

基于 DSP 的全姿态挠性陀螺定北仪的原理与实现

李 嵘 白洁雁

摘 要 本文介绍一种全姿态定北装置,它以挠性陀螺仪和加速度计为测量元件,利用正切法双轴测速定北和重力加速度信息,进行全姿态方位角计算。为了提高系统的运算精度和速度,采用浮点片 TMS320C32 DSP 芯进行计算和控制,以快速自动准确测出真北方位角。文中着重讨论基于 DSP 的挠性陀螺定北仪的原理、信号处理、误差分析。

关键词 定北仪、挠性陀螺、DSP、信号处理、误差分析

1 引 言

定北仪不仅应用于战车和导弹初始对准的定北定向,而且还适用无控火箭和电子对抗等机动武器的自动定向。低、中、高精度定北装置在美国、德国、瑞士等国家发展成熟,国内许多单位近年来也开发和研制了多种型号的定北仪。文献[1]介绍了人工调平二自由度挠性陀螺定北仪,它具有结构简单、误差源少等优点,但是由于需要手动调平,难以满足某些场合的实际使用要求,并且在非调平状态下,其定北精度指标下降。本文主要讨论由一个双自由度挠性陀螺、两个加速度计和转位机构等组成的全姿态定北仪,它由陀螺仪和加速度计敏感地球自转角速度及重力加速度,经解算得到载体与真北方向的夹角。全姿态定北仪是目前定北仪研究和应用方向。

2 工作原理

选取 ONED(北东地)为地理坐标系(n 系)为参考坐标系, $OX_b Y_b Z_b$ 为载体坐标系(b 系), OX_b 为载体纵轴,如图1所示陀螺仪的测量轴 G_x, G_y 和两个加速度计 A_x, A_y 的输入轴分别与载体坐标系的 X_b 轴、 Y_b 轴对应。如图1所示, Ψ, θ, γ 分别为方位角、俯仰角和倾斜角。

$$\begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Psi\cos\theta & \sin\Psi\cos\theta & -\sin\theta \\ \cos\Psi\sin\theta\sin\gamma - \sin\Psi\cos\gamma & \sin\Psi\sin\theta\sin\gamma + \cos\Psi\cos\gamma & \cos\theta\sin\gamma \\ \cos\Psi\sin\theta\cos\gamma + \sin\Psi\sin\gamma & \sin\Psi\sin\theta\cos\gamma - \cos\Psi\sin\gamma & \cos\theta\sin\gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

$$C_n = \begin{bmatrix} \cos\Psi\cos\theta & \sin\Psi\cos\theta & -\sin\theta \\ \cos\Psi\sin\theta\sin\gamma - \sin\Psi\cos\gamma & \sin\Psi\sin\theta\sin\gamma + \cos\Psi\cos\gamma & \cos\theta\sin\gamma \\ \cos\Psi\sin\theta\cos\gamma + \sin\Psi\sin\gamma & \sin\Psi\sin\theta\cos\gamma - \cos\Psi\sin\gamma & \cos\theta\sin\gamma \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

陀螺仪和加速度计的输出分别为:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = C_n \cdot \omega_c \cdot \begin{bmatrix} \cos\varphi \\ 0 \\ -\sin\varphi \end{bmatrix} = \omega_c \cdot \begin{bmatrix} \cos\Psi\cos\theta\cos\varphi + \sin\theta\sin\varphi \\ \cos\Psi\sin\theta\sin\gamma\cos\varphi - \sin\Psi\cos\gamma\cos\varphi - \cos\theta\sin\gamma\sin\varphi \\ \cos\Psi\sin\theta\cos\gamma\cos\varphi + \sin\Psi\sin\gamma\cos\varphi - \cos\theta\cos\gamma\sin\varphi \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = C_n \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g\sin\theta \\ g\cos\theta\sin\gamma \\ g\cos\theta\cos\gamma \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

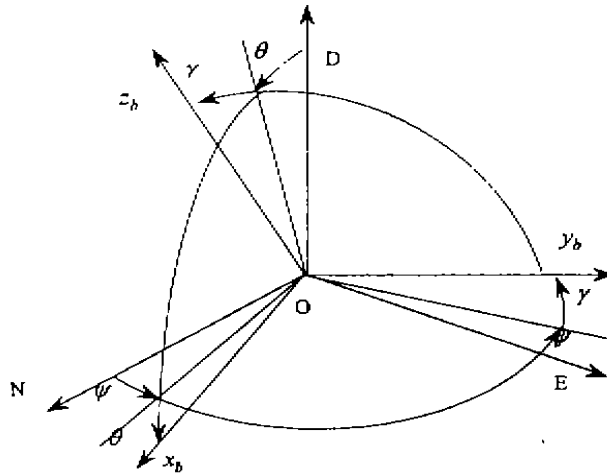


图1 载体坐标系和地理坐标系

式中： ω_e 是地球自转角速度； g 是重力加速度； φ 是当地纬度。

由式(3)可变换成：

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta\sin\gamma & -\cos\gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \cos\varphi \cos\Psi \\ \omega_x \cos\varphi \sin\Psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_x - \sin\theta \cdot \omega_e \sin\varphi \\ \omega_y + \cos\theta \sin\gamma \cdot \omega_e \sin\varphi \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

由式(5)可变换成：

$$\begin{bmatrix} \omega_x \cos\varphi \cos\Psi \\ \omega_x \cos\varphi \sin\Psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta\sin\gamma & -\cos\gamma \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x - \sin\theta \cdot \omega_e \sin\varphi \\ \omega_y + \cos\theta \sin\gamma \cdot \omega_e \sin\varphi \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

根据式(6)求航向角 Ψ ：

$$\Psi = \tan^{-1} \frac{\omega_x \sin\theta \sin\gamma - \omega_e \sin\varphi \sin\gamma - \omega_y \cos\theta}{\cos\gamma (\omega_x - \omega_e \sin\theta \sin\varphi)} \dots\dots\dots (7)$$

由式(4)得：

$$\sin\theta = -\frac{a_x}{g}; \cos\theta = \frac{\sqrt{g^2 - a_x^2}}{g}; \sin\gamma = \frac{a_y}{\sqrt{g^2 - a_x^2}}; \cos\gamma = \frac{\sqrt{g^2 - (a_x^2 + a_y^2)}}{\sqrt{g^2 - a_x^2}} \dots\dots\dots (8)$$

将式(8)代入式(7)得定北解算式：

$$\Psi = \tan^{-1} \frac{(a_x a_y \omega_x + (g^2 - a_x^2) \omega_y + g \omega_e a_y \sin\varphi)}{(g \omega_x + \omega_e \sin\varphi) \sqrt{g^2 - a_x^2 - a_y^2}} \dots\dots\dots (9)$$

在人工调平情况下(即 $\theta = \gamma = 0^\circ$ 时)，式(9)变成

$$\Psi = \tan^{-1} \frac{-\omega_y}{\omega_x} \dots\dots\dots (10)$$

3 信号处理实现

全姿态定北仪研制的核心工作为定北角度的解算，解算公式见式(9)。此公式相对于人工调平找北仪的计算式(10)要复杂得多，考虑到计算精度和速度，系统的中心处理单元采用 DSP 芯片。信号处理电路除了 DSP 还包括信号采样、系统控制、数码显示、远程通讯、外部控制和外部输入等功能模块，系统的硬件框图如图 2 所示。

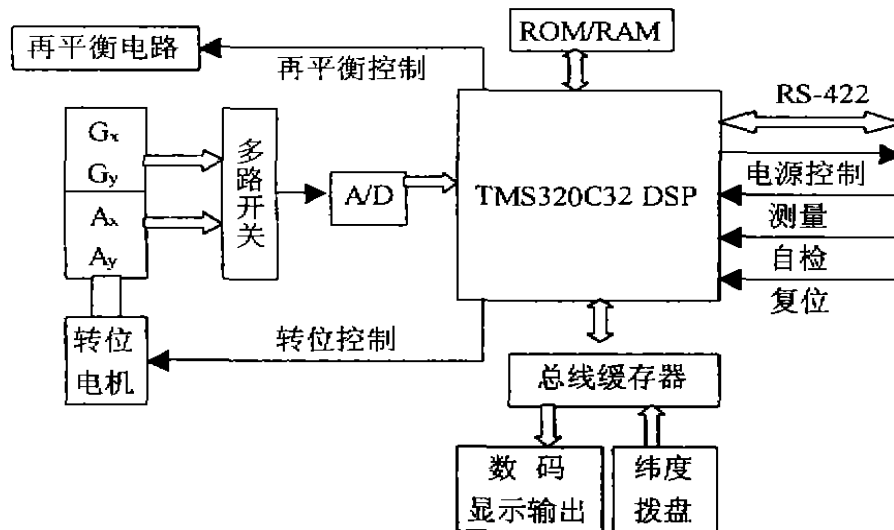


图 2 系统硬件框图

当定北仪通电以后,在 DSP 控制下锁定电源开关,10 秒以后给再平衡回路通电。在挠性陀螺启动阶段对系统进行自检,报告系统的供电、信号是否正常。60 秒后开始对 G_x 、 G_y 、 A_x 、 A_y 进行采样,然后转位 180 度,再次对 G_x 、 G_y 、 A_x 、 A_y 进行采样,二位置采样可以消除常值漂移和零位误差。采样完成后按式(9)计算出真北角 Ψ ,将真北角 Ψ 数码显示,RS-422 串行接口可以将测量结果传输给远端计算机或控制器,同时也可以通过 RS-422 接受远程控制指令。第一次完成测试时间在 3 分钟内,在测量过程中数码显示器始终显示定北仪的工作状态。控制面板按钮可以对系统进行复位、测量、自检和纬度拨盘输入。定北仪工作 30 分钟后无人干预,定北仪会自动关机。

4 误差分析

对于全姿态定北仪,需要考虑的误差源有惯性测量部件误差、安装误差、物理参数误差及其他如环境温度变化、载体振动等干扰。本文只对造成定北误差的主要误差源即传感器误差、转位误差和纬度误差进行分析讨论。

① 惯性器件误差的影响

陀螺仪随机漂移和加速度计输出误差都影响定北精度,但加速度计的精度只要达到 $1.0 \times 10^{-4}g$,其引起的定北误差就可忽略不计,所以仅讨论陀螺仪随机漂移的影响。令陀螺仪 x 轴、 y 轴的漂移分别为,将式(9)在 ϵ_x 和 ϵ_y 处进行泰勒展开,忽略二阶及高阶小量得:

$$\Delta\Psi = \sec\varphi(\tan\theta\tan\gamma\cos\Psi - \sec\theta\sin\Psi)\epsilon_x/\omega_e - (\sec\gamma\sec\varphi\cos\Psi)\epsilon_y/\omega_e \dots\dots\dots (11)$$

式(11)表明定北误差与陀螺仪漂移、载体方位角 Ψ 、姿态角 θ 和 γ 以及当地纬度 φ 有关。令 $\theta = \gamma = 5^\circ$ 、 $\epsilon_x = \epsilon_y = 0.01^\circ/h$ 、 $\varphi = 20^\circ$ 和 60° ,可得到由陀螺仪漂移引起的定北误差曲线如图 3 示。

可知,若要达到 0.1° 的定北精度要求,并考虑到各种误差的相消作用,应选择漂移率为 $0.01^\circ/h$ 的陀螺仪。

② 转位精度的影响

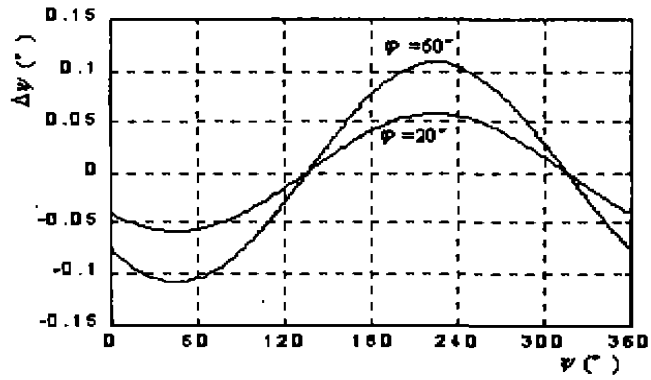


图3 陀螺仪漂移引起的寻北误差

定北仪设置转位机构(转位 180°)是为了补偿陀螺仪的常值漂移误差和加速度计的零偏。但是,实际的转位机构总存在一定的转位误差,这个误差将影响定北精度。设在初始状态下机械转动系为 r 系 Z_r,绕转过(π+η)后的机械转动系为 r¹ 系,η为转位误差角,则 r¹ 和 r 的关系可用矩阵表示

$$C_r^1 = \begin{bmatrix} \cos(\pi + \eta) & \sin(\pi + \eta) & 0 \\ -\sin(\pi + \eta) & \cos(\pi + \eta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -\eta & 0 \\ \eta & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (12)$$

因为转位机构是和陀螺仪及加速度计固联的,所以在两种测量状态下,b 系分别与 r 系和 r¹ 系重合。在 r 系,陀螺仪和加速度计的输出为式(3)、(4);在 r¹ 系,根据式(12)

$$\begin{aligned} \omega_x^1 &= -\omega_x^b - \eta\omega_y^b \\ \omega_y^1 &= -\omega_y^b + \eta\omega_x^b \end{aligned} \dots\dots\dots (13)$$

故二位置法的计算值为

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_x &= \frac{\omega_x^r - \omega_x^1}{2} = \omega_x^b + \frac{1}{2}\eta\omega_y^b \\ \bar{\omega}_y &= \frac{\omega_y^r - \omega_y^1}{2} = \omega_y^b - \frac{1}{2}\eta\omega_x^b \end{aligned} \dots\dots\dots (14)$$

同理,对加速度计进行分析得到

$$\bar{a}_x = a_x^b + \frac{1}{2}\eta a_y^b, \quad \bar{a}_y = a_y^b - \frac{1}{2}\eta a_x^b \dots\dots\dots (15)$$

由式(14)和(15)可知,转位机构转位不精确对定北的影响相当于陀螺仪漂移及加速度计误差对定北的影响。当姿态角小于 5°时,转位误差引起的定北误差约为转位误差 η 的一半。因此,应对转位误差进行控制或者用测角元件测量转位误差角进行误差补偿。

③ 纬度误差的影响

由式(9)可知计算航向角需要引入纬度 φ、重力加速度 g 等物理参数。通常使用中 g 的变化量较小,对定北精度的影响可以忽略,因此只分析纬度误差 Δφ 的影响。将式(5)在 φ 处进行泰勒展开,忽略二阶以上高阶小量得:

$$\Delta\Psi = (\tan\theta\sin\Psi - \sec\theta\tan\gamma\cos\Psi)\Delta\varphi \dots\dots\dots (16)$$

当姿态角小于 5°时,载体在南北方向移动大约 6 海里(Δφ 约为 0.1°)后重新装订纬度值,

纬度误差对定北精度的影响就可限制在以内。

5 结束语

全姿态挠性陀螺寻北仪通过理论分析和实验测试,采取了一系列的误差补偿措施,包括对常值误差,陀螺随机漂移,加速度计零位误差,转位误差,陀螺仪两轴不正交产生的定北误差的补偿,使定北的误差控制在 0.1 度。在硬件上采用 DSP 进行处理使系统的运行速度有了很大的提高。该装置定北时间不超过 3 分钟,精度高,抗干扰能力强,具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 谢长生,一种快速自动寻北装置的研究,上海航天,1997(1),pp25 - 29
- [2] 袁信 郑鄂,捷联式惯性导航原理,第一版,南京:航空专业教材编审组,1985
- [3] 缪玲娟 陈家斌,动调陀螺寻北系统及其误差分析,北京理工大学学报(中文版),1997,第 17 卷,第 3 期。
- [4] 孙国富等,近代找北系统发展,导航,1998(3)。
- [5] TMS320C32 User's Guard, Texas Instrument, 1996
- [6] 李嵘 张海燕, DSP 及其在惯性技术中的应用,上海市惯性技术 2001 年学术交流会论文集。