

# 卫星导航接收机测速精度测量方法研究

何 羚, 秦开宇

(电子科技大学空天科学技术研究院 成都 610054)

**【摘要】**以GPS为例, 研究卫星导航接收机动态测量精度的测量方法。讨论了被动式导航接收机的测速原理, 阐述了卫星导航信号模拟源产生信号的基本方法, 说明通过调节模拟源中各延迟环节的时延量, 即可模拟产生相对于载频的频偏, 以此作为接收机动态的理论真值并与实际测量值相比较, 可获得包括速度在内的动态测量精度。在理论分析的基础上介绍了基于模拟源的接收机测速精度测量的实现方法。

**关键词** 载波; 频移; 测速; 导航接收机; 卫星导航信号模拟源  
**中图分类号** TN967.1 **文献标识码** A

## Study of Precision Measurement Methodology of Motion Velocity Measuring for Satellite Navigation Receiver

HE Ling and QIN Kai-yu

(Institute of Astronautics and Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** It's necessary to evaluate the performance of satellite navigation receivers regularly. Due to the limitation of available instruments and related measuring methods, however, It is very difficult to verify the precision of motion velocity measurement of the receivers. For this reason, one of the measurement methodologies for dynamic measuring implemented by navigation receiver is reported on the background of global positioning system (GPS). The principle for passive motion velocity measuring of navigation receivers is discussed, and the fundamental architecture of navigation signal simulator which imitates and generates satellite signals is analyzed. An expected carrier wave frequency-shifting, by which the theoretic values of motion velocity would be derived, can be obtained via careful adjustment of time delay of the navigation signal simulator, and the measurement precision of receivers can be sequentially certificated via comparing the theoretic values with practical measured values. Provided with the preceding arguments, an approach for precision measurement of motion velocity is eventually presented based on the simulator.

**Key words** carrier wave; frequency shifting; motion velocity measuring; navigation receiver; satellite navigation signal simulator

卫星导航接收机等用户设备是卫星导航系统中的重要组成部分。随着卫星导航系统应用深度和广度的拓展, 对接收机的性能要求日益提高。我国正在着力完善北斗二代自主卫星导航系统的建设, 亟需开展与接收机性能指标测试、校准及检定等相关的研究, 为用户设备的研制、生产提供快捷有效的开发测试与校准验证手段。

卫星导航接收机的测量精度(包括静态测量精度、动态测量精度)是入网检测必须进行的测试项目之一。静态测量精度主要指测距、定位精度, 通常较易对其实现检定; 动态测量精度主要指接收机对

载体的移动速度、加速度及加加速度等进行测量的精度。在检定接收机动态参数测量精度时, 由于采用RTK(real-time kinematics)技术的载波相位型接收机动态定位精度可达厘米级<sup>[1]</sup>, 理论上应选用精度高10倍以上的设备作为比较标准进行检定, 而目前可达到这一要求的测量设备尚未出现。因此, 要实现导航接收机动态测量精度的鉴定是很困难的<sup>[2]</sup>。

卫星导航信号模拟源通过对系统导航信号模拟仿真、精确建模和接收机载体运动轨迹模拟, 生成导航仿真数据和射频信号, 可以实现对不同环境下接收机性能指标的考核。如果能够将模拟源设定为

根据载体运动的轨迹产生相应的动态导航信号, 则在任何时刻, 载体的位置和速度、目标到卫星的距离、距离变化率都是精确已知的。故只要将接收机测量的各个时刻的伪距、距离变化率与其已知的理论值相比较, 就可以得到接收机的动态测量精度。遵循上述基本思路, 可利用模拟源来检定接收机的动态测量精度<sup>[3]</sup>。

鉴于我国北斗二代的运行机理类似于GPS系统, 故本文以GPS系统为例, 在讨论导航接收机测速原理及卫星导航信号模拟源基本原理的基础上, 介绍一种简单易行的接收机测速精度的测量方法。尽管国外非授权用户无法使用GPS系统的P码, 事实上, 无论P码、C/A码以及北斗二代卫星导航系统的测距码, 本质都是按照某特定多项式构造的伪随机序列(pseudo-random number, PN)码。因此, 本文使用伪随机码来统一表示C/A码、P码或北斗二代等其他类似卫星导航系统的测距伪码。此外, 本文中所说的接收机运动载体速度均为地速, 而非三维速度。

### 1 GPS接收机测速原理

GPS接收机的测速方法可根据原理分为被动式、主动式两大类, 其中被动式测速应用较广泛, 易于实现全天候、全测程和高精度测速<sup>[4]</sup>。采用被动测速方式的运动载体只要安设GPS接收机, 便可按照用户所要求的时间间隔, 在动态定位的同时实时测得整个运行轨道上各点处的运行速度, 运行载体本身不需要发射任何信号<sup>[5]</sup>。

根据物理学中关于线速度的定义, 被测运动载体的速度为运动质点在单位时间内的距离变化率。接收机运动载体的三维速度 $(\dot{X}_u, \dot{Y}_u, \dot{Z}_u)$ 与站星距离变化率 $\rho'_j$ 之间的关系式为:

$$\rho'_j = [(X_j - X_u)(\dot{X}_j - \dot{X}_u) + (Y_j - Y_u)(\dot{Y}_j - \dot{Y}_u) + (Z_j - Z_u)(\dot{Z}_j - \dot{Z}_u)]/\rho_{ji} + c(\dot{\tau}_r - \dot{\tau}_s^j) + \dot{L}_{ion}^j + \dot{L}_{trop}^j \quad (1)$$

式(1)中, 各参量的含义定义如下:

(1)  $(X_j, Y_j, Z_j)$ 为第 $j$ 颗GPS卫星的位置, 由星历参数计算而得;  $(X_u, Y_u, Z_u)$ 为运动载体的位置, 由GPS信号实测结果计算而得, 可视为已知量。

(2)  $\rho_{ji}$ 为伪距, 由 $(X_j, Y_j, Z_j)$ 、 $(X_u, Y_u, Z_u)$ 计算而得, 可视为已知量。

(3)  $\rho'_j$ 为站星距离变化率, 由GPS接收机按下式测得:

$$\rho'_j = [N - (f_u - f_j)\Delta T](c/f_u)/\Delta T \quad (2)$$

式中  $f_u$ 为GPS接收机实际接收的载波频率;  $f_j$ 为第 $j$ 颗GPS卫星发射的载波频率;  $N$ 为GPS接收机实测的积分多普勒频移计数;  $c$ 为电磁波的传播速度;  $\Delta T$ 为GPS接收机测速更新率, 即由用户拟定的测速时刻 $t_1$ 、 $t_2$ 之间的时间间隔。这些参数均已知, 因此 $\rho'_j$ 也可视为已知量。

(4)  $d\dot{\tau}_r$ 为接收机时钟偏差变化率(钟速), 一般为1 ns/s。当测速精度要求达到每秒亚米级甚至更高精度时, 必须考虑 $d\dot{\tau}_r$ 的影响。

(5)  $d\dot{\tau}_s^j$ 为卫星时钟偏差变化率, 小于0.1 ns/s, 可略去。

(6)  $\dot{L}_{ion}^j$ 、 $\dot{L}_{trop}^j$ 分别为电离层、对流层的时延变化率。因测速间隔通常较短(秒级), 故有 $\dot{L}_{ion}^j = \dot{L}_{trop}^j = 0$ 。

(7)  $(\dot{X}_j, \dot{Y}_j, \dot{Z}_j)$ 为GPS卫星的三维运行速度, 有:

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_j^1 &= \frac{1}{q}(X_j^2 - kX_j^1) \\ \dot{Y}_j^1 &= \frac{1}{q}(Y_j^2 - kY_j^1) \\ \dot{Z}_j^1 &= \frac{1}{q}(Z_j^2 - kZ_j^1) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $k$ 、 $q$ 为与地球引力、卫星轨道等有关的参量, 均可计算求得; 上标1、2分别表示接收机在测速的 $t_1$ 、 $t_2$ 两个时刻所获得的数据。为了解算 $\dot{X}_j, \dot{Y}_j, \dot{Z}_j$ , 测速之前先使动态接收机处于静止状态, 即有 $\dot{X}_u = \dot{Y}_u = \dot{Z}_u = 0$ , 按式(3)即可求得 $(\dot{X}_j, \dot{Y}_j, \dot{Z}_j)$ 。

由上述对式(1)的分析可见, 当接收机的测速精度要求较高时, 共有动态接收机的三维速度 $(\dot{X}_u, \dot{Y}_u, \dot{Z}_u)$ 、接收机时钟钟速 $d\dot{\tau}_r$ 四个未知数<sup>[6]</sup>。故观测四颗在视卫星, 联立四个方程可解得 $(\dot{X}_u, \dot{Y}_u, \dot{Z}_u)$ 、 $d\dot{\tau}_r$ , 再根据下式求得地速为:

$$v_k = \sqrt{\dot{X}_u^2 + \dot{Y}_u^2 + \dot{Z}_u^2} \quad (4)$$

在实际工作中, GPS接收机即按上述过程进行解算, 获得定位及测速结果。由此还可进一步求解得到加速度、加加速度等参数。

### 2 卫星导航信号模拟源基本结构

卫星导航信号模拟源的基本构成如图1<sup>[7-8]</sup>所示。由图1可推知任一单颗卫星(设编号为 $j$ )输出信号的表达式为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{aligned} S^j(t) &= C^j(t)D_c^j(t)A_{c_1} \cos(2\pi f_1^j t + \varphi_{c_1}^j) + \\ &P^j(t)D_p^j(t)A_{p_1} \sin(2\pi f_1^j t + \varphi_{p_1}^j) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 上标 $j$ 为卫星编号; 下标 $1$ 表示某一频点的信号; 下标 $p$ 表示精密测距码; 下标 $c$ 表示普通测距码;  $C^j(t)$ 为第 $j$ 颗卫星发射的伪随机普通测距码信号;  $P^j(t)$ 为第 $j$ 颗卫星发射的伪随机精密测距码信号;

$D^j(t)$ 为调制在第 $j$ 颗卫星信号测距码上的导航电文数据;  $A$ 为调制在第 $j$ 颗卫星上各频点载波的信号幅度;  $f_1$ 为第 $j$ 颗卫星的载波频率;  $\varphi^j$ 为第 $j$ 颗卫星的初始相位。

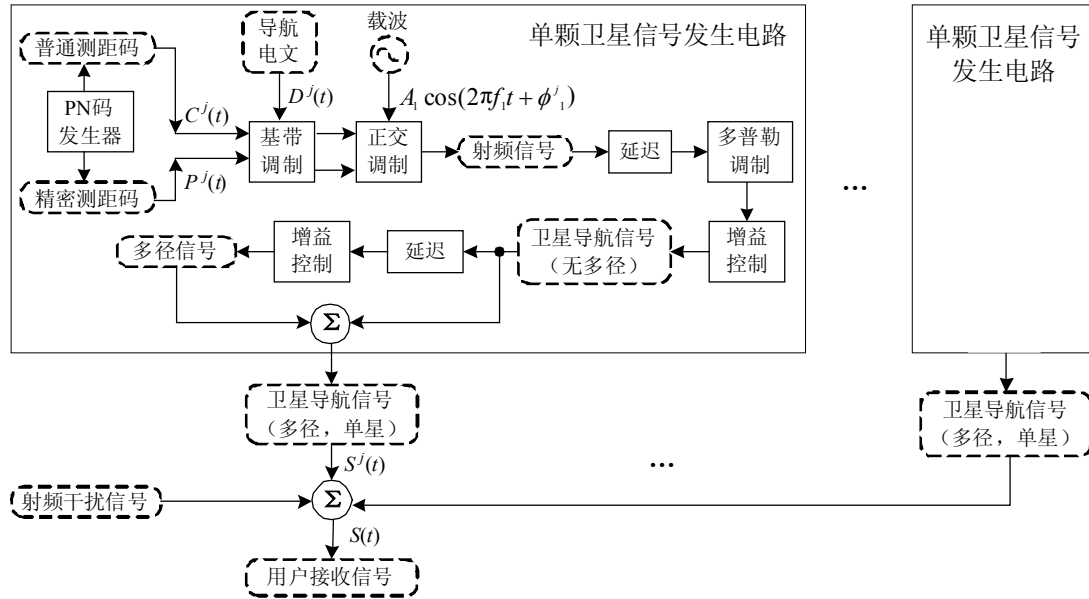


图1 卫星导航信号模拟源的基本构成图

如果仅考虑普通测距码, 上式可简化为:

$$S^j(t) = C^j(t)D^j(t)A_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1^j) \quad (6)$$

考虑图1中的各调制、延迟环节, 为更方便地表示可精密控制的时延量的大小, 将式(6)改写为:

$$S^j(t) = C^j(t - \tau^j(t))D^j(t - \tau^j(t)) \times A_1 \cos(2\pi f_1(t - \tau^j(t)) + \varphi_1^j) \quad (7)$$

式中  $\tau^j(t)$  为由模拟源中各延迟环节引起的总时延。最终输出的到达接收机端的卫星信号 $S(t)$ 应为:

$$S(t) = \sum_j [C^j(t - \tau^j(t))D^j(t - \tau^j(t)) \times A_1 \cos(2\pi f_1(t - \tau^j(t)) + \varphi_1^j)] \quad (8)$$

式中 载波频率 $f_1$ 亦即式(2)中第 $j$ 颗卫星发射的载波频率 $f_j$ 。

通过精密调节卫星导航信号模拟源中的  $\tau^j(t)$ , 可模拟产生相对于载波频率的偏移。在已对模拟源总延迟  $\tau^j(t)$  进行了标定的情况下(模拟源的校准和标定方法不在本文讨论范围之列), 由其量值可推导出接收机各个测量时刻的伪距、距离变化率的理论值, 并以此作为接收机动态的理论真值, 与实际测量值相比较, 最终可获得包括速度在内的动态测量精度。由此实现接收机测速精度的测量。

## 4 基于卫星导航信号模拟源的接收机测速精度测量的实现

### 4.1 测量原理

设模拟源输出的载波频率为 $f_j(t)$ , 在不存在任何频移的条件下, 接收机所测得的载波频率 $f_u(t)$ 理论上应与之相等, 即有 $f_j(t) = f_u(t)$ 。但在电磁波实际的传播过程中不可避免要受到大气层的影响, 以及接收机相对地球表面运动而造成的多普勒效应影响, 因而产生 $f_j(t)$ 和 $f_u(t)$ 的差异, 即 $f_u(t)$ 相对于 $f_j(t)$ 产生了频移。该频移反映在接收机上, 使得接收机测得积分多普勒频移计数 $N$ 。载波多普勒频移计算公式为<sup>[10]</sup>:

$$f_d = \frac{f_j}{c} \frac{d\rho}{dt} \quad (9)$$

式中  $\rho$ 为导航卫星和用户接收天线之间的距离(站-星距离);  $f_j$ 为卫星发射的载波频率;  $c$ 为光速;  $d\rho/dt$ 为单位时间内的站星距离变化率。

对模拟源而言, 通过调节  $\tau^j(t)$  而产生的频移 $f_d(t)$ 是确知的, 故可由多普勒频移公式直接计算得到站星距离变化率为:

$$\dot{\rho}'_{j_0} = \frac{d\rho}{dt} = c \frac{f_d(t)}{f_j(t)} \quad (10)$$

以  $\dot{\rho}'_{j_0}$  作为运动载体地速的理论真值  $v_{k_0}$ 。

从模拟源输出卫星星历数据、载波频率和频移, 通过接收机读取速度值。多次调节载波频率, 读取相应的运动载体测速值。例如, 共进行 $n$ 次测速, 将实测值 $v_{k_i}$  (其中 $i = 1, 2, \dots, n$ )与理论真值 $v_{k_0}$ 进行均方差计算, 可得接收机的绝对测速精度<sup>[11]</sup>为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (v_{k_i} - v_{k_0})^2}{n}} \quad (11)$$

为了消除模拟源本身的频偏, 可通过高等级精度的频率源进行校准, 以保证 $f_d(t)$ 的输出准确度。对于接收机本身的本振信号频偏, 则应使模拟源输出相当于接收机“零速度”的频移, 并用接收机进行测速, 根据其实测值进行本振频偏的校“0”。

#### 4.2 测量方案

将模拟源与接收机通过射频有线连接。设置模拟源输出模拟卫星星历、载波频率, 并设置 $f_d(t) = 0$ 。记录当前接收机显示的速度 $v_1$ 。

再次设置模拟源输出模拟卫星星历、载波频率及一定的频移, 并使接收机显示测速值。重复本步骤共 $n$ 次, 分别记录接收机显示的速度 $v'_i$ , 其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。按照下式计算均方差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (v'_i - v_1 - v_{k_0})^2}{n}} \quad (12)$$

#### 4.3 测量精度估计

常数和参量计算本身所带来的误差很小或可通过算法消除, 只有接收机测得的伪距 $\rho_{ji}$ 和站星距离变化率 $\dot{\rho}'_j$ 的精度对总测速精度影响最大。为估算总测速精度, 由误差合成公式进行推导的过程过于复杂。考虑速度的理论真值计算式, 如果该式的测量精度能够达到测速精度要求的10倍, 即可采用该方法对用户机测速精度进行检定。

由式(9)估计地速理论真值的精度<sup>[11]</sup>为:

$$\sigma_v = \sqrt{\left(\frac{c}{f_j} \sigma_{f_d}\right)^2 + \left(\frac{c f_d}{f_j^2} \sigma_{f_j}\right)^2} \quad (13)$$

式中 $\sigma_{f_d}$ 为模拟源输出多普勒频移的精度;  $\sigma_{f_j}$ 为模拟源输出载波频率的精度。为简单计, 取 $\sigma_{f_d} = \sigma_{f_j} = \sigma_f$ , 则式(13)可写为:

$$\sigma_v \approx \frac{c \sigma_f}{f_j} \sqrt{1 + \left(\frac{f_d}{f_j}\right)^2} \approx \frac{c \sigma_f}{f_j} \quad (14)$$

如当 $f_j$ 取保守值1.2 GHz时, 只要模拟源的输出频率准确度达到4%, 就可满足 $\sigma_v < 0.01$  m/s, 亦即上述方法可用以对测速精度要求在0.1 m/s量级的接收机进行检定。对于信号源而言, 输出频率准确度量级通常在 $10^{-6}$ , 易于满足本文所述的测量需求。

## 5 结束语

为了寻求可行的检定导航接收机动态测量精度的方法, 本文致力于研究一种简单易行的测速精度测量方法, 其思路可推广到卫星导航设备的定型、验收、入网测试等测试计量应用。鉴于我国的北斗一代卫星定位系统应用不及GPS广泛, 北斗二代系统还在建设完善中, 因此由研究GPS相关技术入手, 可为北斗二代卫星通信系统及其相关设备的研发、测试提供技术参考。

### 参 考 文 献

- [1] 罗满建, 廖超明, 冯一军. RTK测量精度检定方法探讨[J]. 测绘通报, 2004, 42(12): 31-33+49.
- [2] 赵军祥, 张其善, 常 青, 等. 高动态GPS卫星信号模拟器关键技术分析及应用[J]. 电讯技术, 2003, 32(4): 50-55.
- [3] CORBELL P M, MILLER M. Design and analysis of a matlab based digitized IF GPS signal simulator and a simulink based configurable GPS receiver[C]//IONGPS 2000. Salt Lake: Institute of Navigation Inc, 2000.
- [4] 陆学智, 张文林, 谢世杰. 全球定位系统测量接收机的性能分析[J]. 测绘通报, 2004, 42(11): 23-25.
- [5] ZHU Jun, TANG Bin, WU Wei, et al. Design and implementation of a cueing wideband digital EW receiver [J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2006, 4(3): 257-264.
- [6] KREISHER E, NASUTL T, STEVES C. Evaluation of GPS receiver ranging accuracy[C]//Position Location and Navigation Symposium. Las vegas: IEEE Aerospace and Electronics Systems Society, 1990.
- [7] AGILENT TECHNOLOGIES COPYRIGHT. Customizing digital modulation with the agilent ESG-D series real-time I/Q baseband generator[DB/OL]. [2007-05-12]. www.agilent.com/find/assist/5966-4096E.
- [8] 张海陵, 陈 茹, 谭海云. 基于FPGA的模拟信号源系统设计[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(4): 461-463.
- [9] AGILENT TECHNOLOGIES COPYRIGHT. Signal source basics[DB/OL]. [2007-05-18]. www.agilent.com/find/backtobasics/5965-7918E.
- [10] 叶佩军, 安建平. 一种移动通信信道模拟器的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2004, 30(7): 44-47.
- [11] 古天祥, 王厚军, 刁友宝, 等. 电子测量原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

编 辑 熊思亮