

基于跟踪微分器的单天线 DGPS 定向测姿方法研究^{*}

苏鑫, 万彦辉, 谢波

(中国航天科技集团第16研究所, 西安 710100)

摘要: 设计了基于跟踪微分器的单天线 DGPS 定向测姿方法, 构造基于积分方法的跟踪微分器, 并将其用于 DGPS 速度的滤波和微分处理, 从而得到较精确的速度和加速度信息, 通过对载体运动模型的分析 and 数学推导, 得到计算载体姿态的方法。最后, 给出了该方法在车载系统中的仿真, 结果表明该方法可以提供有效的姿态信息, 可以成为常规姿态测量系统的备份。

关键词: 单天线 DGPS; 定向测姿; 跟踪微分器; 车辆导航

中图分类号: TN820.4 **文献标志码:** A

The Research on Single-antenna DGPS Determination Attitude Method Based on Tracking-differentiator

SU Xin, WAN Yanhui, XIE Bo

(The 16th Institute, China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710100, China)

Abstract: A single-antenna DGPS aiding attitude determination method was designed. A tracking-differentiator based on integral approximation was constructed. Using the TD, the DGPS velocity data could be filtered to better precise velocity and be differed to precise acceleration. By analyzing the kinetic model of body and establishing the mathematic model, the solution procedure of attitude determination using the velocity and acceleration of body was presented. In the end, the process of simulation of the solution and the error of attitude curves in the simulation system were presented. Simulation results and relative conclusion were provided. The results show that the method provides a useful source of attitude information and consequently may be used as a backup attitude system in vehicle navigation.

Keywords: single-antenna DGPS; directional attitude determination; tracking-differentiator; vehicle navigation

0 引言

跟踪信号以及求得其微分在很多领域都有着重要的意义, 例如速度推导加速度的过程。普通的差分法获得信号的微分误差大, 不适用于高速和高精度的测量系统。中科院韩京清研究员给出了非线性跟踪微分器(T-D)的设计过程, 使用积分的方法求微分, 所设计的跟踪微分器具有解析解, 能很好的跟踪在任意有限区域上积分有界的输入信号, 其应用于跟踪离散化的速度信号, 运算速度快, 适用于高速跟踪和微分系统^[2]。

目前多天线 GPS 测姿的技术已经非常成熟, 已达到了工程实用要求, 但是在车载系统中多天线 GPS 测姿系统安装难度大, 成本高。文中研究了一种车载导航系统中的单天线 DGPS 测姿方法, 通过差分技术, 单天线 GPS 可以提供的小于 1m 的定位精度和小

于 10cm/s 的测速精度, 此方法利用 DGPS 测得的速度结合跟踪微分器推导载体加速度, 计算载体的姿态。

1 单天线 DGPS 定向测姿技术的原理

为了便于讨论, 先作出以下定义:

1) 载体坐标系 (ox_b, y_b, z_b) , 原点位于载体的质心, y_b 为横滚轴, 沿纵轴指向载体的头部方向; x_b 为俯仰轴, 指向载体右方; z_b 为航向轴, 与 y_b, x_b 符合右手螺旋法则。

2) 当地地理坐标系 (ox_t, y_t, z_t) , 原点位于载体的质心, y_t 为沿参考椭球子午圈方向指向北; x_t 为沿参考椭球卯酉圈方向指向东; z_t 为沿参考椭球外法线方向指向天顶。

3) 轨迹坐标系 (ox_s, y_s, z_s) , 假设载体相对于当地地理坐标系的速度为 v , y_s 沿 v 方向, x_s 与 y_s 垂直且

^{*} 收稿日期: 2010-06-29

作者简介: 苏鑫(1983-), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 研究方向: 组合导航定位测姿。

指向载体的右方, z_s 与 x_s 、 y_s 符合右手螺旋法则。

4) 伪姿态, 轨迹坐标系相对于当地地理坐标系的转角关系, 用 $(\psi_s, \theta_s, \varphi_s)$ 表示。 ψ_s 为伪航向角, 是 y_s 在水平面上的投影与 y_i 之间的夹角; θ_s 为伪俯仰角, 是 y_s 与当地水平面之间的夹角; φ_s 为伪横滚角, 以 x_s 轴在水平状态时指向为参照轴, x_s 绕 y_s 转动的角度, 代表了可观察到的速度矢量的侧向变化率。

5) 常规姿态, 该姿态是机体坐标系相对地理坐标系的转角关系, 用欧拉角 (ψ, θ, φ) 表示。 ψ 为偏航角, 是 y_b 在水平面上的投影与 y_i 之间的夹角; θ 为俯仰角, 是 y_b 与当地水平面之间的夹角; φ 称为横滚角, x_b 与水平面的夹角角度。

常规姿态和伪姿态的关系可以描述为 $\psi_s = \psi + \beta$, $\theta_s = \theta + \alpha$, 其中 β 为侧滑角, 是指载体的横轴方向与速度在水平面投影的夹角, α 是攻角, 是指载体的纵轴方向与速度在纵向对称面投影的夹角, 当侧滑角 $\beta = 0$ 时, 攻角定义为速度矢量与飞行载体纵轴之间的夹角。横滚角与伪横滚角之间的差别极其微小, 可以忽略。对于大动态运动载体, 如飞机、导弹等, 侧滑角与攻角较大, 可以通过安装的传感器方便测出二者的值, 进行传统姿态角与伪姿态角之间的转换; 像汽车之类的低动态运动体, 侧滑角和攻角几乎为零, 认为 $\psi_s \approx \psi$, $\theta_s \approx \theta$, 可以通过伪姿态角反映载体的常规姿态变化。

利用 DGPS 接收机可以得到 GPS 天线相对于地球运动的速度分量 v_e, v_n, v_u , 然后通过微分的方法求取加速度 a_e, a_n, a_u , 通过前面的定义, 按照图 1 所示, 伪航向角(以北偏东为正, 范围为一

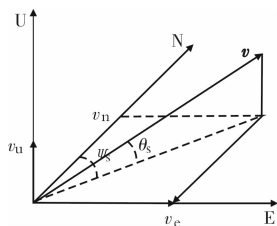


图 1 伪航向角和俯仰角

180°~180°) 可以通过 DGPS 天线的东向和北向速度得到:

$$\psi_s = \begin{cases} \arctan(v_e/v_n) & \text{if } v_n > 0 \\ \pi - \arctan(v_e/v_n) & \text{if } v_n < 0, v_e > 0 \\ -\pi + \arctan(v_e/v_n) & \text{if } v_n < 0, v_e < 0 \end{cases} \quad (1)$$

通过天向速度和地速求出伪俯仰角:

$$\theta_s = \arctan(v_u / \sqrt{v_e^2 + v_n^2}) \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta_s \leq \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

下面介绍如何通过加速度和载体速度计算载体的伪横滚角, 首先将加速度 \mathbf{a} 分解为 \mathbf{v} 的切线方向和法线方向分量, 并将切向分量和法向分量表示为 a^t 和 a^n , 则:

$$\begin{cases} a^t = \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{v}}{|\mathbf{v}|^2} \mathbf{v} = [a_e^t \ a_n^t \ a_u^t] \\ a^n = \mathbf{a} - a^t = [a_e^n \ a_n^n \ a_u^n] \end{cases} \quad (3)$$

同样的把东北天坐标系中的重力加速度 $\mathbf{g} = [0 \ 0 \ -g_0]$ 也沿 \mathbf{v} 的切线方向和法线方向分解为 g^t 和 g^n , 则:

$$\begin{cases} g^t = \frac{\mathbf{g} \cdot \mathbf{v}}{|\mathbf{v}|^2} \mathbf{v} = [g_e^t \ g_n^t \ g_u^t] \\ g^n = \mathbf{g} - g^t = [g_e^n \ g_n^n \ g_u^n] \end{cases} \quad (4)$$

由于在实际运动过程中, 法方向的加速度分量 a^n 是由提升加速度 \mathbf{l} 和沿速度法方向的重力加速度分量 g^n 合成的, 那么在此提升加速度 \mathbf{l} 可以视为由载体的举力和重力合力产生, 此方向始终指向稳定坐标系 z_s 轴, 故存在如下关于加速度合成的表达式(合成关系如图 2 所示):

$$\mathbf{l} = a^n - g^n \quad (5)$$

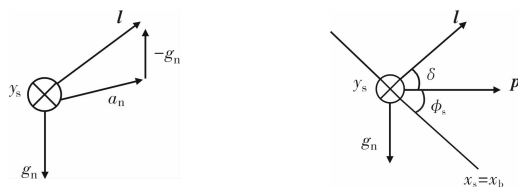


图 2 提升加速度示意图

图 3 伪横滚角示意图

利用 \mathbf{g} 和 \mathbf{v} 可以构造一个水平参考向量 \mathbf{p} , 见图 3,

$$\mathbf{p} = \mathbf{g} \times \mathbf{v} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & -g_0 \\ v_e & v_n & v_u \end{vmatrix} = g_0 v_n i - g_0 v_e j \quad (6)$$

\mathbf{l} 和 \mathbf{p} 的夹角为:

$$\delta = \arccos\left(\frac{\mathbf{l}^T \mathbf{p}}{|\mathbf{l}| |\mathbf{p}|}\right) \quad (7)$$

由图 3 可以得到伪横滚角为:

$$\varphi_s = \frac{\pi}{2} - \delta = \arcsin\left(\frac{\mathbf{l}^T \mathbf{p}}{|\mathbf{l}| |\mathbf{p}|}\right) \quad -\frac{\pi}{2} \leq \varphi_s \leq \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

此时, 载体的三个伪姿态角已经全部求出。

2 跟踪微分器的设计和仿真

速度推导加速度用微分的方法实现, 但是普通的差分法获得信号的微分误差大, 不适用于高速和高精度的测量系统, 文献[2]提出的非线性跟踪微分器(T-D)的设计过程, 使用积分的方法求微分, 能很好的跟踪和微分在任意有限区域上积分有界的输入信号, 适用于高速跟踪和微分系统。跟踪微分器是自抗扰控制技术的一项关键技术, 具有广泛的应用范围, 其最大的特点是可以摆脱对系统数学模型的依赖, 根据对象的某些实时信息即可以实现滤波。对于对象中某些含有的噪声, 适当调整 T-D 中的控制参数, 可以得到良好的滤波特性。

2.1 最速离散跟踪微分器

非线性跟踪微分器是一个这样的系统: 对它输入一个信号 $v(t)$, 它将给出跟踪 $v(t)$ 的信号 $x_1(t)$ 和 $x_1(t)$ 的微分信号 $x_2(t)$, 如果 $x_1(t)$ 能快速、精确的

跟踪 $v(t)$, 则可以把 $x_2(t)$ 当作 $v(t)$ 的微分。

二阶最速离散跟踪微分器如下:

$$\begin{cases} fh = fhan(x_1(k) - v(k), x_2(k), r, h_0) \\ x_1(k+1) = x_1(k) + h * x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h * fh \end{cases} \quad (9)$$

其中: h 为积分步长, 一般的取值小于等于系统的采样时间 T , $x_1(t)$ 跟踪输入信号 $v(t)$, $x_2(t)$ 跟踪 $v(t)$ 的导数, 函数 $fh = fhan(x_1, x_2, r, h_0)$ 表示如下:

$$\begin{cases} d = r * h_0^2 \\ a_0 = h_0 * x_2 \\ y = x_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d * (d + 8 * |y|)} \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y) * (a_1 - d) / 2 \\ a = (a_0 + y) * \text{fsg}(y, d) + a_2 * (1 - \text{fsg}(y, d)) \\ fhan = -r * (\frac{a}{d}) * \text{fsg}(a, d) - r * \text{sign}(a) * \\ (1 - \text{fsg}(a, d)) \\ \text{fsg}(x, d) = (\text{sign}(x + d) - \text{sign}(x - d)) / 2 \end{cases} \quad (10)$$

系统中有两个可调参数 r, h_0 , 其中 r 称为速度因子, 决定跟踪速度, h_0 为滤波因子, h_0 越大滤波效果也越好。

输入信号 $v(t) = \sin t + 0.1 * \text{randn}(1)$, 这个信号被均值为 0、均方差为

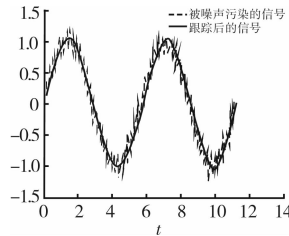


图4 跟踪微分器滤波功能

0.1 的白噪声污染, 按照图 4 所示, 跟踪微分器具有较好的滤波功能。对于信号存在噪声的情况下, 综合调整跟踪微分器的参数 r 和 h_0 , 可以实现信号的快速跟踪、滤波和微分。

2.2 使用跟踪微分器实时获取速度和加速度

使用跟踪微分器对被噪声污染的信号进行滤波时, 滤波越好, 信号的相位损失就越严重, 影响了跟踪的实时性。对于跟踪 DGPS 速度和加速度的场合, 这些相位的延时不能满足实时性要求, 所以要对其进行相位补偿, 减少相位损失。减少相位损失的一种办法是“先预报后微分”, 即使用最近一个时刻的微分值对信号进行 1~1.5 倍步长的预报, 然后对其进行跟踪微分处理达到信号的实时处理, 具体数学模型为:

$$\begin{cases} \hat{v}(k) = v(k) + p * h * x_2(k) \quad h < p < 1.5h \\ fh = fhan(x_1(k) - \hat{v}(k), x_2(k), r, h_0) \\ x_1(k+1) = x_1(k) + h * x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h * fh \end{cases} \quad (11)$$

具体到文中, 选择步长 h 小于 DGPS 的采样时间 T_G 可以保证当前时刻的微分值尽可能的接近下一时刻的微分值, 保证了实时跟踪的速度和加速度的精度。

3 系统仿真和误差分析

基于跟踪微分器的单天线 DGPS 测姿仿真模型由轨迹发生器、跟踪微分器和伪姿态计算三个部分组成, 轨迹发生器用来模拟真实的运动轨迹, 给出载体的位置、速度和姿态的理想信号, 速度信号加入白噪声模拟为 DGPS 输出的速度信号, 对其进行跟踪微分处理, 得到载体的速度和加速度, 通过速度和加速度的计算推导出系统输出载体的伪姿态。仿真系统最后给出姿态误差分析模块, 根据姿态误差验证了算法的有效性。

仿真中, 使用轨迹发生器产生一条包括有车辆起步加速、匀速、转弯、爬坡、下坡、上盘山路、紧急刹车、减速等典型运动轨迹的路径, 利用轨迹发生器输出的速度加入白噪声模拟 DGPS 的输出, 进行姿态解算的仿真验证, 输出姿态和真实姿态的误差曲线见图 5。

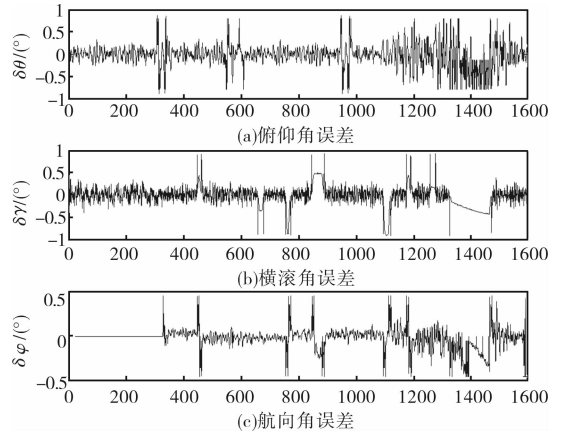


图5 解算姿态和真实姿态的误差

由图 5 的误差曲线可以看出, 当车辆进行直线和小角度转弯时, 单天线 DGPS 测姿方法可以得到较精确的姿态信息, 三维姿态角误差均能保持在 $0.2^\circ \sim 0.3^\circ$; 当进行大角度转弯开始和结束或者缓慢行驶时, 系统输出的姿态误差较大, 但三维姿态角误差均能保持在 1° 之内, 能满足常规中低精度姿态测量系统的要求。

GPS 失锁的讨论, 实时处理中, GPS 失锁时系统无有效信源可用, 根据车辆运动的特点, 失锁后 5s 左右的时间, 可以暂时认为俯仰角和横滚角不会变化, 但是航向状态是无法预知的; 失锁 5s 后, 车辆的姿态完全不可测量。

4 结论

分析了基于单天线 DGPS 测姿系统, 其特点是放弃冗繁的多天线 GPS 接收机信号处理测姿方法, 此