

引用格式：刘坤，郝晓明，刘骁，等. 面向低轨应用的 GNSS 高精度实时多普勒频移估计方法[J]. 时间频率学报, 2025, 48(1): 29-35.

面向低轨应用的 GNSS 高精度实时 多普勒频移估计方法

刘坤，郝晓明，刘骁，王君帅

航天恒星科技有限公司，北京 100095

摘要：随着卫星导航系统的应用推广，越来越多的低轨卫星配置了导航接收机来获取实时高精度位置和测速信息，伪距和多普勒测量值精度关系到导航接收机位置和测速精度；另外，随着低轨卫星对时间精度需求越来越高，低轨卫星对导航接收机的时间确定和维持精度同样提出了较高的要求。无论实时测速还是钟漂信息的解算精度，都与接收机在低轨运行场景下的实时多普勒测量精度紧密相关。基于多项式拟合公式得到高精度多普勒测量值，从而实现高精度实时测速，通过公式简化得到易于工程应用的系数和计算方法，最终实现导航接收机在低轨卫星高动态场景下的高精度测速。搭建了模拟器测试环境，在低轨场景下对不同计算方法进行对比验证，结果表明，采用多项式拟合进行实时多普勒估计的方法能够获得较高精度的测速结果。

关键词：低轨卫星；导航接收机；多项式拟合；多普勒估计

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2025-01-0029-07

A high-precision real-time Doppler shift estimation method for GNSS in low-orbit application

LIU Kun, HAO Xiao-ming, LIU Xiao, WANG Jun-shuai

Space Star Technology Co., Ltd, Beijing 100095, China

Abstract: Along with the application of Global Navigation Satellite System (GNSS), more and more low earth orbiting (LEO) satellites are equipped with navigation receiver to obtain real-time high-precision position and velocity measurement, and the accuracy of pseudorange and Doppler measurement values is related to the accuracy of position and velocity measurement. In addition, with the increasing demand for time accuracy of low-orbit satellites, low-orbit satellites also put forward higher requirements for the time determination and maintain the accuracy of navigation receiver. Both the real-time velocity measurement and the calculation accuracy of the clock drift information are closely related to the real-time Doppler measurement accuracy of the receiver in the low-orbit operation scenario. In this study, precise Doppler estimation is obtained based on the polynomial fitting, so as to achieve high-precision real-time velocity measurement, and the coefficients and calculation methods that are easy to apply in engineering are obtained, and finally realize the precise velocity estimation of the navigation receiver in the high-dynamic scenario of the LEO satellites. In this study, a

收稿日期：2024-12-02；接受日期：2024-12-21

基金项目：国家重点研发计划（2023YFB3906500）

simulator test environment is set up to compare and verify different calculation methods in low-orbit scenarios, and the results show that the method of real-time Doppler estimation by polynomial fitting can obtain high-precision velocity measurement results.

Key words: LEO (low earth orbiting) satellite; navigation receiver; polynomial fitting; Doppler estimation

随着导航系统应用推广,越来越多的低轨卫星采用卫星导航系统进行位置和速度信息获取,通过配置导航接收机获取导航卫星播发信号到飞行器的伪距、载波相位等测量信息,通过最小二乘法等解算方法得到实时高精度位置和测速信息^[1]。随着低轨卫星对时间精度需求越来越高,低轨卫星对导航接收机的时间确定和维持精度同样提出了较高的要求,目前低轨卫星往往采用接收机实时钟差和钟漂等信息开展高精度时钟驯服以获得高精度时间基准^[2]。

无论是实时高精度测速还是接收机时钟信息的获取,都与接收机对导航卫星播发信号的多普勒测量精度紧密相关。接收机可通过载波跟踪环路直接得到实时多普勒信息,精度往往较差;另外可基于测量时间段内(一般为 100 ms)载波相位测量值除以测量时间得到平均多普勒,并结合外推方法进行推算得到实时多普勒,这种方法在静态或低动态情况下能够获得较高精度的多普勒测量值;但这两种方法在低轨卫星高动态运行场景下得到的多普勒信息精度较差,造成测速精度和接收机钟漂精度较差。为了得到低轨卫星运动场景高精度实时多普勒测量值,本文基于多项式拟合公式^[3]得到高精度

多普勒测量值^[4-5],通过公式简化得到易于工程应用的系数和计算方法,最终实现导航接收机在低轨卫星高动态场景下的高精度测速。

本文搭建了模拟器测试环境,模拟低轨场景,对不同计算方法进行对比测试验证,从而验证采用多项式拟合进行实时多普勒估计的方法的有效性。

1 接收机载波跟踪原理和实时多普勒的获取

典型的接收机载波信号跟踪环路的内部结构和信号流程见图 1 所示^[6],作为输入的数字中频信号 $S_{IF}(n)$,首先与载波环复制的载波混频器相乘得到混频结果 i 和 q ,然后 i 和 q 信号与码环复制的即时伪码做相关运算,得到相关结果 i_p 和 q_p 。经积分-清除器后得到 P 支路的相干积分值 I_p 和 Q_p , I_p 和 Q_p 进入载波环鉴别器得到鉴相差经过载波环滤波器生成最终用于调控载波生成的载波数字控制振荡器(numerically controlled oscillator, NCO)控制参数。在进行载波信号跟踪过程中通过载波积分器完成载波测量相位值的生成,接收机通过内部 Tick 信号完成载波测量相位值的锁存。

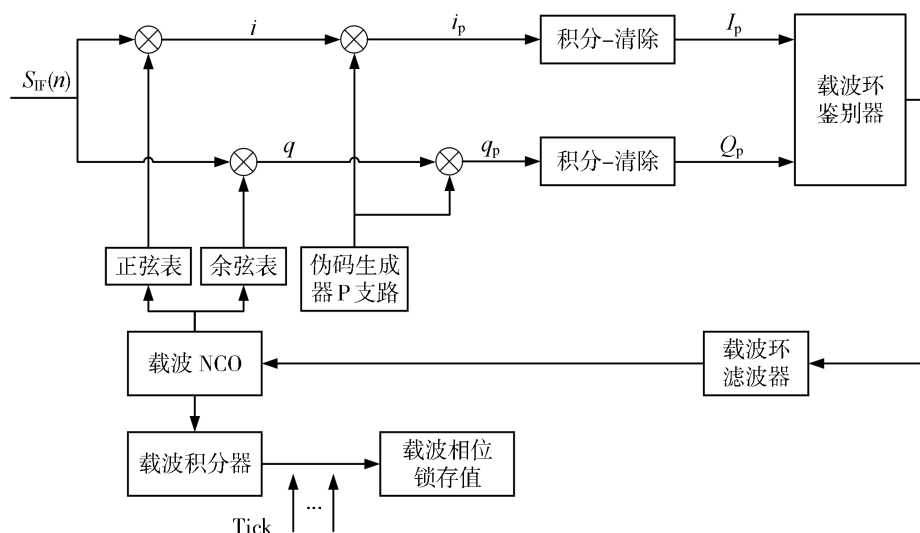
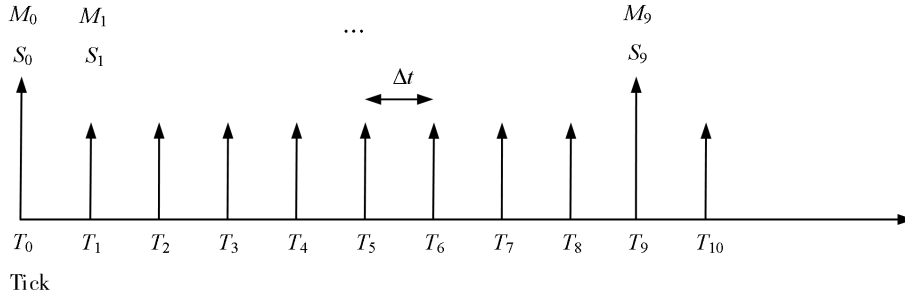


图 1 典型的接收机载波信号跟踪环路图

接收机内部产生 Tick 周期一般为 100 ms，接收机在 Tick 触发时刻会进行载波 NCO、码 NCO、积分多普勒、码相位等观测信息的锁存，通过对观

测信息的解算，可以完成接收机跟踪卫星伪距、多普勒测量值解算，最终采用最小二乘法实现定位和测速，如图 2 所示。



注：\$T_0, \dots, T_{10}\$：采样时刻；\$M_0, \dots, M_{10}\$：载波 NCO；\$S_0, \dots, S_{10}\$：载波相位锁存值

图 2 接收机观测信息计算图

接收机获取多普勒常用的方法有直接获取法和平均值推算法。

1.1 直接获取法

结合接收机实际工作原理，接收机可通过实时锁存载波 NCO 获得实时多普勒测量值，通过下述公式进行多普勒计算。

$$f_{\text{dop}} = \frac{M f_s}{2^N} - f_{\text{IF}} \quad (1)$$

式 (1) 中：\$f_{\text{dop}}\$ 为载波 NCO 推算出的多普勒值，\$M\$ 为锁存时刻的 NCO 值，\$f_{\text{IF}}\$ 是跟踪信号数字中心频率值，\$f_s\$ 为接收机进行数字信号处理的采样频率，\$2^N\$ 为数控振荡器的满量程值。由式 (1) 可以看出载波环路的跟踪误差直接影响 NCO 值，进而影响多普勒精度。

接收机进行载波最终稳定跟踪采用的锁相环，为了适应大动态运动场景，一般采用三阶锁相环路，锁相环的相位测量误差包括相位抖动和动态应力误差，相位抖动误差分为热噪声、接收机基准震荡频率抖动和 Allan 均方差。

上述误差中，接收机基准震荡频率抖动和 Allan 均方差在一段时间内是稳定的^[6]，动态应力误差受到视线方向的加加速度和带宽影响较大。由于低轨场景下，低轨卫星的速度较大（约 7 000 m/s），但加速度（< 1 g）和加加速度（< 0.01 g/s）较小，当设置接收机带宽 \$B_L\$ 较大时，环路对动态应力的承受能力较大，动态应力误差较小，热噪声均方差较大，热噪声对瞬时多普勒产生的影响也最大。

热噪声的估算公式^[7]为

$$\sigma_{\text{tPLL}} = \frac{180^\circ}{\pi} \sqrt{\frac{B_L}{C/N_0} \left(1 + \frac{1}{2T_{\text{coh}} \times C/N_0}\right)} \quad (2)$$

式 (2) 中：\$\sigma_{\text{tPLL}}\$ 为载波跟踪环路的相位误差均方差，\$B_L\$ 为跟踪环路带宽，载波跟踪环路在跟踪大动态时，\$B_L\$ 带宽设置比较大，一般大于 25 Hz，在这里我们取值 35 Hz，相干积分（\$T_{\text{coh}}\$）为 1 ms，\$C/N_0\$ 为 46 dB·Hz（-126 dBw 的信号强度），计算得到

$$\sigma_{\text{tPLL}} = 1.71^\circ \quad (3)$$

根据载波相位与载波频率的关系

$$\sigma_{\text{tPLL}} = 360 \times 2\pi \sigma_{\text{fdop}} T_{\text{coh}} \quad (4)$$

可以得到实时获取载波 NCO 带来的载波多普勒偏差为 \$\sigma_{\text{fdop}} = 0.76\$ Hz，采用 L1CA 频点进行计算整周长度为 0.19 m，实时获取载波 NCO 的载波多普勒测速偏差为 0.14 m/s。

1.2 平均值推算法

而通过载波相位误差 \$\sigma_{\text{tPLL}}\$ 能够得到载波相位测量精度 0.95 mm 左右，因此采用载波相位精度推算载波多普勒测速偏差可达 mm/s 的精度，精度提升数十倍以上。通过图 2 可以看到接收机在 1 s 内会对载波相位测量值进行多次采集（\$T_1 \sim T_{10}\$，当前 Tick 周期为 100 ms 时），得到采样时刻的载波相位测量值 \$S_1 \sim S_{10}\$，当接收机处于静止状态时，由于载波相位存在较小的加速度变化量，可通过采样点时

刻的载波相位平均值表示采样时刻的实时多普勒测量值^[5]:

$$P(t) = \frac{S(t + \Delta t) - S(t)}{\Delta t} \quad (5)$$

式(5)中: $P(t)$ 表示为 $t \sim (t + \Delta t)$ 测量时刻的多普勒平均值, $S(t)$ 为 t 采样时刻的载波相位锁存值, $S(t + \Delta t)$ 为 $t + \Delta t$ 采样时刻的载波相位锁存值, Δt 为两次锁存时刻的时间差值。当 Δt 为 1 s 时, 推算载波多普勒精度约为 0.001 32 m/s, 相比载波 NCO 实时获取的多普勒精度提升了 100 倍左右。接收机在静止状态下, 由于多普勒存在很小的加速度, 因此可通过平均值估算方法, 但当接收机处在低轨场景或其他加速场景下, 该方法就会存在较大误差, 可通过前后历元均值外推加速度的方法实现:

$$a(t) = \frac{P(t) - P(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (6)$$

式(6)中: $a(t)$ 表示平均多普勒变化的速度值, $P(t - \Delta t)$ 为 $(t - \Delta t) \sim t$ 测量时刻的多普勒平均值, $P(t)$ 为 $t \sim (t + \Delta t)$ 测量时刻的多普勒平均值, 实时多普勒测量值计算方式如式(7)所示:

$$D(t) = P(t) + \frac{1}{2} a(t) \Delta t \quad (7)$$

式(7)中: $D(t)$ 表示为 t 测量时刻的多普勒实时测量值, 该方法可有效消除卫星加速度带来的影响, 忽略了加加速度带来的误差影响。

为了充分考虑卫星加加速度带来的影响, 本文采用多项式拟合的方式对动态场景下的载波多普勒进行高精度推算, 从而实现动态场景下高精度实时测速。

2 低轨场景下的多普勒多项式拟合方法

针对低轨运动场景, 首先对于惯性系中低轨卫星和导航卫星的运动状态进行分析, 为了方便分析低轨卫星和导航卫星运动模型简化为仅受地球中心引力作圆周运动, 低轨卫星和导航卫星运动多项式^[8]可通过式(8)来表示

$$r = r_0 + \dot{r}t + \frac{1}{2} \ddot{r}t^2 + \frac{1}{6} \ddot{\ddot{r}}t^3 + \dots \quad (8)$$

式(8)中: r 表示低轨卫星或导航卫星的位置, r_0 表示初始位置, $\dot{r}$ 为低轨卫星或导航卫星的速度, $\ddot{r}$ 为低轨卫星或导航卫星的加速度, $\ddot{\ddot{r}}$ 为卫星或导航卫星的加加速度, t 表示运行时间。因此低轨卫星接收机接收到的导航卫星播发的导航信号的载波相位多项式公式可以表示为

$$S = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \dots + a_n t^n + \dots \quad (9)$$

式(9)中: S 表示载波相位测量值, a_0 为载波相位初始值, a_1 为载波相位变化的速度值, a_2 为载波相位变化的加速度值, a_n 为载波相位变化的 n 阶变化值, t 表示累计测量时间。通过对上述载波相位多项式公式进行求导可得到多普勒多项式公式为

$$D = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + \dots + na_n t^{n-1} + \dots \quad (10)$$

式(10)中: D 表示瞬时多普勒测量值, a_1 为瞬时多普勒的初始值, a_2 为瞬时多普勒变化的加速度值, a_n 为瞬时多普勒变化的 $n-1$ 阶变化值, t 表示累计测量时间。

为了有效减少在工程中解算的复杂性, 一般在 1 s 内临近的多个点进行载波相位多项式的拟合运算, 通过第 1 节可以看到载波相位测量精度典型值为 1 mm 左右, 通过上述分析可以得到, 载波相位多项式公式保留三阶, 1 s 内多项式截断误差可远小于 1 mm。因此, 对载波相位的多项式拟合公式采用公式为

$$S(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \varepsilon(t) \quad (11)$$

对公式(11)求导得到瞬时多普勒计算公式为

$$D(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + \dot{\varepsilon}(t) \quad (12)$$

设 T_0 为起始测量时刻, 测量周期 $T = 0.1$ s, 测量时刻序列 ($T_0, T_0 + T, T_0 + 2T, \dots, T_0 + 10T$) 对应载波相位测量值序列 ($S_0, S_1, \dots, S_{10}$); 从理论上来说, 11 个点的测量时刻序列从 $T_0 + 0T$ 到 $T_0 + 10T$ 的计算和从 $T_0 - 5T$ 到 $T_0 + 5T$ 的计算是等价的。但考虑到实际工程应用时, 实际处理器在处理过程中的有效位数和截断误差等, 从 $T_0 - 5T$

到 $T_0 + 5T$ 的对称时刻在计算时可以保留更多的有效位数。故在计算过程设计对称时刻以简化计算。在计算过程设计对称以简化计算，令

$$S_5 = S(0) = a_0 + \varepsilon(0)。 \quad (13)$$

则载波相位测量值方程组的矩阵形式可写作

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ \dots \\ S_5 \\ \dots \\ S_9 \\ S_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -5T & (-5T)^2 & (-5T)^3 \\ 1 & -4T & (-4T)^2 & (-4T)^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 4T & (4T)^2 & (4T)^3 \\ 1 & 5T & (5T)^2 & (5T)^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon(-5T) \\ \varepsilon(-4T) \\ \dots \\ \varepsilon(0) \\ \dots \\ \varepsilon(4T) \\ \varepsilon(5T) \end{bmatrix} \quad (14)$$

简写为

$$\bar{S} = Aa + \bar{\varepsilon}。 \quad (15)$$

式 (15) 中： $\bar{S}$ 表示载波相位测量值矩阵， A 为时间参数矩阵， A^T 为雅克比矩阵， $A^T A$ 可逆， a 为系数矩阵， $\bar{\varepsilon}$ 为残差矩阵；通过系数矩阵进行最小二乘拟合，可得到系数拟合值为

$$\hat{a} = (A^T A)^{-1} A^T \bar{S}。 \quad (16)$$

式 (16) 中： $\hat{a}$ 表示系数矩阵的最小二乘拟合值。根据对称简化的计算公式 (13) 和 (14)，可得 $T_0 + 10T$ 时刻， $t = 5T$ ，代入公式 (12)，并写作矩阵形式，则 $T_0 + 10T$ 时刻瞬时多普勒拟合值 D_{10} 为

$$D_{10} = [0 \ 1 \ 2 \times 5T \ 3 \times (5T)^2] \times \hat{a} = D_f \times \bar{S}。 \quad (17)$$

式 (17) 中： D_f 是最终得到的拟合系数。接收机在低轨卫星运行场景下能够跟踪多颗导航卫星实现定位和测速解算，通过上述公式可以获得接收机跟踪卫星的高精度多普勒测量信息，通过最小二乘解算方法，可实现接收机高精度实时测速结果。

3 测试验证结果

在本章节，为了有效验证不同方法的对比效果，采用导航信号模拟器搭建了接收机测试环境，见图 3 所示。导航模拟器具备模拟低轨卫星接收机

接收导航卫星信号特性并播发射频信号的能力；导航接收机接收到模拟射频信号完成多普勒、伪距等测量计算，最终实现定位和测速；上位机评估软件通过对导航模拟器的理论数据和导航接收机的原始测量数据进行对比分析，完成导航接收机相关测量数据的精度评估。

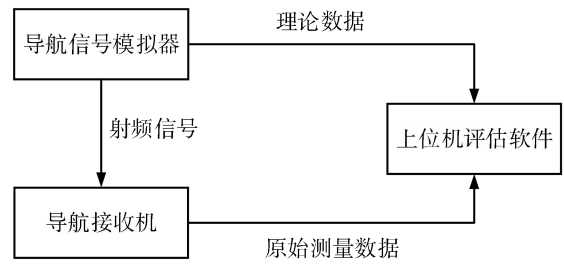


图 3 测试环境图

为了有效对比公式 (1) 描述的直接获取法、公式 (7) 中的平均值推算法以及公式 (17) 中的载波相位多项式拟合法，本文采用导航信号模拟器搭建了图 3 所示的测试环境，并设置了两不同的低轨卫星模拟场景：

测试场景 1：轨道高度为 1 120 km，速度为 6 959 m/s，加速度 6.49 m/s²，加加速度 0.000 04 m/s³；

测试场景 2：轨道高度为 500 km，速度为 7 300 m/s，加速度 7.8 m/s²，加加速度 0.000 2 m/s³。

场景内设置参数见表 1 和表 2，导航信号模拟器播发北斗 B1I 频点信号，并被自研的星载导航接收机进行信号接收与处理，试验时长 2 h，可见卫星数目 8~12 颗，观测值采样频率 100 Hz，星载导航接收机输出 GNSS (Global Navigation Satellite System) 星历、B1I 伪距、载波相位及多普勒等测试数据，进行事后数据处理；并与导航信号模拟器输出的多普勒真值进行比对，评估各种算法的处理精度。在此基础上，将各种算法在星载导航接收机上实现，测试各种算法的实时处理精度。经过上位机评估软件进行分析，选取跟踪的 34 号卫星对 3 种方法得到的多普勒精度进行分析，得到测试结果如下所示。

3.1 测试场景 1

测速场景 1 的设置参数参见表 1。测试结果如图 4 所示。

表 1 低轨卫星和导航卫星运动模型简化表

圆周运动	表达方式	方向	低轨卫星典型值	导航卫星典型值
高度	—	—	1 120 km	21 528 km
位置	H+R	—	7 491.137 km	27 906.137 km
速度	$\dot{r} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$	垂直于位置	6 950 m/s	2 644 m/s
加速度	$\ddot{r} = \frac{GM}{r^2}$	与位置相反	6.49 m/s ²	0.512 m/s ²
加加速度	$\dddot{r} = \frac{2GM}{r^3}$	与速度相反	0.000 04 m/s ³	3.668 × 10 ⁻⁸ m/s ³

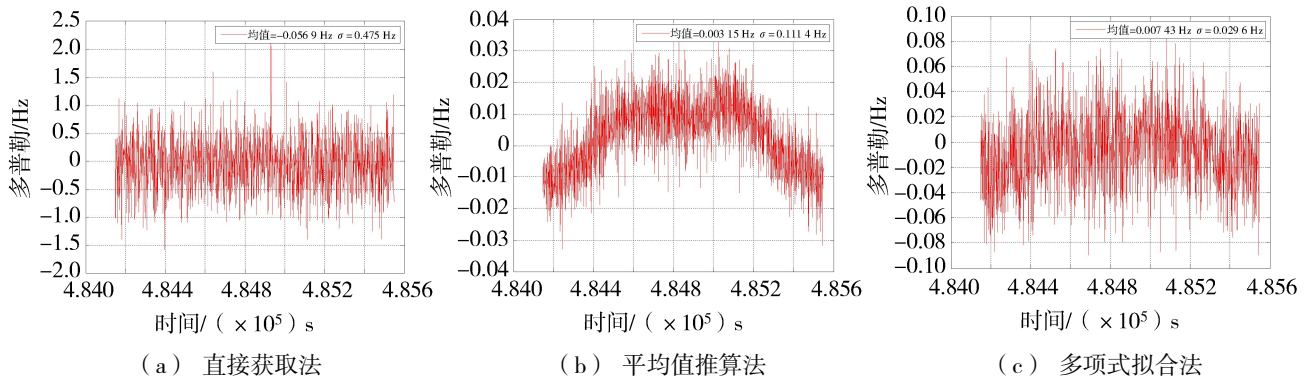


图 4 3 种方法测量多普勒精度分析图

3.2 测试场景 2

测试场景 2 的设置参数参见表 2。测试结果如图 5 所示。

表 2 低轨卫星和导航卫星运动模型简化表

圆周运动	表达方式	方向	低轨卫星典型值	导航卫星典型值
高度	—	—	500 km	21 528 km
位置	H+R	—	6 871.137 km	27 906.137 km
速度	$\dot{r} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$	垂直于位置	7 300 m/s	2 644 m/s
加速度	$\ddot{r} = \frac{GM}{r^2}$	与位置相反	7.80 m/s ²	0.512 m/s ²
加加速度	$\dddot{r} = \frac{2GM}{r^3}$	与速度相反	0.000 2 m/s ³	3.668 × 10 ⁻⁸ m/s ³

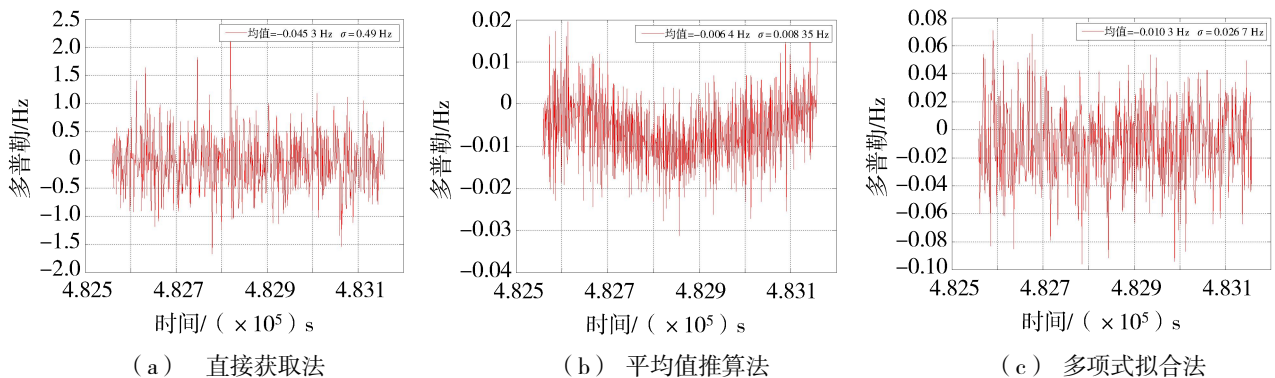


图 5 3 种方法测量多普勒精度分析图

3.3 测试小结

从图4和图5可以看出,直接获取法含有大部分的热噪声误差,整体曲线噪声大,其精度(0.475 Hz、0.49 Hz)与公式(4)分析的方法精度相差不大;平均值推算法由于无法消除卫星运动加加速度的影响,因此整体曲线呈现出一定的二次曲线变化特性;通过多项式拟合法可以大幅消减热噪声带来的误差,且有效消除了卫星运动加加速度的影响,使得误差曲线变化特征平稳,整体测试精度(0.029 Hz、0.027 Hz)比直接获取法提升了约20倍。对于不同的低轨应用场景,即使轨道高度不同、速度和加速度也有不同,但都可以通过多项式拟合法得到热噪声误差小、趋势平稳的实时多普勒,此多普勒用于测速解算,可以得到更高精度的速度值以及更平稳和精确的接收机钟漂值。通过这两次测试,此多项式拟合法的有効性和精确性得到了验证。

4 结语

本文采用多个点进行载波相位多项式的拟合运算,来得到高精度的多普勒信息,并将此多普勒用于测速和接收机钟漂的解算。通过搭建模拟器测试环境,模拟采用低轨场景,对多普勒的不同计算方法进行对比测试验证,可以看出通过多项式拟合的方法得到的多普勒精度更高,并且曲线变化特征平稳。说明本文采用的多项式拟合方法有效消除了低轨卫星和导航卫星运动加加速度带来的精度影响,可大幅提升低轨场景下接收机跟踪导航卫星的多普勒测量精度,具备较高的工程应用价值。导航

接收机在提升多普勒测量精度的前提下,通过最小二乘算法可获得高精度的速度测量值和卫星钟漂解算结果,一方面为低轨卫星提供了实时高精度测速信息;另一方面高精度的卫星钟漂信息有助于低轨卫星开展时钟驯服处理,提升基于导航接收机开展的时钟溯源精度,为低轨卫星的在轨服务提供高稳定度高精度的时钟。

参考文献:

- [1] 季宇虹,王让会.全球导航定位系统GNSS的技术与应用[J].全球定位系统,2010,35(5):69-75.
- [2] 丁勇,王慧聪,高伟,等.基于北斗导航的时钟驯服导航接收机设计[C]//第十四届中国卫星导航年会论文集—S04时间频率与精密授时,株洲:第十四届中国卫星导航年会组委会,2024.
- [3] 熊永清.GPS观测值的最佳多项式拟合[J].测绘通报,1997(8):2-4+7.
- [4] KENNEDY S L. Precise acceleration determination from carrier-phase measurements[J]. Navigation, 2003, 50(1): 9-19.
- [5] Graas F V, Soloviev A. Precise velocity estimation using a stand-alone GPS receiver[J]. Navigation, 2004, 51(4): 283-292.
- [6] 谢钢.GPS原理与接收机设计[M].北京:电子工业出版社,2009:320-321.
- [7] 张杰,马冠一.GNSS接收机锁相环最佳环路带宽的选取[J].电讯技术,2015,55(8):890-894.
- [8] 卢伟涛,王顺金,张华.人造地球卫星运动方程的代数动力学算法数值解[J].物理学报,2007,56(7):3655-3661.