m$
30200	38°52.1118'N	121°32.9400'E	0.1009'	0.0803'	365.99	289.89	466.88
30230	38°52.0775'N	121°32.0045'E	0.0378'	0.2367'	137.06	854.67	865.79
30270	38°52.0783'N	121°32.9167'E	0.0680'	0.1982'	246.72	715.52	756.86
30310	38°52.0465'N	121°32.9630'E	0.1435'	0.1555'	520.28	561.22	765.25
30320	38°52.0705'N	121°32.9556'E	0.0967'	0.1704'	350.58	626.20	717.66
30490	38°52.0724'N	121°32.9629'E	0.0909'	0.1920'	329.58	693.38	767.73
30500	38°52.0705'N	121°32.9068'E	0.0461'	0.2132'	167.18	769.95	787.84

表 3 不同最大仰角时的定位数据处理结果

仰角 (°)	$\varphi_m$	$\lambda_m$	$\sigma_\varphi$	$\sigma_\lambda$	$M_{95\varphi}/m$	$M_{95\lambda}/m$	$R_{95}/m$
0~10	38°52.0362'N	121°33.0313'E	0.2373'	0.1922'	819.73	958.96	1261.57
10~20	38°52.0972'N	121°32.9606'E	0.1278'	0.1798'	581.41	881.92	1056.33
20~30	38°52.0816'N	121°32.9392'E	0.1691'	0.1691'	321.61	658.54	732.87
30~40	38°52.0595'N	121°32.9170'E	0.1387'	0.1387'	173.32	528.69	556.37
40~50	38°52.0629'N	121°32.9636'E	0.2447'	0.2447'	118.25	487.72	501.85
50~60	38°52.0653'N	121°32.9960'E	0.1277'	0.1277'	133.05	570.04	585.33
60~70	38°52.0527'N	121°32.9381'E	0.1528'	0.1528'	142.21	694.93	709.34
70~80	38°52.0350'N	121°32.8500'E	0.0111'	0.2076'	184.25	900.07	918.75
80~90	38°52.9711'N	121°33.1111'E	0.0881'	0.2980'	384.18	1123.46	1187.33

增大，使附加多普勒频移引入的误差加大。此外，仰角过小还将使卫星一次通过用户视界的持续时间缩短。当采用最小二乘法对实测值进行平滑时，其效果也较差。

1.2 对 NNSS 的第二次观测

1.2.1 实验条件与方法

为了对 NNSS 的工作现状进行跟踪研究，我们于 1994 年 4 月 3 日世界时 00：00 至 4 月 7 日世界时 03：13 在大连水产学院导航实验室对 NNSS 卫星又进行了一次连续 99 h 13 min 的观测。此次观测仅用一台 FSN—70 单频道 NNSS 导航仪。天线位置和高度与第一次观测相同。初始输入数据亦同第一次观测。

1.2.2 所观测到的卫星及覆盖情况

此次共观测到 6 颗 NNSS 卫星。它们分别是：30200、30230、30250、30270、30310 和 30490。与两年前的第一次观测相比，少了 30320 和 30500，但新增了一颗 30250。这说明：NNSS 的卫星总数虽然少了一颗，但美国至今仍未完全放弃对该系统的维护保养。

在这次连续 99 h 13 min 的观测中，共取点 115 个。其中，更新定位点 98 个。平均每天更新定位 23.73 次，两次更新定位的平均间隔时间为 60.68 min。由此可见，NNSS 卫星的覆盖率比两年前已略有降低（少了一颗卫星），定位的不连续程度也有所加重。

1.2.3 数据处理结果与分析

1) 用计算机对第二次观测时 NNSS 定位的经、纬度数据进行处理，得到表 4 所示的结果。

表 4 NNSS 第二次观测的经、纬度数据处理结果

$\varphi_m$	$\lambda_m$	$\sigma_\varphi$	$\sigma_\lambda$	$M_{95\varphi}/\text{m}$	$M_{95\lambda}/\text{m}$	$R_{95}/\text{m}$
38°51.9428'N	121°32.9948'E	0.2403'	0.1919'	871.74	541.93	1026.46

与表 1 作一比较，可以发现此次观测的 95%或然圆半径比上一次观测时增大了许多。我们一开始曾怀疑 NNSS 卫星工作不正常，但经仔细检查，发现了以下 5 个奇异点，它们分别出现在：

4 月 3 日 11 : 37	30310	$ELV = 89^\circ$
4 月 3 日 20 : 46	30310	$ELV = 02^\circ$
4 月 4 日 16 : 00	30230	$ELV = 88^\circ$
4 月 4 日 20 : 00	30200	$ELV = 02^\circ$
4 月 6 日 20 : 48	30250	$ELV = 04^\circ$

由此可见，这 5 个奇异点的出现并不是因为卫星工作不正常，而是因为仰角（ $ELV$ ）过小。剔除这 5 个奇异点后的经、纬度数据处理结果如表 5 所示。

表 5 NNSS 第二次观测的经、纬度数据处理结果

$\varphi_m$	$\lambda_m$	$\sigma_\varphi$	$\sigma_\lambda$	$M_{95\varphi}/\text{m}$	$M_{95\lambda}/\text{m}$	$R_{95}/\text{m}$
38°52.0661'N	121°32.9734'E	0.1062'	0.1104'	385.29	310.92	495.10

1) 表 5 为剔除 5 个奇异点后的数据处理结果

2 对 GPS 的跟踪研究

2.1 对 GPS 的第一次观测

2.1.1 实验条件与方法

为了解 GPS 的工作情况，我们于 1991 年 5 月 10 日世界时 00 : 00 至 5 月 17 日世界时 00 : 00 在大连水产学院导航实验室用美国马格 (Magnavox) 公司生产的 MX4400 单频双通道 C/A 码 GPS 导航仪对 GPS 的卫星覆盖和定点定位精度进行了连续 168 h 的昼夜观测。天线安装在实验楼楼顶，天线高度 39 m。

初始输入数据为：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°, 各种航海数据均取 0.

所采集的数据分打印机打印数据与手工记录数据两类. 前者有: \$GPGDP (经纬度), \$GPGGA (导航卫星数), \$GPZDA (世界时时间) 和 \$CPMVXGP (天线高度). 后者有: 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. 采用等时间间隔采样法. 因手工记录数据较多, 采样时间间隔取作 10 min.

2.1.2 卫星覆盖情况的观测结果与分析

在连续 168 h 的观测中, 我们所观测到的 GPS 卫星共有 15 颗. 它们的星号分别是: 2, 3, 6, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 和 23. 这与海军大连舰艇学院<sup>①</sup>1987 年 4 月 17~18 日观测到 6 颗卫星和 1988 年 3 月 4 日观测到 7 颗卫星时的情况相比, 卫星总数已有明显增加.

舰艇学院 1987 年 4 月的观测证明 GPS 卫星在大连地区每天至少有 3 星覆盖的时间为 9.3~10 h; 1988 年 3 月的观测证明每天至少有 4 星覆盖的时间为 5 h. 我们这次观测的结果是: GPS 卫星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%, 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%.

由此可见, 随着计划中的 GPS 卫星不断升空, 3 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.

2.1.3 定点定位数据的处理结果与分析

为了便于对 GPS 卫星的二维和三维定点定位精度进行分析并与 NNSS 进行比较, 我们采用对经、纬度数据和高度数据分别进行处理的方法. 其数据处理结果如表 6 和表 7 所示.

表 6 GPS 第一次观测的经、纬度数据处理结果

$\varphi_m$	$\lambda_m$	$\sigma_\varphi$	$\sigma_\lambda$	$M_{95\varphi}/m$	$M_{95\lambda}/m$	$R_{95}/m$
38°52.0598'N	121°32.9327'E	0.0028'	0.0036'	10.31	10.51	14.72

表 7 GPS 第一次观测的高度数据处理结果

$H_m/m$	$\sigma_H/m$	$M_{95H}/m$
52.06	11.27	22.54

由于 NNSS 只能进行二维定位, 而 GPS 既可进行二维定位, 也可进行三维定位, 因此 GPS 明显优于 NNSS. 将表 6 与表 1 或表 5 作一比较, 可看出就二维定位而言, GPS 的定位精度也远远优于 NNSS.

需要讨论的另一个问题是: 美国官方在 1990 年 12 月公布的联邦无线电导航计划中宣称, GPS 在实施人为降低 C/A 码定位精度的选择可用性 (SA) 后, 其标准定位服务

① 海军大连舰艇学院. GPS 卫导接收机的应用和论证报告, 1988.

(SPS) 的水平定位精度将从原来的 20 m ( $2\sigma$ ) 降为 100 m ( $2\sigma$ )。其实, 早在 1989 年 10 月, 美国就让在轨 GPS 卫星中止向用户发射信号两周, 利用这段时间在 GPS 的 Block I 工作卫星上进行了 SA 的  $\delta$  技术的在星试验。1990 年 3 月 25 日~8 月 29 日, 除继续进行 SA 的  $\delta$  技术的在星试验外, 还进行了  $\epsilon$  技术的在星试验<sup>①</sup>。我们这次对 GPS 卫星进行观测的目的之一, 也是想看看美国是否已经在对 GPS 工作卫星实施 SA, 并检验其实施后的 C/A 码定位精度。

由表 6 所示的数据处理结果判断, 在我们这次连续 7 昼夜 (1991 年 5 月 10 日~17 日) 的观测期间, 美国并未对 GPS 工作卫星实施 SA。

经查阅有关资料<sup>②</sup>, 证实了我们的上述论断。美国国防部自 1990 年 8 月 29 日停止对 GPS 工作卫星进行 SA 试验后, 直到 1991 年 7 月 1 日才又重新正式对 GPS 工作卫星实施 SA。在 1990 年 8 月 29 日~1991 年 6 月 30 日这段时间内, 美、伊之间爆发了海湾战争。由于美军和多国部队在这次战争中使用了很多的 GPS C/A 码导航仪, 因此美国推迟了对 GPS 工作卫星实施 SA 的时间。

## 2.2 对 GPS 的第二次观测

### 2.2.1 实验条件与方法

为了对 GPS 的发展现状进行跟踪研究, 我们于 1994 年 4 月 3 日世界时 00:00 至 4 月 7 日 03:13 在大连水产学院导航实验室对 GPS 的卫星覆盖和定点定位精度又进行了第二次连续观测。用户设备仍采用 MX4400 单频双通道 GPS 导航仪, 天线安装位置仍与第一次观测时相同。初始输入数据除 HDOP 和 VDOP 分别取 3 外, 都与第一次观测时相同。

本次观测用与 GPS 导航仪接口的打印机打印的数据除上次观测时打印的 \$GPRMC, \$GPRGA 和 \$GPZDA 外, 又增加了 \$PMVXGP1 (精确系数), \$PMVXGP2 (卫星状态) 和 \$PM\$PMVXGPS (年、月、日), 而原打印的 \$CPMVXGP (天线高度) 不再打印。手工记录的数据除上次观测时记录的卫星星号, 卫星仰角和卫星方位角之外, 还记录了卫星数和信噪比, 但对卫星升起和降落的时间不再作记录。数据的采集仍采用等时间间隔采样, 但采样间隔从上次的 10 min 缩短为 5 min。

### 2.2.2 卫星覆盖情况的观测结果与分析

在这次连续 99 h 13 min 的观测中, 我们所观测到的 GPS 卫星已增至 19 颗。与上一次观测相比, 新增了星号为 1, 4, 5, 7, 9, 22 和 24 的 7 颗卫星, 但原有的星号为 3, 11 和 13 的 3 颗卫星这次未观测到。

由于星座中的卫星总数比上次观测时净增 4 颗, GPS 卫星的覆盖情况已大为改善。就大连地区而言, 利用现有的 GPS 卫星已可实现全天不间断的二维和三维定位。

### 2.2.3 定点定位数据的处理结果与分析

与上次观测时类似, 我们仍采用对经、纬度数据和高度数据分别进行处理的方法, 得到表 8 和表 9 所示的结果。

① 刘基余. GPS 工作卫星的 SA 技术. 导航, 1991 (4): 116~117.

② 刘基余. 测地型 GPS 接收机的现况和发展. 导航, 1992 (4): 175.

表 8 GPS 第二次观测的经、纬度数据处理结果

日期	$\varphi_m$	$\lambda_m$	$\sigma_\varphi$	$\sigma_\lambda$	$M_{95\varphi}/m$	$M_{95\lambda}/m$	$R_{95}/m$
4 日	38°52.0633'N	121°32.9280'E	0.0153'	0.0165'	56.58	47.67	73.98
6 日	38°52.0628'N	121°32.9337'E	0.0154'	0.0163'	56.88	46.94	73.75

表 9 GPS 第二次观测的高度数据处理结果

日期	$H_m/m$	$\sigma_H/m$	$M_{95H}/m$
4 日	44.00	55.99	111.97
6 日	45.00	61.42	122.84

将本次观测的定点定位精度与上次观测的定点定位精度相比（即表 8 与表 6 相比），可以明显看出定位精度降低了很多。这正是美国对 GPS 工作卫星实施 SA 的结果。但是将表 8 与表 1 或表 5 相比可以看出，即使 GPS 的 C/A 码定位因实施 SA 而降精，其定位精度仍远远高于 NNSS 的定位精度。

3 结束语

- 1) 从我们对 NNSS 和 GPS 所作的一系列跟踪研究可以看出：NNSS 的工作卫星总数已有减少，其更新定位的平均间隔时间也相应加长；而 GPS 的工作卫星总数却在迅速增加，现已具备了三维连续定位的能力。
- 2) 由于 NNSS 不能连续定位和只能进行二维定位，加之其定位精度远远低于 GPS（即使在实施 SA 的情况下），因此不用等到 GPS 计划中卫星全部升空，只要 GPS 已具备三维连续定位的能力，NNSS 就失去了继续存在的意义。曾经有过这样一种说法：由于目前世界上已有许多船舶安装了 NNSS 导航仪，若全部更换损失太大，同时为防止美国在战时突然中止向国外用户提供 GPS 服务，国际海事组织（IMO）有可能将 NNSS 买下来，在对其改进后继续投入使用。我们认为，这种可能性是不存在的。NNSS 将逐渐被 GPS 所淘汰，这已是确定无疑的趋势。
- 3) 任何新旧事物的交替都有一个过渡阶段和并存期，GPS 和 NNSS 的交替也不例外。我们认为，这一并存期的长短取决于：① GPS 的发展速度和已达到的完善程度；② GPS 用户数量的增长速度和随之而来的用户设备价格的下降速度。至于已安装在船上的 NNSS 导航仪，只要它已失去实用价值，与其留而不用，就不如拆去节省空间。尽管国际民航组织（ICAO）在 1992 年举行的未来航行系统（FANS）会议上提出在 1995 年底前布满 GPS 卫星，约翰斯·霍普金斯大学应用物理实验室的 Danchid<sup>[2]</sup>，也指出 NNSS 将于 1996 年被淘汰，但这一具体交替过程和日期，还有待我们进一步观测。
- 4) 在对 GPS 的第二次观测中，我们发现美国已对 GPS 工作卫星实施了 SA 降精。为了对 SA 对定位精度的影响作进一步的研究，我们又于 1994 年 4 月 26 日世界时 20：

00~24:00 以较短的采样间隔(5 s)采集了2880个GPS定点定位数据,并分别绘出了纬度数据和经度数据随时间变化的曲线。在这方面,还有许多工作等待我们去做。

## 参 考 文 献

- 1 Appleyard S F. Marine electronic navigation. London: Routledge & Kegan Paul, 1980. 175~213
- 2 Danclick R J. Navy Navigation Satellite System Status. In: M Kayton ed. Navigation: Land, Sea, Air & Space. New York: IEEE Press, 1990. 207~210
- 3 钱天爵等. GPS 全球定位系统. 北京: 海军出版社, 1989. 1~3
- 4 言中等. 卫星无线电导航. 北京: 国防工业出版社, 1989. 104~105

## A Study Tracing the Development Trend of NNSS and GPS

Jiang Zhikai    Gao Yin    Sun Debin

(Dalian Fisheries College)

**Abstract** NNSS and GPS are two main satellite navigation systems in the world. A study tracing the development trend of the two systems has been carried out at the navigation laboratory of Dalian Fisheries College, and the observation and data processing results show were shown as follows:

1. The total number of NNSS satellites has been reduced from 7 (March-April, 1992) to 6 (April, 1994), and the mean update interval of positioning has been increased from 51.06 to 60.68 min.

2. The total number of GPS satellites has been increased from 15 (May, 1991) to 19 (April, 1994). At the first observation, the 2D and 3D daily positioning time covers 82.8%~92.3% and 55.0%~74.3% for the 24 hours respectively. At the second observation, GPS has been capable of full-time 2D and 3D continuous positioning.

3. Since the US government has carried out SA on the GPS working satellites, the C/A code horizontal positioning accuracy at a fixed point has been reduced from 14.72 m (95%, May, 1991) to 73.87 m (95%, April, 1994).

4. There is no doubt that NNSS will finally be phased out by GPS, and the exact date of phase-out needs further observation.

**Key words** satellite navigation; NNSS; GPS