

光学陀螺旋转惯导系统原理探讨*

袁保伦 饶谷音

(国防科技大学 光电科学与工程学院 湖南 长沙 410073)

摘要 利用旋转自动补偿光学陀螺的漂移是实现高精度惯性导航的有效途径之一,补偿的原理可以从惯性导航的误差方程中得到阐明。光学陀螺的特点决定了采用元件级的旋转方式会带来额外的误差和问题,而只能采用系统级的旋转,即整个惯性测量组合旋转补偿的方式。对一种 8 次 180° 翻转的光学陀螺惯性测量组合旋转方案进行了图形化的说明和分析,并仿真比较了旋转补偿前后的导航误差,结果表明这种系统级的补偿方案能够抵消所有惯性元件的静态漂移,从而大大提高了导航输出的位置和姿态精度。

关键词 激光陀螺;光纤陀螺;惯性导航;陀螺漂移;自动补偿;旋转

中图分类号:U666.12 文献标识码:A

On the Theory of Optical Gyro Rotating Inertial Navigation System

YUAN Bao-lun, RAO Gu-yin

(College of Optoelectro Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Auto-compensating the drift in optical gyros by IMU rotating mechanism is an important way to enhance the navigation precision. The theory of auto-compensating can be clarified in the navigation error propagating functions. Because the attributes of optical gyro determines that rotation of gyro will inevitably bring extra error, the rotation of the whole IMU is the only mechanism. An eight-180-degree rotating mechanism of IMU was proposed and illustrated in detail. Analyses and simulation show that errors from long term drift can be highly restrained, thus navigation accuracy of both position and attitude can be greatly enhanced.

Key words RLG; FOG; inertial navigation; gyro drift; auto-compensation; rotating

光学陀螺是基于 Sagnac 效应测量原理的惯性器件,目前广泛应用的有激光陀螺和光纤陀螺两种类型。激光陀螺是直接利用光学环形谐振腔中的 Sagnac 效应,而光纤陀螺是利用光纤线圈构成的干涉仪效应来敏感角运动,它们的共同特点是对 g 不敏感、无运动部件、动态范围宽、标度因数线性度好等,是一种比较理想的惯性器件。也正是因为有此优点,所以与一般的机械陀螺相比,光学陀螺更适合于采用旋转自动补偿的方式提高系统精度而不会造成陀螺本身精度的下降。

采用旋转的方式对惯性元件的误差进行自动补偿的方法起源于静电陀螺。然而静电陀螺系统的价格昂贵,维护复杂,自从激光陀螺出现以后,美国就开始了研制相应的高精度的旋转惯导系统^[1],以期取代静电陀螺系统。Sperry 公司的 MK49 MOD 0 船用环形激光陀螺惯性导航仪^[2]就采用了双轴旋转技术,20 世纪 90 年代被选为北约的水面舰艇和潜艇的标准船舶惯性导航系统,并装备了大量的潜艇和水面舰艇。1994 年,光纤陀螺性能有了突破性进展,美国启动光纤陀螺战略核潜艇导航计划^[3],预计 2010 年可制成第一套系统试用。其系统设计为三轴连续旋转^[4],原则上可使比例因子、安装轴的不稳定性以及静态漂移在长时间使用中得到较大程度的抵消。

从目前国际上的研究和应用情况来看,采用旋转技术的光学陀螺系统是一种很有发展潜力的高精度自主惯导系统,而在国内这方面的研究尚处于起步阶段,本文对光学陀螺惯导系统的旋转补偿原理进行了一定的探讨和仿真。

* 收稿日期 2006-05-16
作者简介:袁保伦(1979—),男,博士生。

1 自动补偿的原理探讨

1.1 光学陀螺惯导系统的误差及自动补偿

由光学陀螺构成的旋转自动补偿惯导系统,由于旋转的需要,并不存在稳定的物理平台,因此导航解算采用的是捷联算法,在计算机内部建立有“数学平台”作为导航计算的参考坐标系,其系统的误差传播方程也和捷联惯导系统的误差传播方程一致,可以用下列式子表示^[5]:

$$\dot{\phi}^n = -\omega_{in}^n \phi^n + \delta\omega_{in}^n - C_b^n \delta\omega_{ib}^b \quad (1)$$

$$\delta\dot{v}^n = f^n \phi^n + C_b^n \delta f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \delta v^n - (2\delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n) v^n + \delta g^n \quad (2)$$

上式的 n 表示由数学平台构成的导航坐标系, b 表示由惯性组件构成的机体坐标系, i 表示惯性坐标系, e 表示地球坐标系。 ϕ 为数学平台的失准角度, v 和 δv 分别为数学平台的速度和速度误差, ω 和 $\delta\omega$ 分别为角速度和角速度误差, f 和 δf 分别为加速度计测量的力及其误差, δg 为重力偏差, C_b^n 为机体坐标系到导航坐标系的变换矩阵,即捷联矩阵。

在式(1)(2)中,由陀螺仪和加速度计测量的不准确所引起的误差项分别为 $\delta\omega_{ib}^b$ 和 δf^b ,所谓的误差补偿就是尽量减小 $\delta\omega_{ib}^b$ 和 δf^b 对系统导航结果的影响,而 $\delta\omega_{ib}^b$ 和 δf^b 需要在前面乘以 C_b^n 转化为导航坐标系中的分量表示才最终在误差方程中起作用。因此旋转自动补偿的本质即是周期性的改变 C_b^n 的值,从而使短时间内的 $C_b^n \delta\omega_{ib}^b$ 和 $C_b^n \delta f^b$ 的均值尽量接近零,以此来减小系统误差的积累,提高导航精度。

以单轴旋转为例,假设系统导航坐标系为地理坐标系 t ,东向、北向和方位陀螺的漂移分别为 ϵ_E 、 ϵ_N 、 ϵ_U ,初始时刻机体坐标系与东北天地理坐标系重合,如果从 0 时刻开始,系统绕竖直方向以角速度 ω 匀速连续转动,则有:

$$C_b^n \delta\omega_{ib}^b = \begin{pmatrix} \cos\omega t & -\sin\omega t & 0 \\ \sin\omega t & \cos\omega t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \epsilon_E \\ \epsilon_N \\ \epsilon_U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_E \cos\omega t - \epsilon_N \sin\omega t \\ \epsilon_E \sin\omega t + \epsilon_N \cos\omega t \\ \epsilon_U \end{pmatrix} \quad (3)$$

由上式可见,在加上绕竖直轴的旋转以后,从数学平台的角度来看,就相当于系统没有转动,只是陀螺漂移发生了下列改变:

$$(\epsilon_E, \epsilon_N, \epsilon_U) \rightarrow (\epsilon_E \cos\omega t - \epsilon_N \sin\omega t, \epsilon_E \sin\omega t + \epsilon_N \cos\omega t, \epsilon_U) \quad (4)$$

如果 ϵ_E 、 ϵ_N 、 ϵ_U 为常值,则等效的东向、北向陀螺漂移按正弦规律以周期 $2\pi/\omega$ 变化,使其在一个转动周期内均值为零,而方位陀螺的漂移 ϵ_U 引起的系统误差则随时间增长。由此可以看出,单轴旋转能够抵消敏感轴与转轴方向垂直的陀螺的常值漂移。事实上,转轴不一定与陀螺敏感轴垂直,在这种情况下,单轴旋转抵消的是系统陀螺的常值漂移在与转轴垂直方向上的分量。

1.2 元件级旋转补偿的光学陀螺惯导系统探讨

目前的光学陀螺系统普遍采用系统级的旋转方式来补偿误差,而没有采用元件级的旋转方式来平均掉漂移,这是由光学陀螺的特点决定的。

一般光学陀螺是一种速率积分陀螺仪,输出的是敏感轴相对于惯性空间的转动角增量,其漂移数据包含在此角增量之中,也就是说其漂移角速度方向永远和其敏感轴方向一致。如果采用元件级的旋转补偿方式,则每个光学陀螺的旋转方向应该和其漂移角速度方向垂直才能平均掉常值漂移,而这样的旋转必然使三个陀螺敏感轴之间的夹角随着时间而改变,即使我们能够精确测量陀螺相对于本体转动的角度,由于光学陀螺速率积分输出的特性,也不能由陀螺输出角增量精确求得机体坐标系转动的角增量,从而引起新的误差和问题。

因此采用元件级的旋转自动补偿方式对于光学陀螺惯导系统来说是不合适的。而采用系统级的旋转补偿方式,三个陀螺均固定于安装本体上,转动的是惯性测量组合,陀螺敏感轴之间的相对位置不会随着系统转动而改变,则不存在上述问题。

1.3 系统级旋转补偿的光学陀螺惯导系统探讨

由于静电陀螺是一种二自由度陀螺,相应的导航系统只需要2个陀螺即可。而光学陀螺是一种单轴陀螺,由其组成的导航系统一般需要3个陀螺。但是由以下的分析可以看出,光学陀螺系统级的旋转自动补偿,可以采用和静电陀螺平台转动方案^[6]一样的方式来实现,从而平均掉所有惯性元件的常值漂移或者慢漂。

设初始时刻陀螺的本地坐标系与东北天地理坐标系重合,相应的东北天方向的陀螺编号分别为I、II、III,初始位置为A,并令每次转动的角速度相同,如图1所示,光学陀螺惯性测量组合的转动次序可描述如下:次序1绕东向轴正转180°到达位置B,停止时间T;次序2绕天向轴正转180°到达位置C,停止时间T;次序3绕东向轴反转180°到达位置D,停止时间T;次序4绕天向轴反转180°到达位置A,停止时间T;然后,次序5~8按照1~4相反的方向转动惯性测量组合,循环不已。

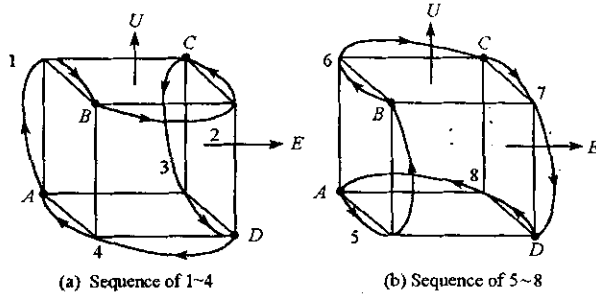


图1 惯性测量组合的转动次序

Fig.1 Rotating mechanism of IMU

上述转动次序就是周期性的改变 C_b^n 的值,使3个陀螺的敏感轴方向在一个转动循环周期内沿转动中心对称分布,对于常值误差来说,这样做必然使误差方程中的 $C_b^n \delta \omega_{ib}^b$ 在一个循环周期内的均值为零,从而减小了惯性元件常值误差的积累,提高了系统精度。

为了更清楚地说明这个问题,图2画出了常值漂移角速度矢量方向在上述转动下在空间的分布情况。图2(a)为任意的一个常值漂移矢量 ϵ 的方向分布图,图2(b)~(d)为每个陀螺的常值漂移方向分布图,显然图2(b)~(d)可以看作由图2(a)在只有单个陀螺的常值漂移时退化而成。由图2(b)可知I号陀螺敏感轴在2、4、6、8四个次序的转动中相当于绕天向轴的正反匀速运动,根据1.1节的分析,在此转动过程中的常值漂移是可以平均抵消掉的,而在1、5、3、7四个转动过程中和停留在A、B、C、D四个位置时,1、5、A、B与3、7、C、D时间内的I号陀螺的敏感轴刚好相反,所以常值漂移也能完全抵消。

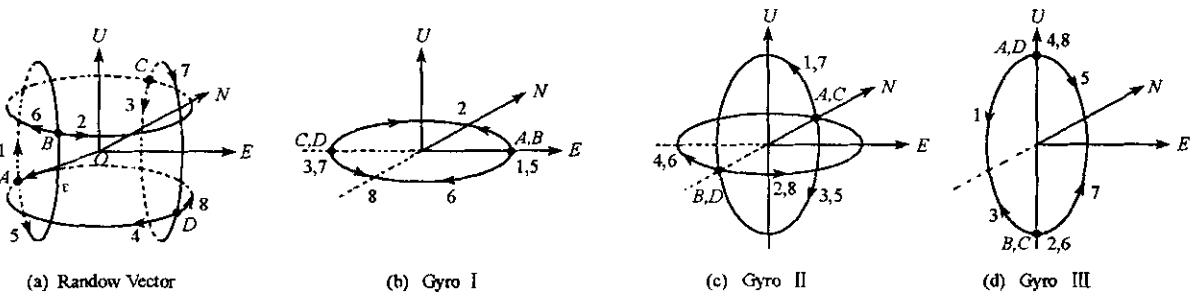


图2 常值漂移矢量在空间的分布图

Fig.2 Distribution of constant drift vector

可见在上述转动次序下,I号陀螺只存在绕天向轴的单轴转动,并且会在0、180°位置停留相同的时间。与此类似,III号陀螺只存在绕东向轴的单轴转动,而II号陀螺则可以看作绕天向轴的单轴转动和绕东向轴的单轴转动间隔进行,它们均在0、180°位置停留相同的时间。因此三个陀螺的漂移抵消情况也必然与1.1节中讨论的单轴情况类似。由于每个陀螺运动都是绕单轴正反转动的组合,在每个转动循环周期后,由系统转动引起的陀螺输出角度累加值刚好为零,如果转轴能够同时隔离外界的其他角运动,则陀螺比例因子和安装方位的变化将不会引起额外的导航误差积累。

2 系统级旋转自动补偿的仿真结果

在导航系统的仿真计算中,元件和环境假设如下:3个光学陀螺的常值漂移为 $0.01^\circ/\text{h}$,系统无其他误差因素,不考虑高度通道,并且初始时刻3个陀螺敏感轴与东北地理坐标系重合,处于北纬 45° 的位置。

图3是系统静止状态下的导航误差。图4是按照1.3节中次序旋转补偿下导航误差,惯性测量组合转动的角速度为 $6^\circ/\text{s}$,在每个位置停留时间为 30s 。图3、图4依次为纬度、经度、航向角、俯仰角、倾斜角、东向速度、北向速度的误差。注意图4中导航误差是每个转动周期后(即每 8min)计算一次得到,因此实际上由于转动的调制作用,任意时刻的航向角、俯仰角、倾斜角误差弥散分布在相应图中最大值和最小值之间的区域内。

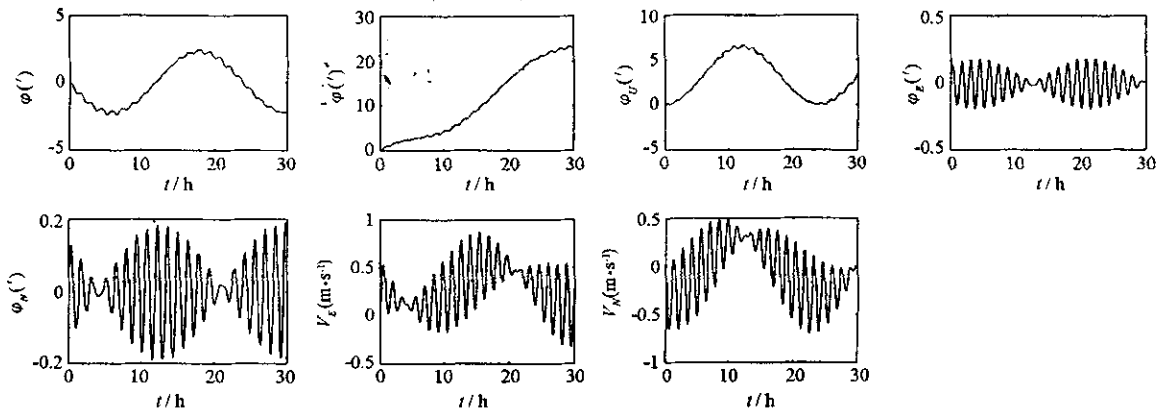


图3 系统静止状态下的导航误差

Fig.3 Navigation error in static state

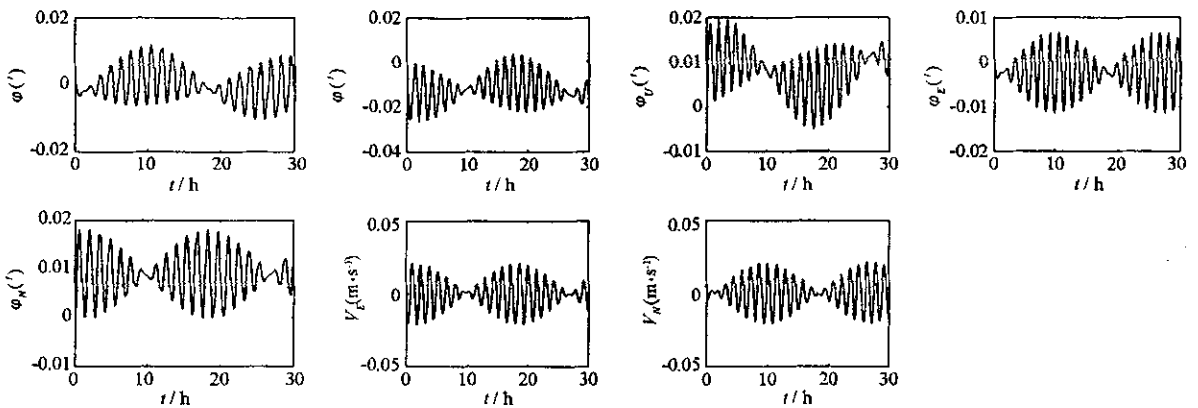


图4 系统旋转补偿下的导航误差

Fig.4 Navigation error under rotating auto-compensation

由图3和图4对比可以看出,系统旋转补偿后导航误差大幅度下降,达到了很高的导航精度。特别是经度误差,在静止导航下是发散的,30h后误差达22角分,而旋转后误差则以最大 0.02 角分的幅度震荡,提高了1000倍的精度。其他的纬度误差、航向角误差减小了2个数量级以上,俯仰角、倾斜角和速度误差则减小了1个数量级以上。

仿真时没有考虑加速度计的误差,事实上从第1节中的原理分析可以看出,加速度计的常值漂移矢量方向在上述转动情况下与图2是完全一致的,因此其常值误差也必然和光学陀螺一样得到抵消。另外在机动环境中,如果旋转惯导系统的转轴能够在隔离外界的角运动的同时保证IMU按照预定的次

序绕地理坐标系转动,则载体的机动不会对惯性元件的误差抵消情况产生影响。而要完全隔离外界角运动,则至少需要三个或者三个以上转轴才能完成,这也正是美国研制中的旋转光纤陀螺惯导系统没有采用两轴而采用三轴(原定为四轴)的原因所在。

3 结论

(1)从光学陀螺惯导系统的误差方程出发,可以解释旋转补偿的原理。进一步的分析表明了单轴旋转只能补偿惯性元件常值漂移在转轴垂直方向上的相应分量,与转轴一致方向上的漂移分量则不能得到自动补偿。

(2)对光学陀螺惯导系统来说,采用元件级的旋转方式会改变陀螺敏感轴之间的夹角,从而造成新的误差和问题,因此只能采用整个惯性测量组合转动的方案来补偿漂移。

(3)采用8次180°翻转的光学陀螺系统转动方案,能够补偿全部惯性元件的常值误差。对于每个陀螺来说,这种旋转方案都可以等效于一个单轴转动,或者两个单轴转动间隔进行,并且这些转轴都与陀螺敏感轴垂直,可以按照系统单轴旋转时的情况对这种方案进行误差分析。

(4)仿真结果表明,采用旋转技术后光学陀螺惯导系统克服了惯性元件的静态漂移,大大提高了导航输出的位置和姿态精度,从理论上来说,这是一种很有发展潜力的新一代高精度惯性导航系统。

致谢

本文作者的导师高伯龙院士就文中的观点与作者进行了许多有意义的讨论,启发了作者的思考,促进了本文的完成,最后他还仔细阅读修改了本文,在此向他表示深深的感谢!

参考文献:

- [1] Levinson E, San Giovanni C Jr. Laser Gyro Potential for Long Endurance Marine Navigation[A]. Rec. IEEE PLANS Position Location Navigation Symposium[C], Atlantic City, NJ: IEEE, Piscataway, NJ, 1980: 115-129.
- [2] Lahhan J I, Brazell J R. Acoustic Noise Reduction in the MK49 Ship's Inertial Navigation System(SINS) [A]. Rec. IEEE PLANS Position Location and Navigation Symposium[C], Monterey, CA, USA: IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1992: 32-39.
- [3] Heckman D W, Baretela L M. Improved Affordability of High Precision Submarine Inertial Navigation by Insertion of Rapidly Developing Fiber Optic Gyro Technology[A]. IEEE PLANS Position Location and Navigation Symposium[C], San Diego, CA, USA: IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2000: 404-410.
- [4] Morrow R B Jr, Heckman D W. High Precision IFOG Insertion into the Strategic Submarine Navigation System[A]. IEEE PLANS Position Location and Navigation Symposium[C], Palm Springs, CA: IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1998: 332-338.
- [5] Titterton D H, Weston J L. Strapdown Inertial Navigation Technology[M]. Second Edition. Lexington, Massachusetts, USA: Copublished by the American Institute of Aeronautics and Astronautics and the Institution of Electrical Engineers, 2004: 342-344.
- [6] 高钟毓. 静电陀螺仪技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 173-174.

