

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.03.003

一种新型的伪卫星辅助下的惯导初始对准方法

管春洋, 卿立, 何伟

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: 静基座且已知载体位置的情况下, INS 可以快速地完成初始对准, 但是在野外环境下通常无法快速地给出初始位置。伪卫星具有铺设简单快捷, 不易受到破坏的特点, 适合在未知环境下作为 GNSS 系统的补充来辅助定位。但是在 GNSS 拒止的情况下, 如果单独使用伪卫星 (PL) 来进行定位会存在定位结果误差较大等问题, 难以辅助 INS 系统完成初始对准。为了解决 GNSS 拒止情况下伪卫星辅助惯性导航系统进行初始对准存在的问题, 提出了以高度传感器辅助下的 PL 定位算法, 利用该算法得到准确的位置信息进而实现 GNSS 拒止条件下 INS 系统的初始对准, 满足高精度的 INS 系统在复杂环境下的使用需求。

关键词: 惯导对准; 伪卫星; 气压高度辅助

中图分类号: U666.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2017)03-0017-05

A New Method of Initial Alignment Assisted by Pseudo-Satellites

GUAN Chun-yang, QING Li, HE Wei

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: Under stationary base and the known location of the carrier, the INS can complete the initial alignment, but the obtainment of the initial location is difficult in the wild. Pseudo-satellites with the laying of simple and quick, less susceptible to damage, is suitable as a supplement positioning of GNSS in unknown environment. But in the case of GNSS denial, and used pseudo-satellite positioning alone it will cause large errors in positioning result, cannot assist the initial alignment of INS. In order to solve the problem in pseudo-satellite aided INS initial alignment under GNSS denial, this paper presents a pseudo-satellite positioning algorithm with height sensor assisted. With accurate position information obtained by the algorithm, the initial alignment of INS is completed under the GNSS denial, meeting the need of high-precision INS in a complex environment.

Key words: Alignment of INS; Pseudo-satellites; Atmospheric pressure altitude aided

0 引言

近年来随着我国自主研发的北斗卫星导航系统的建设逐步建成与完善, 北斗卫星导航系统作为

全球四大卫星导航系统之一得到了广泛的关注^[1], 同时随着电子技术的发展, 卫星导航系统的应用也越来越广泛^[2]。对于组合导航系统来说, 在低动态高信噪比的条件下, GNSS 接收机可以自主完成卫

收稿日期: 2016-07-16; 修订日期: 2016-08-16

基金项目: 装备预研共用技术课题(41417040301)

作者简介: 管春洋(1990-), 男, 硕士, 主要从事惯性卫星组合导航技术方面的研究。E-mail: gcyhit@163.com

星导航信号的捕获,此时卫星导航接收机可以辅助INS单元进行动基座的传递对准^[3],系统无需进行地面静基座的对准,从而缩短了INS单元的初始对准时间,提高了整个系统的效率。

GNSS/INS组合导航系统虽然可以提高整个系统的性能,但是在GNSS系统受到干扰时同样也会影响INS系统的性能,甚至导致组合导航系统发散。为了提高组合导航系统的鲁棒性,文献[4]提出了基于伪距误差重建的多星故障检测方法,文献[5]提出了基于子p集值检验的惯性/卫星紧组合多星故障识别方法,以上这些方法都提高了组合导航系统在卫星出现故障时的性能。但是如果GNSS系统出现严重故障时即GNSS拒止条件下,现有的方法无法保证GNSS系统的可用性,进而也无法完成对INS系统的对准,此时INS系统需要独立完成初始对准。在静基座且已知载体位置的情况下,INS系统可以快速地完成对初始对准,但是在野外环境下通常无法快速地给出准确的初始位置,需要借助于外部信息辅助来完成初始位置装订。伪卫星具有铺设简单快捷,且不易受到攻击与干扰的特点,适合在野外环境下作为GNSS系统的补充来辅助定位。但是在实际中如果单独使用伪卫星来进行定位会存定位误差过大等问题,无法满足INS静基座对准的需要,因此本文提出了一种高度传感器辅助下的伪卫星定位方法,利用该方法得到准确的位置信息进而实现对惯导的初始对准。

1 INS的静基座初始对准基本原理

捷联系统的初始对准问题就是要在较短的时间内以一定的精度确定出从载体坐标系到导航坐标系的初始方向余弦矩阵 C_b^l 或初始四元数 q 。INS的静基座初始对准分为粗对准与精对准2个阶段^[6]。粗对准阶段直接利用由陀螺仪测量出来的地球自转矢量以及加速度传感器测量出来的重力矢量进行解析运算,得到载体的姿态信息。精对准阶段则常采用Kalman滤波技术^[7]并结合由传感器得到的加速度、角速度信息得到计算地理坐标系与真实地理坐标系之间的失准角,并不断地对由粗对准得到的从载体坐标系到导航坐标系的初始方向余弦矩阵 C_b^l 以及传感器的误差进行修正。

1.1 粗对准原理

粗对准的计算采用直接解析法,即通过矩阵运算直接求解出载体的姿态信息,该方法的优点是运

算量较小,计算时间较短,但是对准精度较差且无法对传感器的误差进行估计。该方法的具体计算步骤如下。

首先构造矢量 $\mathbf{V}=\mathbf{g}\times\boldsymbol{\omega}$,矢量 \mathbf{V} 满足式(1)

$$\mathbf{V}^b = \mathbf{C}_l^b \mathbf{V}^l \quad (1)$$

其中, \mathbf{V}^b 、 \mathbf{V}^l 如下所示:

$$\mathbf{V}^b = \mathbf{g}^b \times \boldsymbol{\omega}^b$$

$$\mathbf{V}^l = \mathbf{g}^l \times \boldsymbol{\omega}^l$$

进而得到式(2)

$$[\mathbf{g}^b \ \boldsymbol{\omega}^b \ \mathbf{V}^b] = \mathbf{C}_l^b [\mathbf{g}^l \ \boldsymbol{\omega}^l \ \mathbf{V}^l] \quad (2)$$

由于方向余弦矩阵满足如下所示

$$\mathbf{C}_b^l = (\mathbf{C}_l^b)^{-1} = (\mathbf{C}_l^b)^T \quad (3)$$

根据式(1)和式(3),可以得到从载体坐标系到导航坐标系的初始方向余弦矩阵 \mathbf{C}_b^l 如式(4)所示。

$$\mathbf{C}_b^l = ([\mathbf{g}^l \ \boldsymbol{\omega}^l \ \mathbf{V}^l]^T)^{-1} [\mathbf{g}^b \ \boldsymbol{\omega}^b \ \mathbf{V}^b]^T \quad (4)$$

其中,矩阵 $[\mathbf{g}^b \ \boldsymbol{\omega}^b \ \mathbf{V}^b]$ 可以由加速度与陀螺仪采集到的载体坐标系下的加速度信息 \mathbf{g}^b 与角速度信息 $\boldsymbol{\omega}^b$ 直接计算得到,再结合式(5)即可得到从载体坐标系到导航坐标系的初始方向余弦矩阵 \mathbf{C}_b^l ,即完成了粗对准的过程。

$$[\mathbf{g}^l \ \boldsymbol{\omega}^l \ \mathbf{V}^l] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & g\omega_{ie}\cos\varphi \\ 0 & \omega_{ie}\cos\varphi & 0 \\ g & \omega_{ie}\cos\varphi & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.2 精对准原理

在完成粗对准之后继续对惯导进行精对准以消除平台失准角并对惯性器件的误差进行校正。精对准解算利用Kalman滤波技术来得到平台失准角信息并对惯性器件的误差进行校正,因此应对系统进行建模得到相应的状态方程与量测方程。由于载体处于静止状态因此相应的状态向量 \mathbf{X} 如下式所示^[8]

$$\mathbf{X} = (\delta v_E \ \delta v_N \ \phi_E \ \phi_N \ \phi_U \ \delta a_x \ \delta a_y \ \delta \varepsilon_x \ \delta \varepsilon_y \ \delta \varepsilon_z) \quad (6)$$

其中,E、N、U代表东北天坐标系的东向、北向、天向。 x 、 y 、 z 代表载体坐标系的 x 轴、 y 轴、 z 轴。 δv 为速度误差量, ϕ 为平台失准角, δa 为加速度计误差, $\delta \varepsilon$ 为陀螺仪误差。

精对准时状态向量的微分形式如式(7)所示

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 & \mathbf{F}_2 \\ \mathbf{0}_{1 \times 5} & \mathbf{0}_{1 \times 5} \end{bmatrix} \mathbf{X} \quad (7)$$

其中,矩阵 \mathbf{F}_1 、 \mathbf{F}_2 如式(8)、式(9)所示, R 为地球平均半径,国际上一般取值为6367.56km^[9-10]。

$$F_1 = \begin{bmatrix} 0 & 2\omega_{ie} \sin\varphi & 0 & -g & 0 \\ -2\omega_{ie} \cos\varphi & 0 & g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_{ie} \sin\varphi & -\omega_{ie} \cos\varphi \\ 0 & 0 & -\omega_{ie} \sin\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_{ie} \cos\varphi & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R} & C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ \frac{1}{R} & 0 & C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ \frac{\tan\varphi}{R} & 0 & C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C_b^l = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

初始对对准的观测量为 $Z = [\delta v_E \quad \delta v_N]$, 因此得到精对准时的量测矩阵 H_k 如式(11)所示。

$$H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \mathbf{0}_{1 \times 8} \\ 0 & 1 & \mathbf{0}_{1 \times 8} \end{bmatrix} \quad (11)$$

利用 Kalman 滤波技术并结合相应的状态方程与量测方程即可完成对 INS 的精对准。

由以上的推导可以看到,INS 的粗对准与精对准过程都需要已知接收机的位置信息,在 GNSS 失效且处于野外的条件下,单独利用 INS 传感器难以实现 INS 的静态初始对准,需要外部提供位置信息以辅助 INS 的初始化。因此可以考虑利用伪卫星系统快速地获得载体的位置信息来辅助 INS 的静基座初始对准,提高 INS 系统的定位精度与初始对准速度。

2 伪卫星定位中存在的问题

对于伪卫星来说,一般布于地面作为对卫星信号的增强与补充,因此若单纯利用伪卫星进行定位的话,其几何构型可能难以达到定位的要求。为了进行验证分析,设计了如下的仿真:在地面上设置 4 个伪卫星基站,坐标系采用当地水平坐标系,具体位置坐标如表 1 所示,目标点的坐标为(0 0 0)。仿真中伪距测量噪声为 2m,仿真时间为 1000s。

定位结果的三维分布图如图 1 所示。可以看到,在常规的几何分布下,利用伪卫星定位的结果误差非常大,无法应用于 INS 的静基座初始对准。在不考虑测距误差的情况下对空间位置精度因子(PDOP)进行分析,结果如图 2 所示,PDOP 的值约为 3200 左右,此时的 PDOP 值无法满足定位的精度要求。为了进一步定位问题,同时对比了水平位置精度因子(HDOP)与高程精度因子(VDOP),对

比结果如图 3 所示。可以看到,VDOP 的值与 PDOP 的值接近,而 HDOP 的值较小。

表 1 基站位置
Tab. 1 The position of the base station

	东向/m	北向/m	天向/m
基站 1	25000	23000	50
基站 2	15000	-15000	50
基站 3	-13000	17000	10
基站 4	-12000	-18000	20

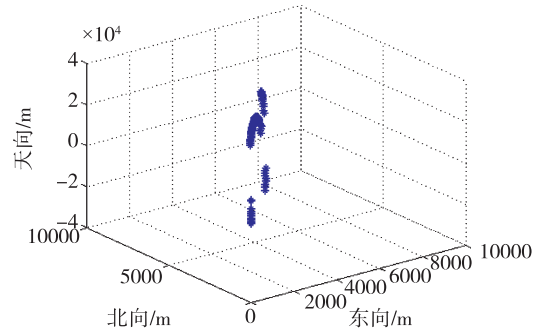


图 1 定位结果三维分布图

Fig. 1 Three-dimensional diagram of the position

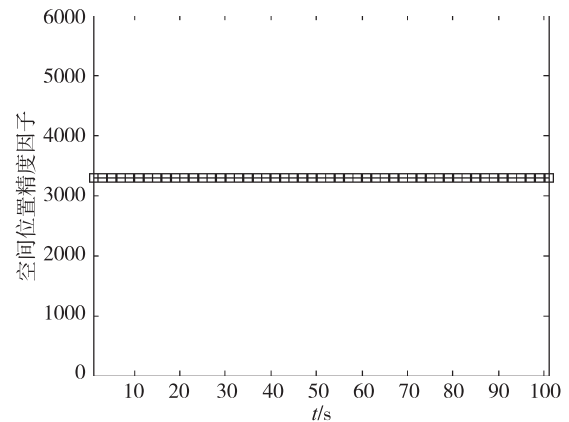


图 2 定位结果的 PDOP 值

Fig. 2 PDOP of the position

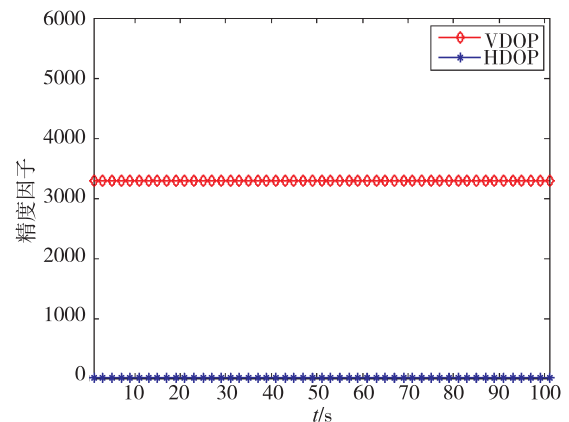


图 3 PL 定位结果的 HDOP 与 VDOP 对比

Fig. 3 The compare between HDOP and VDOP

因此得出如下的结论,常规的伪卫星布设方案虽然具有布设简单、易于实现的优点,但是利用伪卫星对靠近地面的载体进行定位时,由于 VDOP 较大,导致定位误差较大,无法满足精度要求,但是 HDOP 的值很小,是符合定位精度要求的。如果能够由外部得到准确的高度信息,仍可以利用伪卫星完成定位的工作。

目前高精度的气压高度表的精度在短时间内可达 2m,分辨率可达 0.1m,完全可以满足定位精度的要求^[11]。因此本节提出了利用高度传感器辅助伪卫星的定位算法,利用该算法可以有效地消除伪卫星定位中 VDOP 过大对定位结果的影响,得到准确的定位结果。

3 基于高度传感器辅助的伪卫星定位算法

由之前的分析可知,造成伪卫星单独定位结果较差的原因为 VDOP 值过大,因此如果利用高度传感器来提供高度信息即可避免定位结果的发散。

引入高度传感器辅助之后需要对定位算法做相应的修改,由于不需要对高度信息进行解算,因此待求解量变为 $\mathbf{r}_{PL} = [x_E \ y_N]^T$,则由伪卫星站的伪距信息得到的求解方程组如式(12)所示。其中, h_{sensor} 为由高度传感器得到的高度信息。

$$\begin{cases} \rho_{PL1} = \sqrt{(x_E - x_{PL1})^2 + (y_N - y_{PL1})^2 + (h_{\text{sensor}} - h_{PL1})^2} + \delta t_{PL} \\ \vdots \\ \rho_{PLn} = \sqrt{(x_E - x_{PLn})^2 + (y_N - y_{PLn})^2 + (h_{\text{sensor}} - h_{PLn})^2} + \delta t_{PL} \end{cases} \quad (12)$$

对其进行线性化后如式(13)所示

$$\mathbf{H}_{\text{hs}} \Delta \mathbf{r}_{PL} = \mathbf{b}_{PL} \quad (13)$$

其中:

$$\mathbf{H}_{\text{hs}} = \begin{bmatrix} \frac{-(x - x_{PL1})}{I_1} & \frac{-(y - y_{PL1})}{I_i} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{-(x - x_{PLn})}{I_n} & \frac{-(y - y_{PLn})}{I_n} & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$I_n = \sqrt{(x_{E_{k-1}} - x_{PLn})^2 + (y_{N_{k-1}} - y_{PLn})^2 + (h_{\text{sensor}} - h_{PLn})^2} \quad (15)$$

$$\Delta \mathbf{r}_{PL} = \mathbf{r}_{PL} - \mathbf{r}_{PL_{k-1}} \quad (16)$$

$$\mathbf{b}_{PL} = \begin{bmatrix} \rho_1 - \sqrt{(x_{E_{k-1}} - x_{PL1})^2 + (y_{N_{k-1}} - y_{PL1})^2 + (h_{\text{sensor}} - h_{PL1})^2} \\ \vdots \\ \rho_n - \sqrt{(x_{E_{k-1}} - x_{PLn})^2 + (y_{N_{k-1}} - y_{PLn})^2 + (h_{\text{sensor}} - h_{PLn})^2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中, \mathbf{H}_{hs} 为雅克比矩阵, $\mathbf{r}_{PL_{k-1}}$ 为迭代运算的上一次结果, \mathbf{b}_{PL} 为残差向量。

在完成了高度传感器辅助下的定位算法的建模后,利用以上的数学模型结合牛顿迭代法以及最小二乘法即可得到载体的位置信息^[12]。

4 仿真与分析

为了对设计的算法进行仿真,仿真场景与第2节一致。伪卫星的测距误差为 2m,高度传感器的误差为 2m,分辨率为 0.1m。经过仿真得到载体的定位结果三维分布如图 5 所示,东向、北向以及天向的定位误差如图 6 所示。由仿真图可以看到,设计的高度传感器辅助下的伪卫星定位方法可以有效地消除由于 VDOP 过大造成的定位发散问题,提高了伪卫星系统的性能。由该方法得到的区域定位结果可以应用于 GNSS 拒止环境下的野外 INS 静基座对准,提高了 INS 系统的性能与应用范围。

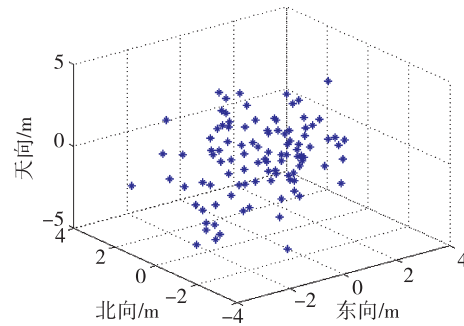


图 4 定位结果分布图

Fig. 4 The figure of the position

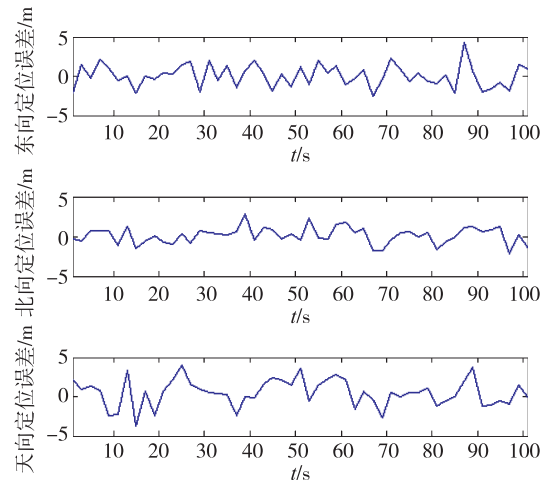


图 5 定位误差

Fig. 5 The error of the position

5 结论

野外环境 GNSS 拒止条件下利用伪卫星可以辅助 INS 系统完成静基座初始对准, 针对 GNSS 拒止条件下, 单独使用伪卫星时存在的定位误差较大无法满足静基座初始对准要求的问题, 本文首先研究了单独使用伪卫星定位误差较大的原因, 在以上研究的基础上提出了一种高度传感器辅助下的伪卫星定位方法并设计了相应的定位算法, 该方法可以有效地消除由于 VDOP 过大造成的定位发散问题, 提高了伪卫星系统的性能。由该方法得到的区域定位结果可以应用于 GNSS 系统失效下的野外 INS 静基座对准, 提高了 INS 系统的性能与应用范围。

参考文献

- [1] Hackman C, Byram S M, Slabinski V J, et al. USNO GPS/GLONASS PNT products: Overview, and GPS +GLONASS vs GLONASS only PPP accuracy [C]. Position, Location and Navigation Symposium-PLANS 2014, 2014 IEEE/ION. IEEE, 2014: 793-803.
- [2] Li X, Dick G, Lu C. Multi-GNSS meteorology: Real-time retrieving of atmospheric water vapor from BeiDou, Galileo, GLONASS, and GPS observations [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(12): 6385-6393.
- [3] 曲法义, 魏纪林, 崔乃刚, 等. 机载精确制导武器快速传递对准[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(1): 7-11.
- [4] 张鑫, 崔晓伟, 冯振明. 基于伪距误差重建的多星故障检测方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(4): 425-431.
- [5] 钟丽娜, 刘建业, 李荣冰, 等. 基于子 p 集值检验的惯性/卫星紧组合多星故障识别方法[J]. 控制与决策, 2013, 28(6): 884-888.
- [6] 万德钧, 房建成. 惯性导航初始对准[M]. 南京: 东南大学出版社, 1998.
- [7] 秦永元. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012: 33-55.
- [8] 董绪荣, 张守信, 华仲春. GPS/SINS 组合导航定位及其应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998: 220-224.
- [9] Zhu H. Establishment of geodetic coordinate system [M]. Publishing House of Surveying and Mapping, 1986.
- [10] 程鹏飞, 成英燕, 文汉江, 等. 2000 国家大地坐标系实用宝典[M]. 北京: 测绘出版社, 2008.
- [11] 郝振海, 黄圣国. 高精度气压高度表研制[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(1): 134-138.
- [12] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 42-67.