

doi: 10.7690/bgzdh.2013.10.014

无人机 CNSS/GLONASS 组合导航技术

胡军, 黄克明, 戴远文

(陆军军官学院六系, 合肥 230031)

摘要: 为实现无人机导航系统覆盖范围大、精度高、动态强等要求, 从分析我国无人机导航现状入手, 研究 CNSS/GLONASS 组合导航定位数据解算方法。基于“当前”统计模型建立状态方程和观测方程, 并通过飞行实验和数据分析对相关性能进行验证。结果表明: 提出的 CNSS/GLONASS 组合导航定位数据解算方法可实现 2 种系统的优势互补, 提高北斗系统在无人机高动态导航中的可用性, 增强无人导航精度。

关键词: 无人机; 组合导航; 北斗卫星导航系统; GLONASS 导航系统

中图分类号: TJ861 **文献标志码:** A

UAV CNSS/GLONASS Integrated Navigation Technology

Hu Jun, Huang Keming, Dai Yuanwen

(No. 6 Department, Army Officer Academy of PLA, Hefei 230031, China)

Abstract: For the realization of large coverage, high precision, dynamic requirements of UAV navigation system, this paper studies the data calculation method in CNSS/GLONASS integrated navigation and positioning from the status quo of UAV navigation. Based on the “current” statistical model, it establishes the state equation and observation equation, and verify the performance through flight experiment and data analysis. The result shows that the CNSS/GLONASS integrated navigation location data calculation method can realize complementary advantage of two systems, improve usability of Beidou satellite navigation system in UAV high dynamics navigation and enhance navigation accuracy.

Key words: UAV; integrated navigation; Beidou satellite navigation system; GLONASS navigation system

0 引言

近年来, 随着军事信息化进程的加快, 无人机技术得到了空前的发展, 其作战任务已从传统的空中侦察、战场监视和毁伤评估等扩大到战场抑制、对地攻击、拦截巡航导弹, 甚至空中格斗。这就对无人机导航与制导系统的性能要求越来越高, 单一导航方式已不能满足现代无人机的作战要求, 而采用多技术融合、冗余设计的组合导航系统已成为必然趋势; 因此, 笔者对无人机 CNSS/GLONASS 组合导航技术进行研究。

1 无人机 CNSS/GLONASS 组合导航^[1]

无人机常规采用的组合导航方式主要有全球定位系统/惯性导航系统(GPS/INS), 全球定位系统/多普勒导航系统(GPS/DNS), 以惯导为主、GPS 和地形辅助参考导航(TAN)为辅的组合导航系统(INS/GPS/TAN), 组合卫星定位系统(GPS/GLONASS), 卫星导航/天文导航(GPS/CNS)等。全球卫星定位导航系统因具有全球性、全天候、连续精密导航与定位能力, 且应用成本低、发展成稳定, 各国无人机组合导航多以 GPS 导航为主。

由于惯性导航成功高、相对体积较大, 目前我

国无人机的组合导航多以 GPS 为主, 或完全依赖 GPS, 或以 GPS 为主, 以无线电导航为辅。GPS 系统是美国军方控制的导航定位系统, 虽然现对世界开放, 但可随时收费或关闭, 尤其是战时; 因此, 我国无人机不能完全依赖 GPS 系统进行导航定位。

事实上, 卫星导航系统除美国的全球定位系统(GPS)外, 还有俄罗斯的导航系统(GLONASS)、欧洲的伽利略导航系统(GALILEO)和我国的北斗卫星导航定位系统(CNSS)。北斗卫星导航系统是我国自主研发开发的区域性有源三维卫星定位与通信系统, 由 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星组成, 到 2020 年左右建成覆盖全球的卫星导航系统, 目前已发射有 14 颗卫星, 系统定位精度优于 10 m, 授时精度 50 ns, 测速精度 0.2 m/s。由于北斗卫星导航系统技术上不依赖国外的卫星导航系统, 自主性好, 避免了保密性差和用户数目受限的问题, 未来我国无人机导航完全采用北斗卫星导航系统是必然趋势。但就当前而言, 由于受定位卫星数目限制, 完全采用北斗卫星导航系统进行无人机定位, 其定位精度仍然不能适应无人机的使用要求。

俄罗斯的导航系统(GLONASS)与 GPS 不同, 在定位服务上不引入选择可用性(SA)措施, 且整体

收稿日期: 2013-04-24; 修回日期: 2013-05-15

基金项目: 陆军军官学院科研学术基金(2012XYJJ-050)

作者简介: 胡军(1969—), 男, 甘肃人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事光电通信工程、无人机装备技术与作战运用研究。

定位精度远远高于 SA 措施下的 GPS 定位精度。但因政治、经济等方面原因，GLONASS 系统目前只有 8 颗卫星可以正常工作，限制了系统的服务范围 and 定位精度。

由此可见，GPS 受制于美国，容易受到干扰；GLONASS 卫星数目有限，独立定位可用性较差；我国 CNSS 系统卫星数目少，存在定位的动态性能较差，信号容易丢失及定位精度不高等问题。为此，研究并采用 CNSS/GLONASS 组合导航技术实现我国无人机的高精度导航定位具有重要的现实意义。

2 CNSS/GLONASS 组合导航定位数据解算

2.1 定位原理

与单系统定位方程相比，CNSS/GLONASS 组合系统多了一个双系统时差未知量，因此至少应增加一个观测量。以 3 颗北斗卫星加 2 颗 GLONASS 卫星为例，其导航解算原理如式 (1)：

$$\sqrt{(x-x_j)^2+(y-y_j)^2+(z-z_j)^2}+k_1\delta_1+k_2\delta_2=r_j \quad (1)$$

其中： $j \geq 5$ ； x_j, y_j, z_j 是第 j 颗卫星的三维坐标； x, y, z 是接收机的三维坐标； δ_1 是接收机时钟与卫星时钟之间的偏差； δ_2 是两系统的系统时间差； k_1, k_2 为时差系数； r_j 是接收机至第 j 颗卫星的测量距离。

由以上方程可知，此方程有 5 个未知数 $x, y, z, \delta_1, \delta_2$ ，就需建立 5 个联立方程。因此，当能同时观测到 5 颗以上卫星时，可以直接实现 CNSS/GLONASS 组合定位解算。但由于也存在只能收到 4 颗卫星的情况，此时接收机利用接收到的增强系统播发的两系统时钟之间的偏差 δ_2 ，可以减少一个未知数，实现观测到 4 颗卫星信号的定位解算。

2.2 数据解算

如果近似的知道接收机的位置，那么可以将真位置 $(x, y, z, \delta_1, \delta_2)$ 与近似位置 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2)$ 之间的偏移量用 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \delta_1, \Delta \delta_2)$ 来标记，如式 (2)：

$$\begin{cases} x = \hat{x} + \Delta x \\ y = \hat{y} + \Delta y \\ z = \hat{z} + \Delta z \\ \delta_1 = \hat{\delta}_1 + \Delta \delta_1 \\ \delta_2 = \hat{\delta}_2 + \Delta \delta_2 \end{cases} \quad (2)$$

对于式 (1)，设

$$f_j(x, y, z, \delta_1, \delta_2) = \sqrt{(x-x_j)^2+(y-y_j)^2+(z-z_j)^2}+k_1\delta_1+k_2\delta_2 \quad (3)$$

对于式 (3) 展开成泰勒级数，忽略 2 阶小项，从而得到线性方程组：

$$\begin{cases} a_{11}\Delta x + a_{12}\Delta y + a_{13}\Delta z + k_1\Delta \delta_1 + k_2\Delta \delta_2 = r_1 - f_1(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2) \\ a_{21}\Delta x + a_{22}\Delta y + a_{23}\Delta z + k_1\Delta \delta_1 + k_2\Delta \delta_2 = r_2 - f_2(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2) \\ a_{31}\Delta x + a_{32}\Delta y + a_{33}\Delta z + k_1\Delta \delta_1 + k_2\Delta \delta_2 = r_3 - f_3(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2) \\ a_{41}\Delta x + a_{42}\Delta y + a_{43}\Delta z + k_1\Delta \delta_1 + k_2\Delta \delta_2 = r_4 - f_4(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2) \\ a_{51}\Delta x + a_{52}\Delta y + a_{53}\Delta z + k_1\Delta \delta_1 + k_2\Delta \delta_2 = r_5 - f_5(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2) \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 中 a_{ij} 为展开的泰勒级数的系数。

用矩阵形式表示为

$$\Delta \mathbf{R} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{X} \quad (5)$$

式 (5) 中 $\Delta \mathbf{R}$ 、 \mathbf{A} 、 $\Delta \mathbf{X}$ 分别为：

$$\Delta \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 - f_1(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2) \\ r_2 - f_2(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2) \\ r_3 - f_3(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2) \\ r_4 - f_4(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2) \\ r_5 - f_5(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta r_1 \\ \Delta r_2 \\ \Delta r_3 \\ \Delta r_4 \\ \Delta r_5 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 1 & 1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 1 & 1 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 1 & 1 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & 1 & 1 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \Delta \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ k_1 \Delta \delta_1 \\ k_2 \Delta \delta_2 \end{bmatrix}$$

于是可以得到方程的最小二乘解为

$$\Delta \mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{R} \quad (6)$$

解出 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \delta_1, \Delta \delta_2)$ 之后，便可以修正近似位置 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2)$ ，再重新迭代回去，直至达到可接受的范围，只要估计值是在实际值的附近，迭代就是收敛的。

3 CNSS/GLONASS 组合导航算法^[2-5]

无人机导航定位本质上是动态定位问题，研究的是机动目标模型，通常有：微分多项式模型、CV-CA 模型、Singer 统计模型、“当前”统计模型。1983 年，我国学者周宏仁提出了机动目标“当前”统计模型，该模型主要解决运动目标的动态定位问题，将目标的机动加速度用修正的瑞利分布描述。笔者将“当前”统计模型扩展到多维情况，采用动力学方程及状态方程描述被估计量(无人机)的动态变化规律。被估计量(无人机)的动态统计信息由激励白噪声的统计信息和动力学方程确定。由于激励白噪声是平稳过程，动力学方程已知，这样即可建立其状态方程和观测方程。

用户状态方程为：

$$\dot{X}(t) = \Phi X(t) + U(t) + W(t) \quad (7)$$

式中，矩阵 Φ 、 $U(t)$ 、 $W(t)$ 分别为系统的状态转移矩阵、加速度修正值和系统噪声。

设采样周期为 T ，离散状态方程为

$$X(k+1) = \Phi(k+1, k)X(k) + U(k) + W(k) \quad (8)$$

根据组合导航系统定位数据解算原理，观测方程可写为

$$\Delta R = H\Delta X + V(k) \quad (9)$$

式中， $V(k)$ 是观测噪声， ΔX 和 H 分别为： $\Delta X = [\Delta x \ \Delta v_x \ \Delta a_x \ \Delta y \ \Delta v_y \ \Delta a_y \ \Delta z \ \Delta v_z \ \Delta a_z]^T$ ， $H = [H_1 \ H_2 \ H_3 \ H_4]^T$ ， $H_i = [a_{i1} \ 0 \ 0 \ a_{i2} \ 0 \ 0 \ a_{i3} \ 0 \ 0]$ 。

4 实验与数据分析

为了验证 CNSS/GLONASS 组合导航的性能，进行了相应的比对实验。由无人机携带一个 GPS 接收机和一个 CNSS/GLONASS 组合接收机进行飞行实验，记录相关数据并进行实验分析。首先按照一定的内部编码准则对 CNSS/GLONASS 数据进行解码，按照商用 GPS 接收机的编码格式进行 GPS 解码；然后将 CNSS/GLONASS 数据与 GPS 数据进行

时间对齐，并进行均值方差分析，剔除野值；最后以 GPS 数据作为基准，与同一时刻 BD/GLONASS 的定位数据进行比较，计算定位误差，以评价组合导航系统性能^[6]。

数据分析结果如图 1 和图 2 所示。根据系统的工作体制，其用户的定位精度主要取决于系统的伪距测量误差和星座的几何因子。通过对两系统卫星星历状况的模拟仿真，构成的位置精度几何因子 PDOP 约为 5~25 之间，其中几何因子小于 15 的时段大于 90%。用户的伪距测量误差，通过差分修正以及高精度的系统时差修正的方式来保证，可以达到测量偏差 δ 为 2 m 以内。则相应的用户定位精度为 $PDOP \times \delta = 10 \sim 50$ m。由图 1 和图 2 比较可知，采用卡尔曼滤波后，系统整体定位误差有较大改善，达到 30 m 左右。在无人机高动态情况下，与 GPS 相比，位置精度可以保持在平均纬度误差 25 m，平均经度误差 30 m，平均高度误差 50 m。

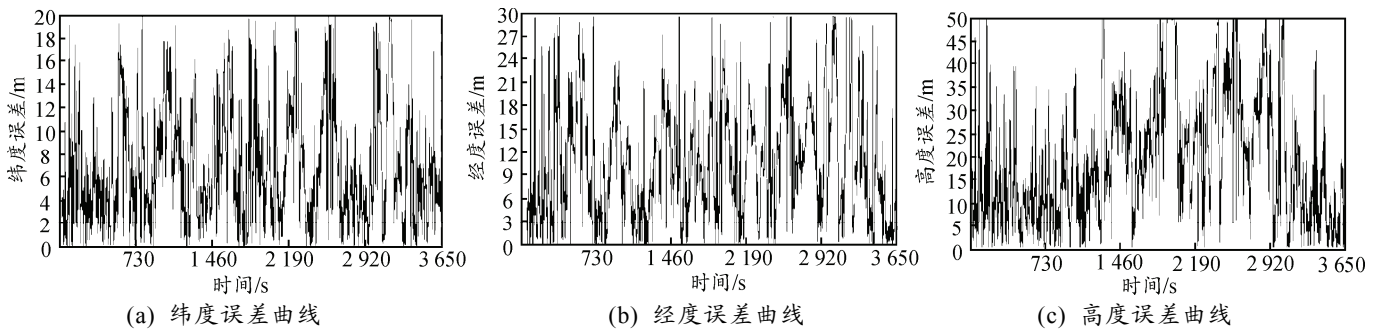


图 1 原始位置误差

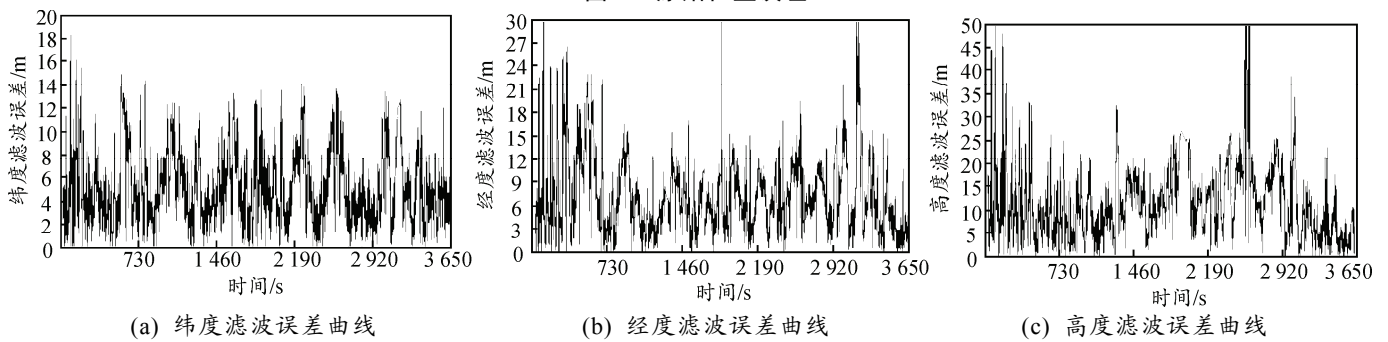


图 2 卡尔曼滤波位置误差

5 结论

试验结果证明：笔者提出的 CNSS/GLONASS 组合导航定位数据解算方法，可实现 2 种系统的优势互补，能有效提高北斗系统在无人机高动态导航中的可用性，增强无人导航精度，具有较好的工程应用价值，下一步将对算法进行优化并移植。

参考文献：

[1] 周玮. 基于 DSP 的 GPS/BD-2 组合定位算法的研究与实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008: 17-27.

[2] 王杰贵, 罗景青, 阮怀林. 针对几种典型机动目标模型的状态方程研究[J]. 航天电子对抗, 2002(4): 25-27.

[3] 陈玉峰, 罗继勋, 祝晓辉, 等. 一种基于机载无源北斗系统的改进卡尔曼滤波算法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008(3): 20-22.

[4] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 28-42.

[5] 屈耀红. 小型无人机航迹规划及组合导航关键技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006: 47-81.

[6] 林雪原, 王杰, 骆卉子. 基于小波辅助的 GPS/SINS 组合导航系统故障检测与信息融合算法[J]. 兵工自动化, 2012, 31(2): 52-56.