

DOI:10.13203/j.whugis20160547



文章编号:1671-8860(2018)07-1071-07

利用零相位 Kaiser 窗滤波器改善 MEX 多普勒数据定轨精度

曲春凯¹ 李 斐^{1,2} 杨 轩² 鄢建国² 郝卫峰¹
叶 茂² 金炜桐² 王 宏³

1 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

3 北京跟踪与通信技术研究所,北京,100094

摘 要:精密轨道确定在深空探测中至关重要,而定轨数据中的白噪声会影响定轨性能。基于零相位分析,比较了 FRR (forward-filter reverse-filter reverse-output)、RRF (reverse-filter reverse-filter forward-output) 和 Matlab 中的 filtfilt 这 3 种滤波器的优劣,设计了一种零相位 Kaiser 窗低通滤波器。利用火星快车号 (Mars Express, MEX) 的仿真数据和实测数据验证了零相位 Kaiser 窗低通滤波器的性能,结果发现滤除白噪声后 MEX 数据的定轨精度有了显著改善。双程测速数据残差均方根 (root mean square, RMS) 减小为原来的 1/3 左右,达到了 0.031 mm/s;轨道位置和速度与欧空局 (European Space Agency, ESA) 精密轨道的差异明显变小。该滤波算法作为定轨前的数据预处理可以提高定轨精度,从而为中国火星探测器的轨道数据处理提供一定的参考。

关键词:零相位滤波;MEX;Kaiser 窗;白噪声;定轨精度

中图分类号:P228

文献标志码:A

火星是人类深空探测器到访最多的行星。火星快车 (Mars Express, MEX) 是欧空局 (European Space Agency, ESA) 的首颗火星探测器^[1],在轨运行期间传回的大量火星地表影像等资料表明,火星大气层内存在甲烷^[2],火星南极冠存在水冰。MEX 还多次飞越火卫一 (Phobos),测量了其质量和低阶重力场等^[3]。国内外开发了许多火星探测器定轨软件^[4-6],如武汉大学深空探测器精密定轨与重力场解算软件系统中的火星重力场解算和分析系统模块 (Mars Gravity Recovery and Analysis Software/System, MAGREAS) 对 MEX 的定轨结果已经达到了比利时皇家天文台发布的精密星历的精度水平^[7-8],本文将选用 MAGREAS 作为 MEX 的定轨软件。

目前定轨大多采用原始数据,其中含有较强的噪声,严重影响定轨的精度。噪声也是影响各

类接收机性能的主要因素之一^[9]。噪声可以分为热噪声、散弹噪声和闪烁噪声。热噪声是电子设备中一种十分常见的白噪声^[10],也是本文主要考虑消除的噪声成分。深空通讯设备中的热噪声主要来源于地面发射器/接收机和星载转发器。由 MEX 1 s 采样间隔获取的 X 波段原始数据提取出的航天器速度的噪声为 0.05~0.37 mm/s,具体值取决于太阳-火星-地球的夹角,平均为 0.13 mm/s^[3]。为达到更好的定轨效果,有研究者采用滤波器处理原始数据,提高数据信噪比。Andert 采用 Kaiser 窗低通滤波器处理了 MEX 2006 年 3 月和 2008 年 7 月两次飞掠 Phobos 的频率数据,结果表明,两次飞掠 Phobos 的频率数据的残差标准差分别从 6.56 mHz 减少至 1.71 mHz、从 7.32 mHz 减少至 1.97 mHz^[11]。为了除去原位相位特征的影响,并精确保留月球重力场

收稿日期:2017-07-07

项目资助:国家自然科学基金 (41374024,41604004,41174019);湖北省自然科学基金重点项目创新群体类项目 (2015CFA011);宇航动力学国家重点实验室开放基金项目 (2016ADL-DW0103);空间目标测量重点实验室开放基金;中国博士后科学基金 (2016M602360)。

第一作者:曲春凯,硕士生,主要从事多普勒测速及其数据处理研究。quchunkai999@163.com

通讯作者:李斐,博士,教授。fli@whu.edu.cn

的信息,Liu 等利用 Kaiser 窗设计了一个低通滤波器,对日本“月亮女神”月球探测器的两颗子卫星的原始多普勒数据进行滤波处理^[12]。滤波后,Vstar 的双程多普勒测量残差均方根(root mean square, RMS)从 0.355 Hz 减小到 0.001 6 Hz;Rstar 的双程多普勒测量残差 RMS 从 0.293 Hz 减小到 0.002 1 Hz,四程(Rstar-主卫星)多普勒测量残差 RMS 从 1.028 Hz 减小到 0.025 Hz。

基于零相位分析,本文比较了 FRR(forward-filter reverse-filter reverse-output)、RRF(reverse-filter reverse-filter forward-output)和 Matlab 中的 filtfilt 这 3 种滤波器的优劣,并设计了一种有效的零相位 Kaiser 窗低通滤波器。

1 零相位滤波算法

1.1 滤波器的基本概念

滤波器的传递函数 $H(e^{j\omega})$ 可以用极坐标表示为:

$$H(e^{j\omega}) = |H(\omega)| \cdot e^{j\varphi(\omega)} \quad (1)$$

式中, $|H(\omega)|$ 、 $\varphi(\omega)$ 分别为滤波器的振幅响应和相位响应,计算公式分别为:

$$|H(\omega)| = \sqrt{\text{Re}^2[H(e^{j\omega})] + \text{Im}^2[H(e^{j\omega})]} \quad (2)$$

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{\text{Im}[H(e^{j\omega})]}{\text{Re}[H(e^{j\omega})]} \quad (3)$$

式中, $\text{Re}(\cdot)$ 为函数实部; $\text{Im}(\cdot)$ 为函数虚部; j 为虚数单位; ω 为数字频率。

根据滤波器的幅度响应,可以将滤波器分为低通、高通、通带和阻带 4 类滤波器^[13],图 1 为不同类型滤波器的理想幅度响应。

图 1 所示的滤波器幅度响应是一种理想状态,在现实中不可能实现,只能尽可能地逼近这种状态。在逼近的过程中,滤波器的不同性能指标通常不可能同时达到最优。因此在设计滤波器时,一般根据实际需要,允许滤波器在通带和阻带内与理想状态有一定的偏差,通带与阻带之间也允许有一个过渡带。以低通滤波器为例,滤波器的实际幅频特性如图 2 所示。

图 2 中, δ_p 、 δ_s 分别称为通带波纹和阻带波纹; ω_p 、 ω_s 分别称为通带截止频率和阻带截止频率; $\Delta\omega = \omega_s - \omega_p$ 称为过渡带。

设计滤波器时,一般情况下,振幅特性由给定的通带和阻带衰减确定,衰减 $A(\omega)$ 用反映功率增益的幅度平方函数(或称作模平方函数) $|H(\omega)|^2$ 来定义:

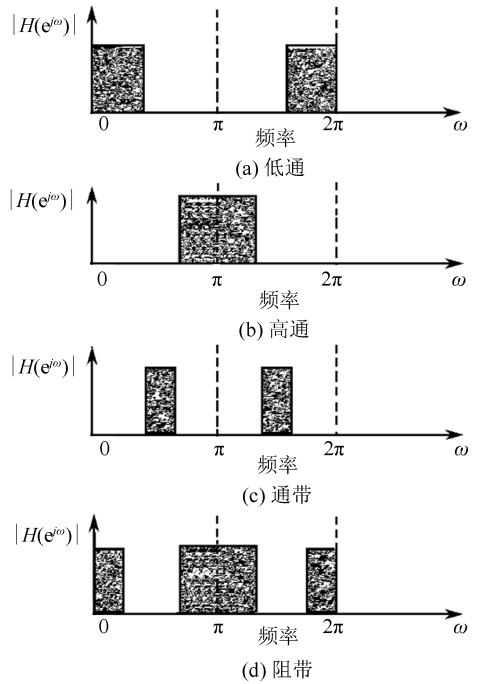


图 1 不同类型滤波器的理想幅度响应
Fig.1 Ideal Amplitude Response of Different Filters

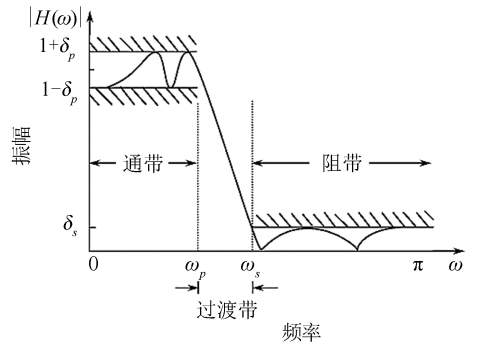


图 2 低通滤波器的实际幅频特性
Fig.2 Real Amplitude-Frequency Response of the Low Pass Filter

$$A(\omega) = -10\lg |H(\omega)|^2 = -20\lg |H(\omega)| \quad (4)$$

所以通带衰减 A_p 和阻带衰减 A_s 可以表示为:

$$A_p = -20\lg(1 - \delta_p) \quad (5)$$

$$A_s = -20\lg\delta_s \quad (6)$$

1.2 零相位滤波

一个信号经过一个滤波器系统后,会将信号每个频率分量的振幅乘上系统振幅响应的模,以改变信号不同频率成分的能量,实现噪声的滤除。滤波器系统在改变信号幅频性质的同时也会在原信号相位上附加一个相位,称为系统的相移。如果这种相位的改变不是所预期的,就会造成相位的失真,影响数据质量^[14]。

对多普勒数据进行滤波时不希望相位发生变

化,零相位滤波器具有零相位系统特性,可以获得精确零相位失真的信号^[15]。零相位滤波可以采用 FRR 滤波方法,首先将输入序列按顺序滤波,然后将得到的结果逆转后再滤波,最后将所得结果逆转后输出,即可得到精确零相位失真的序列。

FRR 滤波的时域描述可以表示为:

$$\begin{cases} y_1(n) = x(n) \cdot h(n) \\ y_2(n) = y_1(L_1 - n + 1) \\ y_3(n) = y_2(n) \cdot h(n) \\ y_4(n) = y_3(L_1 - n + 1) \end{cases} \quad (7)$$

式中, L_1 为序列长度; $n \in [1, L_1]$; $x(n)$ 表示输入序列; $h(n)$ 表示数据滤波器冲击响应序列; $y(n)$ 表示滤波或者序列逆转后的结果。

FRR 滤波的频率描述即为式(7)相应的频域表示:

$$\begin{cases} Y_1(e^{j\omega}) = X(e^{j\omega}) \cdot H(e^{j\omega}) \\ Y_2(e^{j\omega}) = e^{-j\omega(N+1)} \cdot Y_1(e^{-j\omega}) \\ Y_3(e^{j\omega}) = Y_2(e^{j\omega}) \cdot H(e^{j\omega}) \\ Y_4(e^{j\omega}) = e^{-j\omega(N+1)} \cdot Y_3(e^{-j\omega}) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $X(e^{j\omega})$ 是 $x(n)$ 的频率描述; $Y(e^{j\omega})$ 是 $y(n)$ 的频率描述。由式(8)可得:

$$Y(e^{j\omega}) = X(e^{j\omega}) \cdot |H(e^{j\omega})|^2 \quad (9)$$

由式(9)可知,输出 $Y(e^{j\omega})$ 与输入 $X(e^{j\omega})$ 之间不存在附加相位,FRR 滤波实现了精确零相位失真。

Matlab 软件中提供了一种零相位滤波的函数 `filtfilt`,其本质上也是 FRR 滤波,但为了减小数字滤波都会遇到的边界效应问题,`filtfilt` 函数在进行滤波前,在数据首尾两个方向上各进行了与滤波器节数相同的延拓^[16]。设原数据为 $x(n)$,数据量大小为 L_2 ,滤波器节数为 M ,则拓展后的数据用 Matlab 语言可表达为:

$$\begin{aligned} & [2 \cdot x(1) - x(M+1:-1:2); x; \\ & 2 \cdot x(L_2) - x(L_2-1:-1:L_2-M)] \end{aligned}$$

图 3 为使用常规滤波方法和 3 种零相位滤波方法对某一固定周期的正弦信号进行滤波处理的结果,正弦信号的表达式为: $x(t) = 3\sin(2\pi \cdot 2000 \cdot t)$,采样频率为 10 000 Hz,采样时间为 0.025 s,滤波器设计为全通滤波器。从图 3 可以看出,常规滤波与理论值存在一定的相位偏移,而 FRR、RRF 和 `filtfilt` 滤波与理论值相位保持一致,但 FRR 和 RRF 方法存在较明显的边界效应问题,在数据两端出现异常扰动。鉴于 `filtfilt` 函数的零相位滤波性能和对于边界效应的改善效果较好,本文将采用此方法进行零相位滤波。

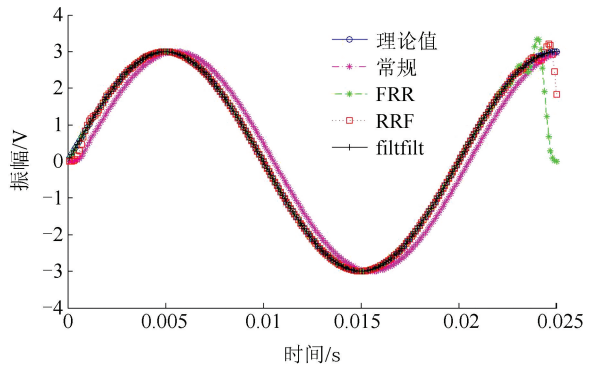


图 3 使用各种滤波方法处理正弦信号

Fig.3 Using Different Filtering Methods to Process a Sinusoidal Signal

2 Kaiser 窗低通滤波器

本文需要一个低通滤波器滤除原始信号中的高频热噪声,提高信号的信噪比,以期改善定轨精度。常见的数字滤波器分为两种:无限脉冲响应(infinite impulse response, IIR)数字滤波器和有限脉冲响应(finite impulse response, FIR)数字滤波器。考虑到 FIR 数字滤波器能做到严格线性相位,且在滤波实现时可以采用快速傅里叶变换,因此本文使用窗函数法设计了一种低通 FIR 数字滤波器。

常见的窗函数有三角形窗、Hanning 窗、Hamming 窗、Blackman 窗和 Kaiser 窗等。由于 Kaiser 窗具有可调性(即可选择不同参数 α 以适应各种不同需要),所以选用适应性较大的 Kaiser 窗作为低通滤波器的窗函数^[17-19]。Kaiser 窗的定义为:

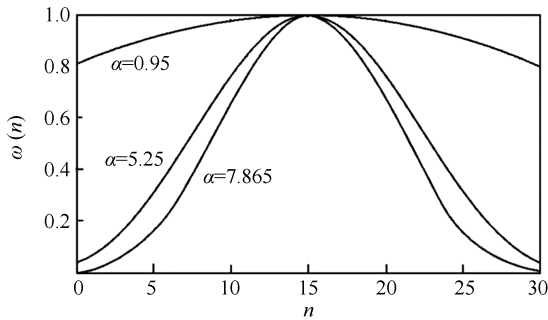
$$\omega(n) = \frac{I_0\left(\alpha \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2n}{N-1}\right)^2}\right)}{I_0(\alpha)} \quad (10)$$

式中, α 为 Kaiser 窗参数; N 为滤波器节数; $n \in [0, N-1]$; $I_0(\cdot)$ 是第一类修正零阶贝塞尔函数。 $I_0(x)$ 可用下述级数来计算:

$$I_0(x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{1}{k!} \left(\frac{x}{2}\right)^k \right]^2 \quad (11)$$

α 是一个可调的参数,与主瓣宽度和旁瓣衰减有关。一般来说, α 越大,过渡带越宽,阻带越小,衰减越大。图 4 为不同 α 值对应的 Kaiser 窗的形状。若阻带最小衰减表示为 $A_s = -20\lg\delta_s$, 则 α 的确定可采用经验公式:

$$\alpha = \begin{cases} 0, & A_s \leq 21 \\ 0.5842(A_s - 21)^{0.4} + 0.07886(A_s - 21), & 21 < A_s \leq 50 \\ 0.1102(A_s - 8.7), & A_s > 50 \end{cases} \quad (12)$$

图4 不同 α 值的Kaiser窗口形状Fig.4 Shapes of Kaiser Window with Different α Values

若滤波器通带和阻带波纹相等,即 $\delta_p = \delta_s$ 时,则滤波器的节数 N 可以通过式(13)确定:

$$N \approx \frac{-20 \lg \delta_p - 7.95}{\frac{14.36 \Delta \omega}{2\pi}} = \frac{A_s - 7.95}{\frac{14.36 \Delta \omega}{2\pi}} \quad (13)$$

Kaiser窗低通滤波器最基本的参数是截断频率 ω_c 、滤波器节数 N 和Kaiser窗参数 α 。但在实际设计滤波器时,Kaiser窗参数 α 不够直观,通常选用滤波器衰减 A_s ,且 A_s 和 α 可通过式(12)转换。

3 数据处理与分析

3.1 仿真实验

为了验证零相位Kaiser窗滤波器滤除MEX多普勒数据噪声后对定轨的改善效果,本文首先进行仿真实验。使用MAGREAS对2010-06-26 T07:17:21至T12:06:09时段内的MEX双程多普勒测量过程进行模拟,得到精确的频率数据Data1(数据量为17 329,采样间隔为1 s)。在Data1上混入均值为0、方差为0.005 6 Hz的白噪声数据(Data_noise),得到仿真数据Data2。将Data_noise通过零相位Kaiser窗低通滤波器(截断频率 $\omega_c = 0.01$ Hz,滤波器节数 $N = 5 775$,滤波器衰减 $A_s = -28.90$ dB,滤波器最优参数通过反复测试得到)后叠加到Data1上得到Data3,将Data3作为仿真数据Data2滤除白噪声后的结果。利用MAGREAS软件对模拟数据进行定轨,并对初轨在X、Y、Z方向各添加100 m的偏移。表1为利用仿真数据(Data2和Data3)定轨后对初轨的修正结果。

表1 仿真数据定轨对初轨的修正结果

Tab.1 Correction Results of Initial Orbit Using the Simulated Data

仿真定轨数据	测速残差 RMS /(mm·s ⁻¹)	定轨误差 /m
滤波前数据 Data2	0.107	$\Delta X = -14.036$ $\Delta Y = -30.058$ $\Delta Z = -25.156$
滤波后数据 Data3	0.038	$\Delta X = -4.594$ $\Delta Y = -10.406$ $\Delta Z = -8.592$

从表1中可以看出,滤波后的数据比滤波前的数据所确定的轨道更为精确,双程多普勒测速残差RMS从0.107 mm/s减少至0.038 mm/s,定轨误差在X、Y、Z方向上也减小为原来的1/3左右。

3.2 MEX实测数据分析

通过仿真数据的测试可以初步确定,零相位Kaiser窗滤波器滤除多普勒数据中的噪声后,明显改善了定轨精度。为验证Kaiser窗滤波器在实际应用中的效果,选择MEX 2010-06-26 T07:17:21至T12:06:09弧段的多普勒实测数据进行测试。在该弧段内,数据按1 s间隔连续采样,数据量为17 329,数据文件为ESA 2010-06-26 MEX观测文件。滤波器的输入为残余频率,是观测数据和预测数据的差值;滤波后的值叠加到预测数据上作为观测数据滤除白噪声后的结果。零相位Kaiser窗低通滤波器的参数设置为:截断频率 $\omega_c = 0.0025$ Hz,滤波器节数 $N = 5 774$,滤波器衰减 $A_s = -100$ dB,滤波器的最优参数通过反复测试得到。图5为实测数据滤波前后的波形,是定轨之前的情况。图6和图7分别为利用原始数据和滤波后数据解算的轨道外推3 h后与ESA精密轨道在径向(R)、切向(T)和法向(N)3个方向上的差异。表2为利用滤波前后数据解算的轨道对精密初轨的修正结果。其中, V_X 、 V_Y 、 V_Z 分别表示航天器的初始速度在X、Y、Z方向上的分量; ΔV_X 、 ΔV_Y 、 ΔV_Z 分别是对应的速度差。

对比定轨结果发现,滤除实测数据中的白噪声后,定轨的改善效果明显。与仿真分析情况类似,双程多普勒测速残差RMS从0.107 mm/s减少至0.031 mm/s,本弧段的轨道位置和速度与ESA精密轨道的差异也明显变小。

由图6和图7可以看出,利用滤波后数据解

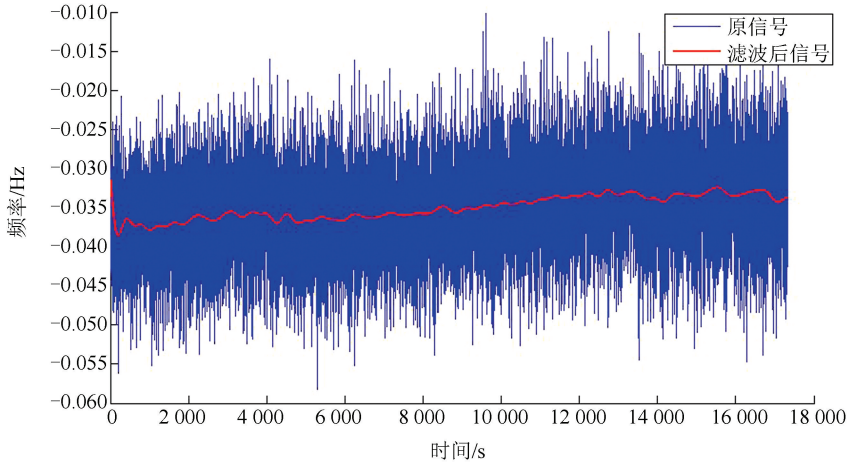


图 5 残余频率滤波前后的波形

Fig.5 Waveforms of Residual Calibrated X-band Frequency Shift Before and After Filtering

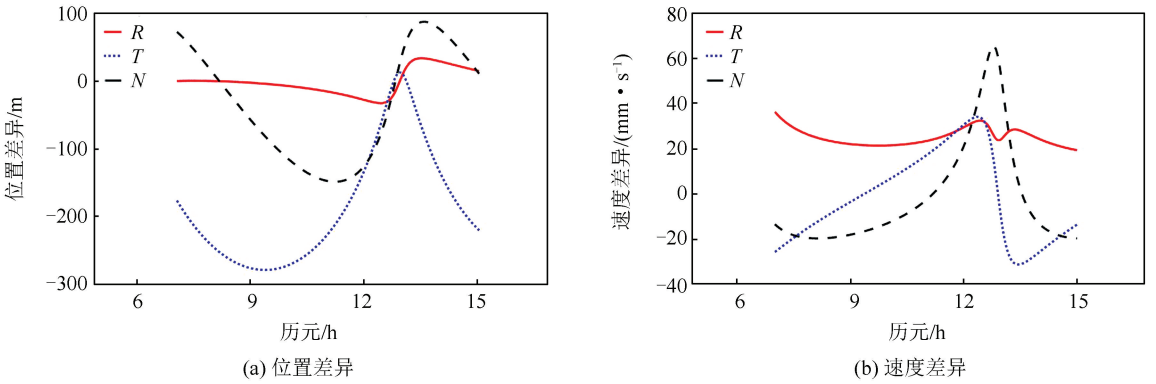


图 6 原始数据解算的轨道外推 3 h 后与 ESA 精密轨道之差

Fig.6 Differences Between the ESA Reconstructed Orbit and the Reconstructed Orbit of Original Data After 3 h Prediction

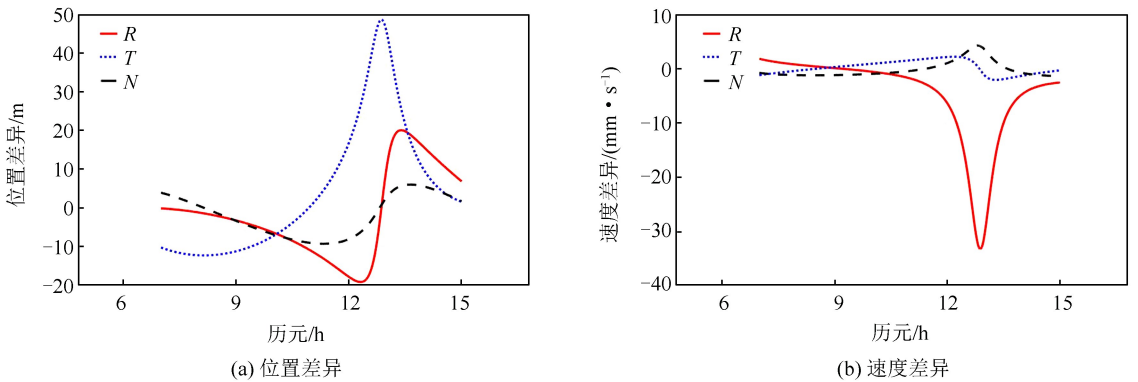


图 7 滤波后数据解算的轨道外推 3 h 后与 ESA 精密轨道之差

Fig.7 Differences Between the ESA Reconstructed Orbit and the Reconstructed Orbit of Filtered Data After 3 h Prediction

算的轨道与 ESA 精密轨道的差异要明显小于原始数据的差异。图 6 中原始数据对应的位置差异沿切向最大约为 300 m,而图 7 中滤波后数据对应的位置差异沿切向最大仅为 50 m 左右。此

外,滤波后数据对应的速度差异也明显小于原始数据对应的速度差异。这一结果与表 2 中给出的两种数据的测量精度相一致。

表2 实测数据定轨对精密初轨的修正结果

Tab.2 Correction Results of Precise Orbit Using the

Measured Data

MEX 实测 定轨数据	MAGREAS	
	测速残差 RMS /(mm·s ⁻¹)	初轨修正结果
原始数据	0.107	$\Delta X = -62.761$ m
		$\Delta Y = -138.464$ m
		$\Delta Z = -114.972$ m
		$\Delta V_X = -3.010$ mm/s
		$\Delta V_Y = 12.698$ mm/s
滤波后数据	0.031	$\Delta V_Z = -44.553$ mm/s
		$\Delta X = -3.260$ m
		$\Delta Y = -8.124$ m
		$\Delta Z = -6.726$ m
		$\Delta V_X = -0.222$ mm/s
		$\Delta V_Y = 0.859$ mm/s
		$\Delta V_Z = -2.145$ mm/s

4 结 语

通过仿真数据和实测数据的测试可以确定,零相位 Kaiser 窗低通滤波器滤除 MEX 多普勒频率数据中的白噪声后,对定轨精度有很大的改善。滤波后,双程测速数据残差 RMS 达到了 0.031 mm/s,减小为原来的 1/3 左右;轨道位置和速度与 ESA 精密轨道的差异也明显变小。该滤波算法作为定轨前的数据预处理可以提高定轨的精度,从而为中国火星探测器的轨道数据处理提供一定的参考。

参 考 文 献

- [1] Fletcher K. Mars Express: The Scientific Investigations[M]. Belgium: ESA Communications, 2009
- [2] Formisano V, Atreya S, Encrenaz T, et al. Detection of Methane in the Atmosphere of Mars[J]. *Science*, 2004, 306(5702): 1758-1761
- [3] Pätzold M, Häusler B, Tyler G L, et al. Mars Express 10 Years at Mars: Observations by the Mars Express Radio Science Experiment (MaRS) [J]. *Planetary and Space Science*, 2016, 127: 44-90
- [4] Huang Yong, Hu Xiaogong, Cao Jianfeng, et al. The Mars Satellite Orbit Determination Software at Shanghai Astronomical Observatory[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2009, 28(6): 83-89(黄勇,胡小工,曹建峰,等.上海天文台火星卫星定轨软件系统[J].飞行器测控学报,2009,28(6):83-89)
- [5] Hu Songjie, Tang Geshi. BACC Orbit Determination and Analysis Software for Deep-Space Explorers[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2010, 29(5): 69-74(胡松杰,唐歌实.北京中心深空探测器精密定轨与分析软件系统[J].飞行器测控学报,2010,29(5):69-74)
- [6] Rosenblatt P, Lainey V, Le Maistre S, et al. Accurate Mars Express Orbits to Improve the Determination of the Mass and Ephemeris of the Martian Moons[J]. *Planetary and Space Science*, 2008, 56(7): 1043-1053
- [7] Yan J G, Yang X, Ye M, et al. Independent Mars Spacecraft Precise Orbit Determination Software Development and Its Applications[J]. *Astrophysics & Space Science*, 2017, 362: 123-1-123-15
- [8] Ye Mao, Li Fei, Yan Jianguo, et al. Wuhan University Deep-Space Orbit Determination and Gravity Recovery System (WUDOGS) and Its Application Analysis [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(3): 288-296(叶茂,李斐,鄢建国,等.深空探测器精密定轨与重力场解算系统(WUDOGS)及其应用分析[J].测绘学报,2017,46(3):288-296)
- [9] Huang Zhiwei. Design of Radio Transmitting and Receiving Circuits[M]. Beijing: Beihang University Press, 2004(黄智伟.无线电发射与接收电路设计[M].北京:北京航空航天大学出版社,2004)
- [10] Xie Chao. The Analysis of Thermal Noise Characteristics of the RF Front-End in Receivers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008(谢超.接收机射频通道的热噪声特性分析[D].长沙:国防科学技术大学,2008)
- [11] Andert T P. Masses of Small Bodies: Mass Estimation of Small Solar System Bodies Using Radio Science Data from Close Flybys [D]. Cologne: Universität zu Köln, 2010
- [12] Liu Q, Matsumoto K, Iwata T, et al. Effect of Phase Pattern of Antennas Onboard Flying Spin Satellites on Doppler Measurements [J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2011, 47(1): 405-419
- [13] Liu Yicheng. Digital Signal Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004(刘益成.数字信号处理[M].北京:电子工业出版社,2004)
- [14] Ji Yuebo, Qin Shuren, Tang Baoping. Zero-Phase Digital Filter[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2000, 23(6): 4-7(纪跃波,秦树人,汤宝平.零相位数字滤波器[J].重庆大学学报(自然科学版),2000,23(6):4-7)
- [15] Gustafsson F. Determining the Initial States in Forward-Backward Filtering[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 44(4): 988-992

- [16] Karlsson G, Vetterli M. Extension of Finite Length Signals for Sub-band Coding[J]. *Signal Processing*, 1989, 17(2): 161-168
- [17] Datar A, Jain A, Sharma P C. Design of Kaiser Window Based Optimized Prototype Filter for Cosine Modulated Filter Banks[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(5): 1 742-1 749
- [18] Lin Y P, Vaidyanathan P P. A Kaiser Window Approach for the Design of Prototype Filters of Cosine Modulated Filterbanks[J]. *Signal Processing Letters IEEE*, 1998, 5(6): 132-134
- [19] Creusere C D, Mitra S K. A Simple Method for Designing High-Quality Prototype Filters for M-band Pseudo QMF Banks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995, 43(4): 1 005-1 007

Improving MEX Orbit Determination Accuracy by Using Zero-Phase Kaiser Window Filter

QU Chunkai¹ LI Fei^{1,2} YANG Xuan² YAN Jianguo² HAO Weifeng¹
YE Mao² JIN Weitong² WANG Hong³

1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

Abstract: Precise orbit determination is crucial in deep space exploration, and white noise in orbital tracking data can affect orbit determination performance. Based on the analysis of zero phase, we compared three kinds of filters, FRR, RRF and filtfilt in Matlab, and designed a zero-phase low pass filter using Kaiser window. The performance of the filter was verified by simulated and measured tracking data of MEX. After filtering white noise in the MEX measurement, the accuracy of MEX orbit determination could be significantly improved. For the two-way Doppler tracking data, the RMS of the velocity residuals was reduced to about one third of the original, that is, in the level of 0.031 mm/s; the difference of orbital position and velocity with the ESA reconstructed orbit was significantly reduced. The filtering process can be used as data preprocessing to improve orbit determination accuracy, and can also provide some reference for Chinese Mars exploration mission.

Key words: zero-phase filter; MEX; Kaiser window; white noise; orbit determination accuracy

First author: QU Chunkai, postgraduate, specializes in Doppler tracking and data processing. E-mail: quchunkai999@163.com

Corresponding author: LI Fei, PhD, professor. E-mail: fli@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41374024, 41604004, 41174019; the Hubei Province Natural Science Foundation Innovation Group Project, No. 2015CFA011; the Open Research Fund of State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, No. 2016ADL-DW0103; the Open Research Fund of State Key Laboratory of Space Target Measurement; China Postdoctoral Science Foundation, No. 2016M602360.