

综述

GPS 和 GLONASS 兼容性研究进展

ADVANCES IN THE STUDY OF THE
COMPATIBILITY OF GPS AND GLONASS

蒋志凯

(大连水产学院, 116024)

Jiang Zhikai

(Dalian Fisheries College, 116024)

关键词 卫星导航, GPS, GLONASS**KEYWORDS** satellite navigation, GPS, GLONASS

1 两系统的发展概况与兼容问题的提出

1.1 GPS 发展概况

GPS 是美国军方继子午仪 (TRANSIT) 系统之后研制的又一个星基全球导航系统。其卫星轨道采用中轨道, 轨道高度约为 20180 km。按原方案共有 3 条升交点赤经分别相差 120° 的轨道, 轨道面倾角为 63° , 每条轨道上均匀分布 8 颗卫星, 最终由 24 颗卫星组成覆盖全球的星座 [言中等, 1989]。后计划调整, 改为设置 6 条升交点赤经分别相差 60° 的轨道, 轨道面倾角为 55° , 每条轨道上均匀分布 4 颗卫星, 星座卫星总数仍为 24 颗 (其中 3 颗为备份卫星)。GPS 的每颗工作卫星均以双频发射信号, 以便对电离层附加延时进行修正。其 L_1 频段的载频为 $f_1 = 1575.42$ MHz, L_2 频段的载频为 $f_2 = 1227.60$ MHz。信号采用伪码扩频技术, 并通过码分多址识别不同卫星的信号。所用伪码有民用 C/A 码和军用 P 码两种。其导航用户一般用伪距法定位。

该系统自 1978 年 2 月发射第一颗试验卫星以来, 经过十几年的发展, 正在进入全面实用阶段。海军大连舰艇学院 (1988) 于 1987 年 4 月和 1988 年 3 月分别对 GPS 卫星在大连地区覆盖时间进行的两次观察的结果表明: 1987 年 4 月可观测到的卫星有 6 颗, 每天至少有 3 颗卫星覆盖的时间为 9.3—10 h; 1988 年 3 月可观测到的卫星增至 7 颗, 每天至少有 3 颗卫星覆盖的时间约为 10.5 h, 至少有 4 颗卫星覆盖的时间约为 5 h。而作者 1991 年 5 月连续 7 昼夜的观测 [蒋志凯等, 1993] 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 颗卫星覆盖) 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 颗卫星覆盖) 的时间占全天 24 h

收稿日期: 1994-04-19。

(1) 海军大连舰艇学院, 1988. GPS 卫星接收机的应用和论证报告。

的55.0—74.3%。根据作者1994年4月连续5昼夜的观测,可观测到的卫星数已达19颗,且已具备全天三维连续定位的能力。根据美国GPS信息中心(GPSIC)最近公布的GPS布星计划,估计该导航系统在1995年底前即可全部完成。

1.2 GLONASS 发展概况

GLONASS 是前苏联在其 GLONASS 系统(与 TRANSIT 系统很相似)之后研制的又一个星基全球导航系统。其卫星轨道也属中轨,轨道高度约为19100 km。其轨道布设与GPS的原方案很相似,共有3条升交点赤经分别相差 120° 的轨道,轨道面倾角约为 64.8° ,每条轨道布8颗卫星,其最终的卫星星座也将由24颗卫星组成(刘钟玉,1989a)。GLONASS 的每颗工作卫星也以双频发射信号,但因其采用频分多址识别不同卫星的信号,故每颗卫星所发射的载频各不相同。信号也采用伪码扩频技术,所用伪码也分作C/A码和P码。与GPS类似,其导航用户一般也采用伪距法来定位。

GLONASS 的第一批试验卫星于1982年10月发射入轨,比GPS第一颗试验卫星的发射晚了四年多。此后,从1983年开始,每年都发射1—2个批次(每批次是在某一轨道面内同时发射3颗卫星)。英国利兹大学的P. Daly 教授等从1986年起就开始对GLONASS进行跟踪研究,并发表了一系列有重要价值的论文[Daly等,1986,1988,1990;Daly,1988;Daly等,1989a,1989b;Kitching等,1988;Lennen,1989]。直到1988年5月,前苏联才正式向国际民航组织(ICAO)和国际海事卫星组织(INMARSAT)提出将GLONASS的C/A码供国际上通用的申请。为此,前苏联在蒙特利尔召开的ICAO会议上公开了GLONASS C/A码的有关技术细节[Anodina,1988a,1988b]。根据GLONASS协调科学信息中心(GLONASS CSIC)提供的最新信息,俄国从1982年以来共发射了61颗GLONASS卫星。目前有14颗在轨卫星处于正常工作状态,但它们都是在1990年5月以后发射的。这说明GLONASS卫星的发射成功率和寿命都不如GPS卫星,但俄国防部正在组织研制新一代的GLONASS-M卫星,计划可于1994年升空(韩乃炎等,1993)。

苏联解体后,国际导航界一度曾对俄罗斯是否有能力继续发展GLONASS产生怀疑。但从目前掌握的信息来看,GLONASS的发展计划并没有停止。据参加1992年美国航空无线电委员会(RTCA)全球导航卫星系统(GNSS)特别工作组会议的俄代表团团长格罗莫夫介绍,俄官方仍希望在1995年底前全部完成GLONASS计划(韩乃炎等,1993)。

1.3 两系统兼容问题的提出

综上所述,GPS和GLONASS是美、俄两国分别研制的两个互相独立的全球卫星导航系统,而且都将在1995年底前后投入全面使用。

但是,值得注意的是,即使属于这两个独立系统计划中的卫星全部升空,它们的卫星覆盖仍将因视界可见卫星数有限而存在一定的问题。这可从时间覆盖和空间覆盖两方面来进行分析:1)从时间覆盖看,利用卫星定位需要一定数量的用户视界可见卫星(二维定位3颗,三维定位4颗)。为保证定位精度,所选用卫星的仰角一般应在 7.5° 以上,所选用星组的PDOP值一般不得超过6[Jorgensen,1987;Brown,1988;钱天爵等,1989]。因此,在单独利用GPS或GLONASS进行定位时,都有可能因满足上述要求的可见星数不足而无法正常定位的间隙时段。2)从空间覆盖看,两系统单独工作时在地球上都存在一定的未能覆盖的空白地带或性能降低区[Brown,1988;钱天爵等,1989;Green等,1989;Larkin,1990]。由于两系统的卫星在空间的分布情况不同,GPS对纬度 30° 以下的区域覆盖较好,而GLONASS对纬度 30° 以上的区域复盖较好。

由此可见,GPS和GLONASS单独工作时在覆盖性能上各有不足,而它们之间又存在一定的互补性。若能把这两个系统组合起来使用,就相当于在空间建立了一个由48颗卫星组成的混合星座。这不仅可使星座卫

(2)刘钟玉,1989a.苏联全球卫星导航系统(GLONASS)发展现状.导航,(2):21—26

(3)韩乃炎等,1993.加速开发利用GPS/GLONASS空间资源.1993年11月在宁波召开的'93'船舶通信导航学术交流会上交流。

星数增加一倍,而且还可使卫星的空间分布状况得到改善,从时间和空间两个方面同时提高卫星的覆盖率。此外,由于 GPS 和 GLONASS 的应用已涉及海陆空运动载体乃至人流的导航定位、授时、大地测量、石油勘探、地震监测等许多领域,因此卫星覆盖率的局部地域性降低也是一个必须解决的问题。例如,在山地、丛林或城市,卫星受到高山、树木或建筑物的严重遮挡,用户可视卫星数大大减少,这时只有增加卫星数才能进行导航定位。GPS 和 GLONASS 的组合使用,无疑是解决这一问题的有效途径。其实,即使对开阔的陆地、海洋和天空来说,两系统的组合使用也会带来很多好处。卫星数的加倍,使用户对可用卫星组有了更大的选择余地,并可通过选择最佳星组来降低 PDOP 值,提高定位精度。卫星数的加倍还可使用户得到足够多的冗余信息,从而采用自适应整体监控技术,改善高动态性能。

此外,值得注意的是 GPS 和 GLONASS 的定位精度及有关政策问题。根据美国官方 1990 年 12 月公布的联邦无线电导航计划, 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(SPS)的水平定位精度从原来的 20 m(2 σ)降为 100 m(2 σ)。国际民用导航界(包括美国的 GPS 生产厂家和用户)对美国政府的这一举措非常不满,并一直在多方寻求对策。俄国对 GLONASS 民用用户的政策则大不相同。俄方权威人士在 1991 年举行的导航学会国际会议上宣布:俄国不会人为降低 GLONASS C/A 码的定位精度,其水平定位精度可保证在 40 m(2 σ)以内(谢世富,1992)。据《美国航空周刊》1992 年 2 月 2 日报导,美国有关部门对 GLONASS 卫星连续 6 个月的观测表明,其水平定位精度一直保持在 20 m(2 σ)以内。此外, GLONASS 的授时精度也高于实施 SA 后的 GPS[Daly 等,1989b]。因此,目前国际民用导航界都希望能早日实现 GPS 与 GLONASS 的兼容,并以此作为对美国政府实施 SA 的对策之一。

2 GPS 和 GLONASS 的兼容性研究

2.1 信号结构的兼容性

GPS 和 GLONASS 的信号结构的设计方案非常相似,两者都是让基带数据先经伪码扩频,然后再对载波进行 BPSK 调制。但是,在载频、伪码和基带数据的具体设计上,它们又有所不同。下面分别进行分析,以期找出兼容方案。

2.1.1 载频

GPS 和 GLONASS 均采用双频发射。由于民用 C/A 码只调制在 L₁ 频段的载波上,故作者只对此载频进行分析。

GPS 采用码分多址,故其 24 颗卫星的发射载频均为 $f_1 = 1575.42$ MHz。GLONASS 采用频分多址,因此, 24 颗卫星的发射载频各不相同,它们满足如下关系式(萨利谢夫,1991 年汉译文)。

$$f_{1k} = f_{10} + k\Delta f_1 \quad (1)$$

式中, $f_{10} = 1602$ MHz; 载频间隔 $\Delta f_1 = 0.5625$ MHz; 载频识别符 $k = 1, 2, \dots, 24$ 与 GLONASS 的 24 颗卫星一一对应。

由于 GPS 和 GLONASS 的接收机部分均采用先让接收信号与本振信号混频得到一个中频后再作进一步处理的方案,因此,兼容的关键是要找到一个公共频率基准,经频率合成可同时提供 GPS 和 GLONASS 的接收机部分所需要的本振频率和其他频率。

1) 对 GPS

$$10 \text{ MHz} \times \frac{1023}{1000} = 10.23 \text{ MHz}$$

(4) 谢世富,1992。GPS 系统发展综述。导航,(4):52。

(5) 萨利谢夫(刘钟玉等译),1991。苏联全球卫星导航系统。导航,(2):3。

$$10.23 \text{ MHz} \times 154 = 1575.42 \text{ MHz}$$

将此频率经频率合成加上所要求的中频,即可得到 GPS 接收部分所需要的本振频率。

2)对 GLONASS 将 f_{10} 和 Δf_1 值代入(1)式,可得

$$f_{1k} = 1602 + 0.5625 k = 0.5625 \times (2849 + k) (\text{MHz})$$

而

$$10 \text{ MHz} \times \frac{63}{1120} = 0.5625 \text{ MHz}$$

由此不难得到 GLONASS 接收部分所需要的24种本振频率。

由此可见,兼容机的公共频率基准可采用一个10 MHz 的基准振荡器。

此外,由于 GPS 和 GLONASS 的载波最大相对频偏为

$$\frac{1615.50 - 1575.42}{1615.50} = 2.48\%$$

且两种载波皆为右旋圆极化波,所以兼容机可公用一个天线和一个低噪声前置放大器。公用天线应对两种信号都具有良好的电压驻波比。公用低噪声前置放大器中则可增设一个宽带预选滤波器,以便把最大相对频偏为2.48%的两种信号都包容进来。

2.1.2 伪码

GPS 的 C/A 码采用 Gold 码,码率1.023 Mbit/s,周期1 ms。GLONASS 的 C/A 码采用 M 序列伪随机码,码率0.511 Mbit/s,周期也是1 ms。

为了分别对 GPS 和 GLONASS 信号解扩,在兼容机中也必须由公共的10 MHz 频率基准经频率合成成分别产生1.023 MHz 和0.511 MHz 两种频率。这可按如下方案来实现:

1)对 GPS

$$10.23 \text{ MHz} \times \frac{1}{10} = 1.023 \text{ MHz}$$

2)对 GLONASS

$$0.5625 \text{ MHz} \times \frac{1022}{1125} = 0.511 \text{ MHz}$$

由于两种 C/A 码的周期均为1 ms,故在兼容机中可用大致相同的程序进行位同步。

2.1.3 基带数据

GPS 和 GLONASS 的基带数据都是用来传送导航电文的,并都采用超帧、帧、子帧的形式,数据流码率均为50 bit/s。译码时所需的50 Hz 同步信号,可由上述10 MHz 基准振荡器的输出经 $\frac{1}{2} \times 10^{-5}$ 分频得到。

但是,GPS 和 GLONASS 的基带数据又存在较大差异[Eastwood,1990],必须认真对待。例如,GPS 的基带数据采用的是不归零的二进制码,而 GLONASS 的基带数据则采用 Manchester 编码。它们虽然都以超帧、帧、子帧的形式播送导航电文,但超帧、帧、子帧所占用的时间互不相同。在校验位的格式上,两者也有较大差别。因此,在兼容机中必须用不同的信号处理器分别处理。

此外,GPS 和 GLONASS 在基带所传送的星历数据的含义也不相同(邹世开等,1992)。GPS 星历是用卫星的6个开普勒轨道参数来表示的,而 GLONASS 星历用的却是卫星在地心直角坐标系中的位置 X、Y、Z 及它们对时间的一阶导数。因此,在兼容机中虽可用同一台导航计算机进行定位计算,但必须设计不同的子程序。

2.2 时间基准的兼容性

利用导航卫星定位,离不开时间基准的选取。巴黎国际时间局(BIH)采用国际原子时(IAT)作为时间基准,但国际原子时与平太阳日之间仍有0.0015 s 之差(刘钟玉,1989b)。为使两者同步,于是就产生了世界协调

时(UTC)。UTC的定义是其秒长严格等于 ITA 的秒长,然后采用一整秒的调整,使 UTC 时刻与 IAT 时刻之差保持在 $\pm 0.9\text{ s}$ 之内(苗履丰,1990)。由于各国多年来一直是根据自己的原子频标计算 UTC 时间的,故不同的国家和地区算出的 UTC 时间并不完全相同。例如,美国海军天文台用其主钟算出的 UTC(USNO)就与原苏联用莫斯科主钟算出的 UTC(SU)不同。

GPS 和 GLONASS 分别以各自的系统时作为导航定位计算的时间基准。GPS 系统时与 UTC(USNO)比对, GLONASS 系统时与 UTC(SU)比对。虽然 GPS 导航电文中给出了其星钟相对于 GPS 系统时的偏差和 GPS 系统与 UTC(USNO)的偏差, GLONASS 导航电文中也给出了其星钟相对于 GLONASS 系统时的偏差和 GLONASS 系统时与 UTC(SU)的偏差,但 GPS 系统时与 GLONASS 系统时之间的偏差却无从得知(偏差可达 $20\text{--}30\ \mu\text{s}$)。如果不能在任一时刻提供这一随时间变化的偏差值,两系统时之间就没有一个统一的时间基准,利用混合星座定位就无法实现。

解决这个问题的办法是采用增元法,即:除了按一般伪距法把用户钟与 GPS 系统时的钟差 Δt_1 作为一个待求变量外,把用户钟与 GLONASS 系统时的钟差 Δt_2 也作为一个待求变量。由于待求变量增加了一个,故选用星数也必须增加一个。因为兼容机中公用一个用户钟,因此,只要求得了 Δt_1 和 Δt_2 ,即可求得两系统时之间的偏差,从而把时间基准统一起来。由于采用增元法多用了一颗卫星,因此,必须采用适当的选星算法来保证足够小的 GDOP 值。

2.3 参考坐标系的兼容性

GPS 和 GLONASS 都是用各自的参考坐标系来定义其卫星和用户在不同时刻的空间位置的。GPS 采用 1984 年世界大地测量坐标系(WGS-84), GLONASS 采用 1985 年前苏联地心坐标系(SGS-85)。

为了使兼容机中的导航计算机能同时对来自 GPS 卫星和 GLONASS 卫星的导航数据进行统一处理,不仅必须建立一个统一的时间基准,而且还必须建立一个统一的空间坐标基准。由于 GPS 比 GLONASS 成熟,用户也多得多,因此,用 WGS-84 作为公共坐标基准是合理的。兼容机收到来自 GLONASS 卫星的导航数据后,先将其转换成用 WGS-84 坐标表示的数据,然后再在导航计算机中统一处理。

Chamberlain(1992 年编译文)指出,参考坐标系的转换可采用 Bursa-Wolf 公式

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + (1 + S) \begin{bmatrix} 1 & -\theta_x & \theta_y \\ \theta_x & 1 & -\theta_x \\ -\theta_y & \theta_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

这是一个七参数转换公式。式中: x_1, y_1, z_1 为待变换的 SGS-85 坐标位置; x_2, y_2, z_2 为变换后的 WGS-84 坐标位置。所用到的 7 个参数是:两坐标系原点之间的平移参数 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$;两坐标系坐标轴之间的旋转参数 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$;两坐标系之间的尺度变化参数 S。

由于 WGS-84 和 SGS-85 都是地心直角坐标系,坐标轴指向基本相同,只是坐标原点间存在 $10\text{--}15\text{ m}$ 的偏差(何河通,1992),因此,作者认为可采用简化的三参数转换公式,仅考虑两坐标系原点之间的平移参数。此时,(2)式可简化成

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

韩乃炎(1993)在赴美考察时获悉,俄国即将采用新的 SGS-90 坐标系。因为 SGS-90 与 WGS-84 非常接近,届时

(7)刘钟玉,1989b. GLONASS 卫星导航电文. 导航, (4):79-80.

(8)苗履丰,1990. GPS 卫星全球导航定位系统的时间系统、参考坐标及卫星星历. 导航, (1):31-32.

(9)Chamberlain, S. M. (周保军编译),1992. 组合 GPS/GLONASS 的数据处理. 导航, (2):101-108.

(10)何河通,1992. 中国“智宝科技代表团”赴苏考察专题报告:苏联全球导航卫星系统的状况.

两坐标不经转换也可基本兼容。

3 GPS 和 GLONASS 组合使用的效果及前景

由于 GPS 和 GLONASS 的计划卫星即将全部升空并提供全面服务,两系统空间资源的共享问题已越来越引起人们的普遍关注。为了全球卫星导航技术的进一步发展,美、俄、英、德等国的有关机构早在八十年代末就已开始认真探讨两系统组合使用的可能性,并着手兼容型或组合型接收机的研制工作。

为了检验 GPS/GLONASS 组合使用的效果,Chamberlain 等(1992年编译文)于1991年1月4日在美国 Magnavox 公司对他们研制的 GPS/GLONASS 组合机进行了覆盖试验、定位试验和动态响应试验。试验结果表明:两系统的组合使用不仅可提高卫星覆盖率,而且可提高定位精度。

目前,研制 GPS/GLONASS 兼容机的机构已有很多,如:美国的斯坦福大学、麻省理工学院的林肯实验室、3S Navigation 公司、Trimble 公司、JCAIR 公司和俄国的宇航设备工程研究所等。其中,3S 公司已有 C/A 码的 R-100 和 P 码的 R-101 兼容机出售。JCAIR 公司和斯坦福大学都有 GPS-GLONASS 模拟器出售。Ashtech 公司还在莫斯科建立了研制 GPS/GLONASS 兼容机的分支机构。

1992年,国际民航组织(ICAO)在未来航行系统(FANS)会议上提出了分阶段建立全球导航卫星系统(GNSS)的完整计划。其中第一阶段的任务就是在1995年底前布满 GPS 和 GLONASS 卫星,并建立第三代国际海事卫星 INMARSAT-Ⅲ 对 GPS 和 GLONASS 的静止卫星重迭[Kinal,1990]。可以预见,GPS/GLONASS 的组合使用将在2000年后全球卫星导航中独领风骚。

参 考 文 献

- [1] 言 中等,1989.卫星无线电导航,155-200.国防工业出版社(京)。
- [2] 钱天爵等,1989.GPS 全球定位系统,88-89.海军出版社(京)。
- [3] 蒋志凯等,1993.GPS 卫星覆盖及定点定位精度的研究.大连水产学院学报,8(1):52-55。
- [4] Anodina, T. G., 1988a. The GLONASS system technical characteristics and performance. A working paper for the Special Committee on Future Air Navigation Systems (FANS/4) of the International Civil Aviation Organisation (ICAO), Montreal.
- [5] ——, 1988b. Provision of information on navigation satellite failures. Presentation to the Special Committee on Future Air Navigation Systems (FANS) of the ICAO, Montreal.
- [6] Brown, A. K., 1988. Civil aviation integrity requirements for the Global Positioning System. *Navigation*, 35(1):25-26.
- [7] Dale, S. A. *et al.*, 1986. Recent observations on the Soviet Union's GLONASS navigation satellites, 20-25. IEEE Plans'86 (Position, Location & Navigation Symposium), Las Vegas.
- [8] Dale, S. A. *et al.*, 1988. Development in interpretation of the GLONASS navigation satellite data structure, 292-297. IEEE Naecon'88 Symposium, Dayton.
- [9] Dale, S. A. *et al.*, 1990. Position - fixing using the USSR's GLONASS C/A code, 139-145. In M. Kayton(ed): *Navigation: Land, Sea, Air & Space*. IEEE Press, New York.
- [10] Dale, P., 1988. Aspects of the Soviet Union's GLONASS satellite navigation system. *Navigation*, 41(2):186-198.
- [11] Daly, P. *et al.*, 1989a. GLONASS C/A code signals - status & developments, 53-60. Proceedings of the 2nd International Meeting of the ION Satellite Division, Colorado Springs.
- [12] ——, 1989b. Progress in transferring time using GLONASS satellites. *Precise Time and Time Interval (PTTI)*

(11)韩乃炎等,1993.见本文脚注(3)。

(12)Chamberlain,S. M. (周保军编译),1992.见本文脚注(10)。

- Application and Planning Meeting, Redondo Beach.
- [13] Eastwood, R. A., 1990. An integrated GPS/GLONASS receiver, 37-43. Proceedings of National Technical Meeting of the ION, San Diego.
 - [14] Green, G. B. *et al.*, 1989. The GPS 21 primary satellite constellation. *Navigation*, **36**(1):11-18.
 - [15] Jorgensen, P., 1987. Achieving GPS integrity and eliminating areas of degraded performance. *Navigation*, **34**(4): 297-306.
 - [16] Kinal, G. V. *et al.*, 1990. An international geostationary overlay for GPS and GLONASS. *Navigation*, **37**(1):81-93.
 - [17] Kitching, I. D. *et al.*, 1988. Potential for a unified GLONASS/NAVSTAR civil navigation system. The 4th IEE International Conference on Satellite Systems for Mobile Communications and navigation, London.
 - [18] Larkin, T. M., 1990. GPS status and plans + status of space and operations segments, 7-8. Proceedings of the National Technical Meeting of the ION, San Diego.
 - [19] Lennen, G. R., 1989. The USSR's GLONASS P - code determination and initial results, 77-86. Proceedings of the 2nd International Meeting of the ION Satellite Division, Colorado Springs.