

组合 GPS 和 GLONASS 在民航中应用的研究

刘 晖 李小民 王银锋 张其善
(北京航空航天大学 202 教研室, 北京, 100083)

APPLICATION OF COMBINED GPS AND GLONASS IN CIVIL AVIATION

Liu Hui, Li Xiaomin, Wang Yinfeng, Zhang Qishan

(Faculty 202, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

摘 要 研究了 GPS 和 GLONASS 在民用航空中的应用前景。分析了组合 GPS 和 GLONASS 所具备的可用性、精确性和完整性潜力。组合 GPS/GLONASS 在我国民航中具有重要的技术与战略意义。提出了一种集成 12 通道 GPS/GLONASS 接收机的结构与实现。射频前端部分采用 3 级变频将 GPS 和 GLONASS 信号变至中频并采样为同相与正交样本。数字处理部分对各样本加以积累与处理,解调卫星的导航电文。在导航解算中结合了 WGS-84 和 PZ-90 坐标系之间的转换。

关键词 接收机 民航 导航 GPS GLONASS

中图分类号 V249.3

Abstract The application prospect of combined GPS/GLONASS in civil aviation is researched. The potential of combined GPS/GLONASS in the availability, accuracy and integrity of civil aviation is analysed. The structure of a twelve-channel integrated GPS/GLONASS receiver is proposed. Triple down-conversion is adopted in the receiver's RF front-end to convert GPS and GLONASS RF to IF. The IF signal is sampled to In-phase and Quadrature samples. They are accumulated and processed in digital part and the navigation message is demodulated. The transformation of WGS-84 and PZ-90 is incorporated into the solution of GPS/GLONASS navigation.

Key words receiver, civil aviation, navigation, GPS, GLONASS

现存的全球导航卫星系统有 2 个:

美国的 GPS 全球定位系统和俄罗斯的 GLONASS 系统。它们能够在任何时候、任何天气条件下,为全球范围内无限数目的用户提供精确的实时定位服务。

GPS 和 GLONASS 系统具有很多相似性,它们的主要区别在于:GPS 采用频分多址而 GLONASS 采用码分多址;GPS 采用了人为降低精度的 SA 技术而 GLONASS 没有。GPS 和 GLONASS 的主要特性比较如表 1 所

表 1 GPS 和 GLONASS 比较

| | GPS | GLONASS |
|----------|----------------------------|--|
| 轨道数 | 6 | 3 |
| 轨道倾角/(°) | 55 | 64.8 |
| 轨道半径/km | 26,560 | 25,510 |
| 载波频率/MHz | L1: 1575.42 L2: 1227.60 | L1: (1602+ 0.5625n) L2: (1246+ 0.4375n) n= 1, 2, ..., 24 |
| 信号分割方式 | CDMA | FDMA |
| 码频率/MHz | C/A 码: 1.023 P 码: 10.23 | C/A 码: 0.511 P 码: 1.023 |
| 坐标系统 | WGS-84 | PZ-90 |
| 时间系统 | UTC(USNO) | UTC(SU) |

示。

1 组合 GPS 和 GLONASS 的性能分析

GPS 和 GLONASS 是完全独立的卫星导航系统,当满星座运行时,它们所能提供的定位能力相当。对国际民航用户来说,使用这 2 个独立系统的好处是,卫星数目加倍,冗余信息增多。从 1988 年开始,MIT 林肯实验室对 GLONASS 系统进行追踪,研究表明,单 GPS 和 GLONASS 虽然不能够满足民航的要求,组合两个系统却能够取长补短,提供远好于单一系统的性能。本节给出的性能比较是以他们的分析为基础的。

(1) 可用性 图 1 给出了 21 颗 GPS 卫星和 21 颗 GLONASS 卫星情况下的可用性统计结果。图 1(a) 中,在单 GPS 或 GLONASS 星座下,会有少量用户看见少于 4 颗的卫星。而对于组合星座,所有的用户会看见 8 颗以上的卫星。图 1 (b) 中给出了水平几何因子 HDOP 的累计分布函数,它从整体上反映了定位估计的质量。说明了单 GPS 或 GLONASS,95% 的用户可以得到 $HDOP < 2$ 的星座分布,对 GPS+GLONASS 来说, $HDOP < 2$ 的几何分布对于地面每个用户都是可得的。

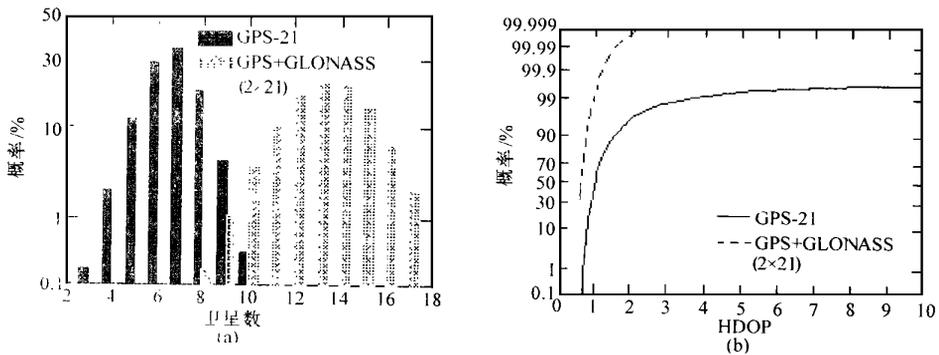


图 1 可用性统计结果

(a) 可见卫星数; (b) 水平精度因子(HDOP)

(2) 精确性 表 2 中给出了无 SA GPS、有 SA GPS、GLONASS 和组合 GPS/GLONASS 情况下的定位测量的观测结果。可以看出,未施加 SA 的 GPS 定位效果最好,而施加 SA 的 GPS 定位精度最差。GLONASS 的精度要优于有 SA 的 GPS。组合 GPS/GLONASS 定位取两家之长:GLONASS 提供更高的定位精度,GPS 提供更多的卫星数目。

表 2 GPS 和 GLONASS 定位精度

| | 水平误差/m | | 垂直误差/m |
|-----------------------|--------|-------|--------|
| | (50%) | (95%) | (95%) |
| GPS(无 SA) | 7 | 18 | 34 |
| GPS(有 SA) | 27 | 72 | 135 |
| GLONASS | 10 | 26 | 45 |
| GPS(有 SA)+ GLONASS | 9 | 20 | 38 |

(3) 完整性 进行完整性检查的方法之一是使用测量数据本身,即接收机自主完整性监测 RAIM(Receiver Autonomous Integrity Monitoring)。它的原理是在一组线性方程中,使用一个冗余方程检测出奇异方程,使用 2 个冗余方程分离出奇异方程。对于 GPS 或 GLONASS,由于三维定位要求使用 4 颗卫星,进行 RAIM 算法要求所有用户需要看见 6 颗

以上的卫星。组合 GPS/GLONASS 提供了充足的冗余信息。如果无 SA 干扰,结果会更好。在采用 RAIM 之后,GPS+GLONASS 可望能够满足航线、终端、和非精密进场阶段的唯一手段的要求。

2 组合 GPS 和 GLONASS 在我国民航中的应用前景

对 GPS 的研究表明,GPS 可用于航空运作的整个阶段,包括航线、终端、进场、着陆、还有进入跑道的检测。它的应用涉及座舱、自动交通控制(ATC)系统和许多地面设备。由于 GPS 的采用,可使机场容量增大,飞行间隔减小,安全性增强,并由于 GPS 不受天气影响,使原来由于能见度降低而导致的航班取消数、转航数减少。整个民航服务水平将会提高,各航空公司的财政收入也会大大增加。

虽然 GPS 具有应用于民航的巨大潜力,但 GPS 最初是为军事应用设计的,民航系统只能使用该系统的部分性能——SPS 服务。基本 SPS 信号本身还不能满足民航所有飞行阶段中完整性、可用性、和精度的要求,除大洋航线之外所有阶段都需进一步增强。利用 GLONASS 系统,可以使我们的可用信息加倍。从战略的意义上,组合 GPS 和 GLONASS 应用具有重要意义,即使有一个系统不能正常工作或提供假信息,仍有另一系统可以依靠。总之,组合系统将在各个飞行阶段提高单系统导航的性能,推动我国民航事业的发展。

目前国内对 GPS 的开发与应用已逐步展开,组合 GPS/GLONASS 研究也提到日程上来。与 GPS 相比,国内对 GLONASS 系统的研究相对甚少,针对这种情况,提出了一种集成多通道 GPS/GLONASS 接收机的方案与实现方法。研制的接收机采用集成 GPS 专用芯片,体积小,成本低,是在组合 GPS/GLONASS 研究领域的一个有益的探索。

3 集成多通道 GPS/GLONASS 接收机

由于 GPS 和 GLONASS 系统具有许多相似之处,为集成接收机的研制带来了方便。但 GPS 和 GLONASS 进行组合时仍有几个难题需要解决。GLONASS 为单码多频,对集成接收机的射频前端提出了较高的要求。另外 GPS 和 GLONASS 基于不同的参考系,参见表 1,在组合解算导航解时,坐标系和时间系的不同会带来一定的偏差。

(1) 射频与中频处理^[1] 在集成接收机中,前端处理要把微弱的射频信号转换为较强的中频信号,同时对带外干扰进行滤除。这通过 3 级放大、滤波和下变频实现。采用多级的原因是在多个频率点分配增益稳定性较好,且多级优化滤波可以提高接收机的抗干扰能力。

GPS 信号的 3 级下变频可以通过采用 GP2010 专用 GPS 前端芯片实现,以 10MHz 时钟驱动该芯片,其片内频率合成器产生 10MHz 时钟的 140 倍、14 倍和 28/9 倍,经过混频得到 4.31MHz 的 GPS IF 信号。

GLONASS L1 载波频率与 GPS 较为接近: $f_{\text{GLO}} = 1602 + 0.5625n$ (MHz), $n = 1, 2, \dots, 24$ 。GLONASS 也采用 3 级变频,将 24 个不同的载波分别变到中频。为了简化前端结构,将 GLONASS 前端设计为一次只有 3 个频率通过,24 个频率分 8 次通过。实现中也采用 GPS 前端芯片,通过改变驱动芯片的时钟频率,使得 GLONASS 射频信号经过 3 级变频之后,3 个 IF 信号的中间者落在 4.31MHz 频率之上,关系可见下式

其中: f_{GLO} 为 GLONASS 射频载波频率; f_{CLK} 为驱动前端芯片的时钟, 采用大规模集成锁相环频率合成器实现。

经过 3 级变频之后, GPS 和 GLONASS 模拟中频信号分别被采样和量化。采样时钟取 40/7MHz, 分为同相采样和正交采样 2 种。采样之后的中频信号进行 2 比特量化, 得到同相样本和正交样本。

(2) 数字信号处理部分 为了恢复卫星数据消息, 接收到的数字卫星中频信号必须被变频到基带并得以解扩。采用本地码发生器产生 GPS 和 GLONASS 的 C/A 码, 采用数控振荡器设定本地码频率(码 NCO)和本地载波频率(载波 NCO), 采用数字 Costas 环用于载波跟踪, 延迟锁相环用于码跟踪。

从前端采样得到的同相与正交样本分别在累加器中进行累加, 得到同相相关器输出 I 与正交相关器输出 Q, 累加时间为 1ms。如果考虑时序, 可以把当前时刻的样本设为 I_k, Q_k , 把前一时刻的样本设为 I_{k-1}, Q_{k-1} 。I, Q 值是接收机进行数字处理的基础。

1 码搜索与跟踪 延迟锁相环的工作原理是, 在接收机内部产生 GPS 和 GLONASS 的本地伪随机码, 本地码相对于卫星输入信号移动, 当本地码与输入信号近似匹配时, 信号能量 $I_k^2 + Q_k^2$ 值将超出阈值, 信号则被检测到, 称为实现相关。当相关实现后, 采用早-晚跟踪环路精确地实现对卫星码的跟踪。由于当卫星 C/A 码与本地码完全对齐时, 相关器输出最大, 故通过比较早晚相关器的峰值位置, 来确定如何移动本地码, 使本地码与卫星码完全对齐^[2]。

0 载波捕获与跟踪 载波捕获分两步进行。首先, 采用 4 相频率鉴相器把载波频差从几百赫兹拉到几赫兹, 然后, 采用二阶频率锁相环实现最后的捕获和跟踪。载波捕获与跟踪是通过 2 阶频率锁相环(FLL)实现的, 这种环路具有良好的动态特性。FLL 鉴相器的修正项通过计算连续同相与正交读数的叉积求得的

$$f_k = Q_k I_{k-1} - I_k Q_{k-1} \quad (2)$$

当载波环路锁定时, f_k 为零。

» 数据解调 数据解调在频率锁相环的跟踪中进行的。当输入载波信号与载波 NCO 的频差为几赫兹时, 在 FLL 环路解调出导航消息数据比特。设 I' 和 Q' 分别为

$$\left. \begin{aligned} I' &= I \cos H + Q \sin H \\ Q' &= Q \cos H - I \sin H \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中: $H = \text{sign}(I')Q'$ 为载波相差。当 FLL 处于跟踪状态, I' 值即为当前的数据比特值。由于 GPS 和 GLONASS 的导航消息皆为 50bits/s, 可以在 20ms 历元中积累 I 和 Q 值。

(3) 接收机硬件及软件结构 接收机主结构示于图 2 中。GPS 和 GLONASS 各采用一个前端芯片使 GPS 和 GLONASS 信号通过, GLONASS 前端的时钟驱动部分采用大规模 PLL 频率合成器。为了简化接收机结构, 通道处理部分采用专用 GPS 相关器芯片, 完成从本地码发生, 码与载波 NCO 发生, I 与 Q 相关, 码相位与载波相位的积累等工作, 该相关器可以提供 12 个通道用于 GPS 或 GLONASS 处理。采用 Texas Instruments 的 TMS320C31 执行跟踪功能和进行测量。奔腾 586 PC 机用于控制整个接收机和提供图形用户接口, PC 软件对所有的测量进行处理。

接收机软件主要完成如下功能: GPS 和 GLONASS 信号处理, GPS 和 GLONASS 导航消息解码, 硬件控制, 通信接口, 浮点导航计算。为了完成上述功能, 接收机软件采用多任务

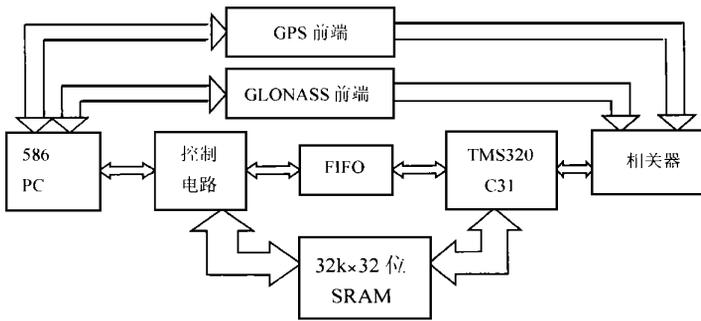


图 2 接收机结构框图

结构和中断处理结构实现。程序定义了 3 个任务:主任务、子帧处理任务和显示任务,其中主任务优先级最低。主任务的主要工作包括检查 GPS 和 GLONASS 星历的有效性,对卫星的高度角、方位角和多普勒频移进行预测,对卫星进行通道分配,进行导航解算。子帧处理任务要从导航电文的每个子帧中分离出特定的参量,显示任务定期更新屏幕显示。在程序开始执行以后,CPU 对接收机的硬件和软件进行初始化,进入主任务循环。其它任务在挂起一定的时间后得以执行和释放。

中断结构是指通道对卫星信号的搜索与跟踪及测量是定时地在中断服务程序 ISR 中进行的,定时间隔取 505Ls。在 ISR 中完成的工作是:1 读取 I, Q 相关器的数据,将之存入循环缓冲区;2 读取载波、码测量以进行导航处理;3 执行载波跟踪和码跟踪;4 执行比特同步与帧同步,得到数据子帧以被子帧任务处理。ISR 中断直接与硬件取得连续,是接收机测量与解算的重要基础。

(4) 导航处理 设 (X_R, Y_R, Z_R) 接收机在历元 t 的瞬时位置; (X_{Pi}, Y_{Pi}, Z_{Pi}) 为第 i 颗 GPS 卫星在 WGS-84 坐标系下的瞬时在轨位置, (X_{Lj}, Y_{Lj}, Z_{Lj}) 为第 j 颗 GLONASS 卫星在 PZ-90 坐标系下的坐标。这两组坐标都由相应卫星的导航电文提供。 \hat{Q}_i 为接收机测得的第 i 颗 GPS 卫星的站心距离, \hat{Q}_j 为测得的第 j 颗 GLONASS 卫星的站心距离; d_p 和 d_L 分别为由 GPS 和 GLONASS 钟差因素引起的站星距离偏差,则有^[3]

$$\left. \begin{aligned} \hat{Q}_i &= \sqrt{(X_{Pi} - X_R)^2 + (Y_{Pi} - Y_R)^2 + (Z_{Pi} - Z_R)^2} + d_p \\ \hat{Q}_j &= \sqrt{(X_{Lj} - X_R)^2 + (Y_{Lj} - Y_R)^2 + (Z_{Lj} - Z_R)^2} + d_L \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由于 GPS 和 GLONASS 的时间系统的差异是未知量,使得定位方程中的未知量增加到 5 个,为此需要观测 5 个 GPS 或 GLONASS 卫星,即可解出接收机的坐标。

为了得到组合导航的较精确的位置解,在组合定位中还需考虑 GPS 和 GLONASS 的参考坐标系的变换问题。由于从 GPS 或 GLONASS 导航电文中获得的卫星轨道坐标都分别以 WGS-84 和 PZ-90 为基准,在解算上述方程组时必须把两种坐标系中的卫星在轨位置归到一个坐标系下。MIT 林肯实验室的 P. N. Misra 等人收集了大量的数据,得出了两坐标系较为准确的变换参数,他们的计算结果为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.5m \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1.9 \times 10^{-6} & 0 \\ 1.9 \times 10^{-6} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: (x, y, z) 为卫星在 WGS-84 坐标系下的轨道位置; (u, v, w) 为卫星在 PZ-90 坐标系下的位置坐标。将该结果直接应用到接收机中组合算法中。在应用式(4)进行解算之前,先把从 GLONASS 导航电文中得出的 GLONASS 的位置坐标(PZ-90 坐标系下)按照式(5)进行坐标变换,代入式(4)的 (X_{Lj}, Y_{Lj}, Z_{Lj}) 中,可以得到消除两系统坐标系差异的较为精确的解。

参 考 文 献

- 1 刘晖, 张其善. GLONASS C/A 码接收机射频前端设计. 见: 中国航空学会信号与信息处理专业分会编. 中国航空学会信号与信息处理专业第二届学术会议论文集, 1998. 157~160
- 2 Riley S. An integrated multi-channel GPS/GLONASS receiver. In: Institute of Navigation Satellite Division ed. Proceedings of ION-GPS-92. New Mexico: Institute of Navigation, 1992. 463~471
- 3 刘基余, 李征航, 王跃虎, 等. 全球定位系统原理及其应用. 北京: 测绘出版社, 1995. 124~125
- 4 Misra P N. Integrated use of GPS and GLONASS in civil aviation. Lincoln Laboratory Journal, 1993, 6(2): (http://satnav.atc.ll.mit.edu/papers/LL_journal/Misra.html.)