

3DF GPS接收机测定姿态角的原理

谢世杰

(北方交通大学科协工程测量研究所)

1991年7月23日收稿

摘 要

本文论述 3DF GPS 接收机测定姿态角的原理。内容包括接收机的基本结构、测定姿态角的原理、误差源和精度分析。初期结果表明,测定姿态角的精度约为 0.02° — 0.05° 。

关键词 GPS 姿态角

一、概 述

1990年9月,在美国召开的“第三届国际导航GPS学会”(10N GPS'90)会上,Ash-tech公司的3DF GPS接收机深受与会者欢迎,被评为“最佳产品奖”。3DF GPS接收机主要用于测定航空、航天遥感器的姿态角。它测定姿态角的原理为世人所关注。

3DF意即三维定向。3DF接收机可在每副天线上接收L1载波信号,可实时(每秒更新一次)求定姿态角(航向角 ϕ ,俯仰角 θ ,横向倾角 ψ),精度为1毫弧度,也可按静态方式实时测定三维坐标和速度。

3DF是一种具有24个通道的单频接收机,并有4副微带天线。天线外形具有较大的变化范围,可方便地安装在各种车船和飞行器上。机内有一台公用钟,可分别测量各副天线接收的信号。3DF既能实时精密测定姿态角,又能结合定位结果测量角度,而且不受地磁场的影响,是角度测量的理想工具。故可在全球范围内(包括南、北极区)测定各种运载工具的姿态角,也可用于实时测定车辆、舰船、飞机、卫星的坐标、方位、高度和速度。

3DF GPS接收机的体积为: $21 \times 20 \times 9$ cm,重4.1kg,功率12W。

二、基本结构

3DF接收机的24个通道分为4个通道库,每库6个通道,即“ 4×6 结构”。每库均有其各自的射频部分。4库之间互不干扰。图1是3DF接收机硬件的结构图。

第一库称为“主库”,利用此库可算出3DF系统的瞬时位置和速度。其他三库为“副库”,根据三个副库相对于主库的差分相位测量值,可求出姿态角。

“ 4×6 结构”是标准结构,主要用于求定三维姿态角。其它结构另有特殊用途。例如,“ 3×8 结构”只能用于测定精密方位角和高程。“ 2×12 结构”只能用于测定精密横向倾角。此系统具有两个RS-232接口,可实时输出数据,波特率为115 200,在同其它系统(例如惯性导航系统)结合时,这样高的波特率是很有用的。

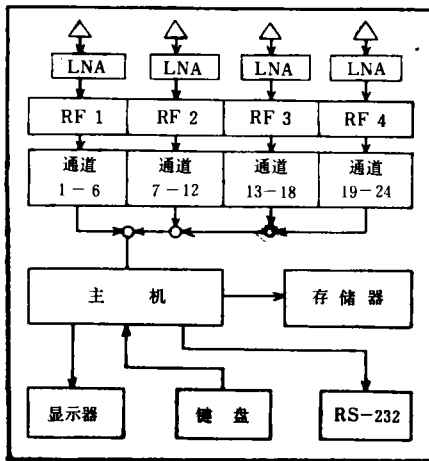


图 1 3DF 系统结构图

Fig. 1 3DF System Block Diagram

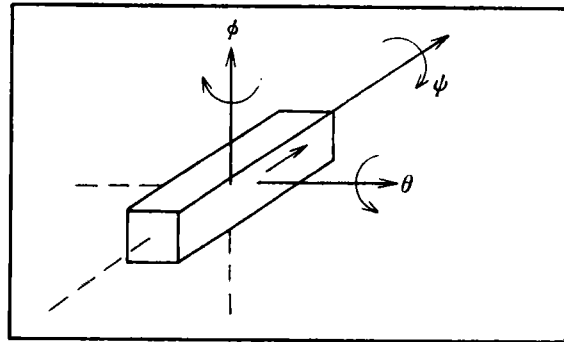


图 2 姿态角的定义

Fig. 2 The Definition of Attitude

三、测定姿态角的原理

姿态角(ϕ, θ, ψ)是以本系统的平板相对于坐标系的定向来定义的(见图 2)。航向角 ϕ 是平板垂直轴的旋转角。横向倾角 ψ 是绕平板纵向轴的旋转角。俯仰角 θ 是绕正交于由航向角和横向倾角定义的轴的旋转角。航向角以真北方向为准。俯仰角和横向倾角用标准定向(或水平面)的偏差来量度;向右倾斜为正,向左倾斜为负。正俯仰角表示平板向上,负俯仰角表示平板向下。

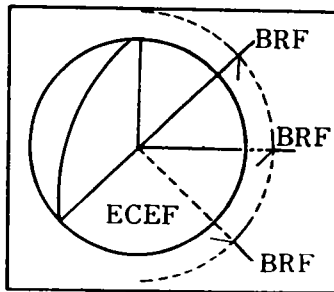


图 3 BRF 和 ECEF 之间的关系

Fig.3 Relationship between BRF and ECEF

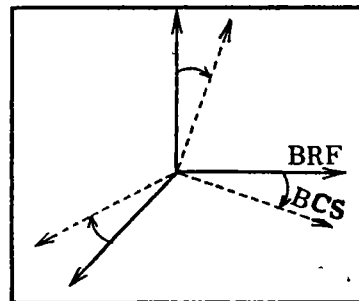


图 4 BCS 和 BRF 之间的关系

Fig.4 Relationship between BCS and BRF

平板的姿态角是在体参考标架(BRF)中计算的。BRF 的姿态角定义为 $(0, 0, 0)$, 即航向角、俯仰角和横向倾角均为零。BRF 同测站水平切面(LLT)坐标系保持固定不变。但它随地心地固坐标系(ECEF)而变化(见图 3)。就 3DF 系统而言,姿态角 $(0, 0, 0)$, 表示体固坐标系(BCS)同 BRF 的定向是一致的。平板改变方向后,BCS 的变化相应于 BRF。因此,平板的姿态角可简单地用 BCS 和 BRF 之间的旋转角来表示(见

图 4)。

在 3DF 系统中, 4 副天线是安装在刚体平板上, 在 BCS 中保持固定不变。因为天线对于平台的相对位置(向东、向北、向上, 或 ENU)为已知, 借助 BRF 定向时, 只需解算其相对位置, 即可求出平板的姿态角。为此, 可由下式用矩阵 T 得出:

$$B_{BCS} = T B_{BRF} \quad (1)$$

或

$$T = B_{BCS} B_{BRF}^{-1} \quad (2)$$

式中: B_{BRF} 是天线位置初始 ENU 坐标的列向矩阵; B_{BCS} 是天线位置现在 ENU 坐标的列向矩阵。

矩阵 T 是旋转矩阵的欧拉角, 由下式得出:

$$T = \begin{bmatrix} [s(\phi)s(\theta)s(\phi) + c(\phi)c(\phi)] & [c(\theta)s(\phi)] & [c(\phi)s(\theta)s(\phi) - s(\phi)c(\phi)] \\ [s(\phi)s(\theta)c(\phi) - c(\phi)s(\phi)] & [c(\theta)c(\phi)] & [c(\phi)s(\theta)c(\phi) + s(\phi)s(\phi)] \\ [s(\phi)c(\phi)] & [-s(\theta)] & [c(\phi)c(\theta)] \end{bmatrix}$$

式中 s 和 c 分别代表正弦函数和余弦函数。此矩阵的全部推导见文献[10]。

因此有:

$$\phi = \text{tg}^{-1}(T_{12}/T_{22}) \quad -\pi \leq \phi < \pi \quad (3)$$

$$\theta = -\text{tg}^{-1}(-T_{32}/[T_{22}\cos(\phi) + T_{12}\sin(\phi)]) \quad -\pi \leq \theta < \pi \quad (4)$$

$$\psi = -\text{tg}^{-1}(T_{31}/T_{33}) \quad -\pi \leq \psi < \pi \quad (5)$$

在动态环境中使用平板时, 天线位置是采用动态双差载波相位技术测出。如果组成 AB 向量的两副天线之间的模糊值已经解出, 则整数偏差可在以后用来解算其相对位置, 即使两副天线都处在运动中。Remondi 曾全面地论述了动态定位技术^[7]。此技术的基本方程如下:

$$D_{12}^i(t_1) = -\rho_{AB}^i(t_1) + N_{12}^i \quad (6)$$

$$D_{12}^i(t_2) = -\rho_{AB}^i(t_2) + N_{12}^i \quad (7)$$

$$D_{12}^i(t_2) - D_{12}^i(t_1) = -\rho_{AB}^i(t_2) + \rho_{AB}^i(t_1) \quad (8)$$

式中: N_{12}^i 是相位偏差。

$$\rho_{AB}^i(t) \equiv \rho_B^i - \rho_A^i - \rho_B^j + \rho_A^j \quad (9)$$

上列各式中 ρ_{β}^{α} 代表卫星 α 至天线 β 的距离。

必须指出, 在 t_1 和 t_2 时刻之间, 两天线 A 和 B 都一直处在运动状态。这种技术不要求天线保持不变。因为整数偏差在这段时间内保持常数(假定未发生周跳)。

由上述方程可见, 求定姿态角的过程是比较简单的。关键是要求解算出相位模糊值。目前, 解算相位模糊值的方法可归纳为下述两类:

1) 求定两基线之间的向量 (dx, dy, dz) 。当向量的三维分量为已知, 即不难解出相位模糊值。此向量一般可按静态、动态和交换天线等三种技术来获得^[3,9]。

2) 将已知数据进行最佳平滑后, 即可求出正确的相位模糊值。

第一类方法要求天线图形保持固定不变, 一直到解出模糊值为止。因此, 不能用于求定姿态角。近年来, Remondi 和 Hofmann-Wellenhof 等人已为第二类方法发展了多种技术^[2-5,7]。

为了解算初始相位, 专为 3DF 系统研究出整数搜索技术。这种技术是利用双差观测

值和两副天线之间的空间距离。因为任意两天线之间的距离为已知,不能提供正确距离的整数组合,将迅速被舍去。

实时操作时,利用短于 2m 的两副天线,一般在 1—2 秒钟内即可解出整数偏差。解出后,接收机内的处理器可在 0.05 秒更新每个历元的姿态角。第 4 副天线是快速解算模糊值的关键。

等到解出整数偏差后,即可用其解算每个历元的天线位置,一直到发生周跳为止。只要锁住载波,而且跟踪 4 个卫星、周跳是可以修复的。发生周跳后,为了解算模糊值,必须重新跟踪 4 个卫星。有关周跳的发现及其清除方法,详见文献[11,14]。

四、3DF 系统的精度

3DF 系统的标称精度,载波相位为 0.2mm,码相位为 1.0m,实时定位(GDOP < 6 时)为 20m,实时差分定位为 1.3m,测速精度(GDOP < 6 时)为 1.0cm/s。

但是,3DF 系统测定姿态角的精度,取决于基线长度、多径效应、卫星数和卫星图形以及接收机质量。现分述如下。

1. 基线长度

理论上,各天线之间相距越远,测定姿态角的精度就越高。假定:相对定位误差为 1mm,天线间的基线长度为 1m,则定位精度为 1 毫弧度。如基线长度增加到 2m,则定位精度为 0.5 毫弧度。由此似乎得出结论:如基线长度增加 10 倍,则定位精度也相应提高 10 倍。但事实上,由于多径效应,定位精度的提高倍数要低些。

2. 多径效应

3DF 系统测定姿态角的精度,主要受多径效应的制约。多径效应可分为两类:公共多径效应和微分多径效应。实践表明:相距较近的天线主要受公共多径效应的影响;利用双差技术可基本消去公共多径效应。经验证明,如两副天线在运动中相距越远,则每副天线就没有公共多径效应的影响。与此相反,微分多径效应则不能通过双差技术予以消除,它将影响定位精度。

利用公共底板可削弱多径效应的影响。Rath 论述了多径效应对测定姿态角的影响及削弱方法^[9]。

3. 卫星数和星座图形

目前,必须至少观测 4 个卫星才能测定姿态角。如果所测卫星数 > 4,则多余卫星的数据,一则可用作冗余校验;再则可缩短解算模糊值的时间。就观测精度而言,必须观测高度截止角大于 15°、PDOP 值较小的星座。卫星高度更小时,多径效应的影响将急剧增大,而且易于发生周跳。不应观测 PDOP 较大的星座,因为由此引起的高噪声将使点位变化加大。当相位噪声较大时,即使解出整数偏差,精度也会降低。试验证明:PDOP 应小于 20。

4. 接收机质量

为了防止各通道之间的相互干扰,3DF 的接收机内的 4 个射频之间是彼此隔离的。能否精确测量载波相位,是评定测定姿态角的精度标准。3DF 系统测定载波相位的精度

为 0.1mm。

五、初步结果和结论^[12]

利用动态技术可快速测定移动天线相对于固定天线的坐标差,结果精度为厘米级。将此结果作为 3DF 系统的精度比较标准。试验结果的统计表明,利用 3DF 系统测定姿态角的精度为:

$$\phi = \pm 0.02^\circ$$

$$\theta = \pm 0.04^\circ$$

$$\psi = \pm 0.05^\circ$$

初步结果表明,即使只有一个历元的数据,3DF 系统也可得出高于 1 毫弧度的姿态角。现已开发出一种技术,借助 1—2 秒钟的附加天线数据,即可解出初始相位的模糊值。

据报道,3DF 系统的下一步开发计划有二:

1) 3DF 系统同惯性测量系统相结合,利用 GPS 卫星和连续支持惯性测量系统进行角度测量;

2) 到目前为止,3DF 系统仅处理时速为 120km 的动态算法,还需要进行其它环境(例如舰船和飞机)的适用性研究。

参 考 文 献

- [1] Brown, R. A. et al.: GPS Positioning System Performance, Proc. ION, 1990.
- [2] Hatch, R. R.: Instantaneous Ambiguity Resolution KIS, 1990.
- [3] Hofmann-Wellenhof, Remondi, B. W.: The Antenna Exchange: One Aspect of High-Precision GPS Kinematic Survey. GPS-Techniques Applied to Geodesy and Surveying, 1988.
- [4] Hwang, P. Y. C.: Kinematic GPS: Resolving Integer Ambiguities on the Fly. IEEE, 1990.
- [5] Mader, G. L.: Ambiguity Function Techniques for GPS Phase Initialization and Solution. Proc. AGU, 1990.
- [6] Rath, J. et al.: Attitude Estimation Using GPS. Proc. ION, 1989.
- [7] Remondi, B. W.: Kinematic and Pseudo-Kinematic GPS. Proc. ION-1988.
- [8] Remondi, B. W.: Performing Centimeter Accuracy Relative Surveys in Seconds Using GPS Carrier Phase: Initial Results. NOAA TM NOS NGS-43, 1985.
- [9] Remondi, B. W.: Using the GPS Phase Observation for Geodesy: Modeling, Processing and Results. Univ. Texas, 1984.
- [10] Wertz, J. R.: Spacecraft Attitude Determination and Control. The Netherlands, 1978.
- [11] Westrop, J. et al.: Cycle Slips on the Move: Detection and Elimination. Proc. ION, 1989.

THE PRINCIPLE OF ATTITUDE DETERMINATION WITH 3DF GPS RECEIVER

Xie Shijie

(Engineering Surveying Institute of Northern Jiaotong University)

Abstract

The principle of attitude determination with 3DF GPS receiver are discussed. It consists of fundamental Architecture, the basic principle of attitude determination, error source and accuracy analyse. The preliminary results show, the accuracy of attitude determination is about 0.02° — 0.05° .

Key words GPS Attitude