

一种基于频移补偿的 apFFT 相位估计改进方法及应用

路伟涛^{1,2}, 任天鹏^{1,2}, 陈 略^{1,2}, 张雨佳^{1,2}, 韩松涛^{1,2}, 周之金^{1,2}, 韩倩倩^{1,2}
(1 航天飞行动力学技术重点实验室 北京 100094;
2 北京航天飞行控制中心 北京 100094)

摘要: 全相位快速傅里叶变换(all phase Fast Fourier Transform, apFFT)相位一致性特点使正弦信号相位估计不受频率估计影响,但由于频谱泄露和栅栏效应,apFFT相位估计性能受信号频率位置影响。针对该问题,提出了一种基于高精度频率估计和补偿的apFFT相位估计方法。首先,对信号进行高精度频率估计,并以此对信号进行频移补偿,然后对补偿信号进行apFFT,最后求解信号相位。蒙特卡洛仿真结果表明:所提算法的相位估计性能不受信号频率位置影响,相位估计误差性能与理论值一致,受两参数克拉美罗界(CRLB₂)约束,约为1.158 2倍的CRLB₂;相位估计性能和抗噪声能力明显优于经典apFFT算法和其他对比算法。更进一步,利用我国首次火星探测器TW-1(天问一号)近火捕获段干涉测量数据进行算法验证,结果表明:相位估计精度约4 mrad,干涉测量时延估计精度约50 ps。

关键词: 相位估计; apFFT; 频移补偿; CRLB₂; 天问一号

中图分类号: TN98 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)02-0027-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20221109001

引用格式: 路伟涛,任天鹏,陈略,等.一种基于频移补偿的apFFT相位估计改进方法及应用[J].遥测遥控,2023,44(2):27-34.

An improved apFFT phase estimation method based on frequency compensation and its application in deep space exploration

LU Weitao^{1,2}, REN Tianpeng^{1,2}, CHEN Lue^{1,2}, ZHANG Yujia^{1,2}, HAN Songtao^{1,2}, ZHOU Zhijin^{1,2}, HAN Qianqian^{1,2}
(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing 100094, China;
2. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

Abstract: The all-phase FFT (apFFT) has the advantage of phase consistency, which makes the phase estimation unaffected by frequency estimation performance. While the phase estimation performance of apFFT may be degraded by frequency offset because of spectrum leakage and fence effect. In refer to the problem, this paper proposed an improved apFFT method based on frequency compensation. Firstly, the frequency was accurately estimated to compensate the signal, and then calculate the apFFT of the compensated signal, and finally the phase was estimated. The Monte Carlo simulation results showed that the phase estimation performance of the novel method was almost immune to the frequency offset, and also was coincide with the theoretical analysis. Moreover, its performance which was restrained by Two-parameter Cramer Lower Band (CRLB₂), was about 1.158 2 times CRLB₂ under the Monte Carlo situation. The anti-noise capacity and phase estimation performance of the proposed method were significantly better than that of the traditional apFFT method and other two compared algorithms. Moreover, the raw data of TW-1 satellite was utilized to verify the proposed method, obtaining an accuracy of about 4 mrad of phase estimation, and an accuracy of about 50 ps of interferometry delay estimation.

Keywords: Phase estimation; apFFT; Frequency compensation; CRLB₂; TW-1

Citation: LU Weitao, REN Tianpeng, CHEN Lue, et al. An improved apFFT phase estimation method based on frequency compensation and its application in deep space exploration[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(2): 27-34.

引言

高斯白噪声条件下的正弦信号参数估计是无线电测量、阵列信号处理、雷达信号处理等领域的一个关键问题, 在无线电测量领域, 深空探测器下行载波及信标信号均可建模为正弦信号, 其相位估计精度是无线电测量精度和深空探测器测定轨精度的决定性因素之一。因此, 开展正弦信号高精度相位估计方法研究在深空探测无线电测量中具有重要意义。

随着计算机和数字处理技术的发展, 基于 FFT 频谱分析的数字测相法逐渐成为主流。目前常用算法如 Rife 算法^[1]及其改进算法^[2]、相位差算法^[3,4]等的相位估计一般是在频率估计的基础上实现, 相位估计误差中不可避免地耦合了频率估计误差, 估计性能受三参数(幅度、频率、相位)卡拉美罗下界(CRLB₃)约束^[1,5], 故频率估计性能在一定条件下可接近 CRLB₃^[6], 但相位估计性能距 CRLB₃ 尚有一定距离。

相对于 FFT 相位估计算法, apFFT 谱分析方法由于具有“相位不变性”^[7], 即单音正弦信号的全相位谱所有谱线的相位均与某个采样点的相位一致, 实现了相位估计与频率估计的解耦, 估计性能受两参数(幅度、相位)卡拉美罗下界(CRLB₂)约束, 相对于传统 FFT 算法得到显著改善^[8]。apFFT 优良的特性在光学^[9]、激光信号处理^[10]与无线通信^[11]等领域得到了广泛应用。但是 apFFT 谱分析方法是在 FFT 的基础上实现的, 依然存在频谱泄露问题^[12], 因此基于 apFFT 的相位估计性能仍受信号频率位置影响。针对该问题, 本文提出了一种基于高精度频率估计和补偿的 apFFT 相位估计方法, 该方法首先对信号进行高精度频率估计, 并以此对信号进行频移补偿, 使信号频偏始终趋于 0, 然后对补偿信号进行 apFFT, 求解信号相位, 并对所提算法的误差性能进行了分析和蒙特卡洛仿真。

1 基于频移补偿的 apFFT 相位估计算法原理

1.1 问题描述

高斯白噪声下单一正弦信号可建模如下(不失一般性, 假设信号幅度为 1):

$$x(n) = e^{j(2\pi \frac{k_0}{N} n t_s + \phi_0)}, n = 0, 1, \dots, N-1, k_0 = N f_0 / f_s \quad (1)$$

其中, f_0 和 ϕ_0 分别为信号频率和初始相位, f_s 为采样频率, t_s 为采样间隔, N 为采样点数。 k_0 为信号真实频率位置, 相对某一谱线位置存在偏差 $\delta \in [-0.5, 0.5]$ 。

假设 $N=2M-1$, 用长度为 M 的卷积窗 $w_c(n)$ 对输入数据 $x(n)$ 加权; 然后将间隔为 M 的数据两两叠加(中间元素除外)而形成 M 个数据 $y(m)$, $m=0, \dots, M-1$; 最后, 对 $y(m)$ 做 FFT 即可得到 apFFT 频谱 $Y(k)$ 。经理论推导, 信号 $x(n)$, $n=-(M-1), -(M-2), \dots, (M-1)$, 的 apFFT 谱 $Y(k)$ 表达为:

$$Y(k) = \frac{\sin^2[(k_0 - k)\pi]}{\sin^2[(k_0 - k)\pi/M]} \frac{e^{j\theta_0}}{M^2} \quad (2)$$

其中, θ_0 为信号 $x(n)$ 在 $n=0$ 处的相位。可以看出, $Y(k)$ 所有谱线的相位均与采样点 $x(0)$ 的相位一致, 即为“相位不变性”, 以此求取峰值谱线的相位即可得到采样点 $x(0)$ 的相位估计:

$$\hat{\theta}_0 = \arg[Y(k)]_{k=\max(|Y(k)|)} \quad (3)$$

文献[8]给出了 apFFT 算法的相位估计性能:

$$\sigma_{\hat{\theta}_0} = \frac{1}{\sqrt{3M \cdot \text{SNR} \sin^2(\delta)}} \quad (4)$$

其中, apFFT 谱分析数据长度为 $2M-1$, SNR 为信号的信噪比, δ 为信号频率相对 FFT 谱线的位置偏差, 在 $[-0.5, 0.5]$ 内取值。可以看出, $\delta=0$ 时, 相位估计误差最小。

1.2 改进方案

针对前文分析, 信号频率偏差越小, 相位估计性能就越好, 基于此本文提出了一种基于频率高精度估计和补偿的 apFFT 相位估计方法, 即首先对正弦信号进行高精度频率估计, 并对信号进行频率补偿, 最后再利用 apFFT 进行相位估计。具体为:

① 对信号进行高精度频率估计

针对正弦信号频率估计问题, 国内外学者提出了很多经典算法, 其中, Rife 算法、Candan 算法^[13]和 Macleod 算法^[14]均利用信号 FFT 峰值谱线及第二、第三谱线的关系进行频率精确估计, 估计性能较高、运算量不大, 但抗噪声能力还不够强。本文结合在前期研究的基础上, 利用一种改进的 CZT 频率估计算法进行高精度频率估计^[15]:

$$\hat{\delta} = \frac{|X(k_p - 1)| - |X(k_p + 1)|}{2\cos\frac{L\pi}{M}|X(k_p)| - (|X(k_p + 1)| + |X(k_p - 1)|)} \quad (5)$$

$$\hat{k}_0 = k_{st} + \frac{L}{M}(k_p + \hat{\delta}) \quad (6)$$

$$\hat{f}_0 = \frac{f_s}{N} \left(k_{st} + \frac{L}{M}(k_p + \hat{\delta}) \right) \quad (7)$$

其中, k_{st} 为 CZT 频谱分析的起始频率位置, 起始频率为 $f_{st} = k_{st} f_s / N$; L 为 CZT 频谱分析带宽因子, CZT 频谱分析带宽为 $L f_s / N$; M 为 CZT 频谱细化因子, CZT 频谱分辨率为 f_s / MN ; $|X(\bullet)|$ 为信号的 CZT 频谱, k_p 为 CZT 频谱峰值谱线序号, 取值范围 $0 \sim (M-1)$ 。

几种算法的频率估计性能对比如图 1 所示。仿真条件: $f_s = 1\,024$ Hz, $N = 1\,024$; 信号基准频率 412 Hz; $\delta \in [0, 0.5]$, 以 0.05 为步长; 蒙特卡洛仿真次数 $MC = 1\,000$; CZT 参数: 起始频率 119 Hz, 截止频率 121 Hz, 则 $L = 2$; 频谱细化因子 $M = 10$, CZT 频谱分辨率 0.2 Hz; 对同一 SNR 条件下所有频率偏差的频率估计误差求平均, 得到该 SNR 下的频率估计误差。图 1 中, “Improved CZT” 为本文所采用的算法, Rife、Candan、MacLeod 为几种典型的频率估计算法, CRLB 为克拉美-罗下界。可以看出该算法在抗噪声性能、频率估计误差两个方面均更优, 因此本文选择该算法进行频率估计。

② 对信号进行频移补偿

假设信号真实频率为 f_0 , 估计频率为 \hat{f}_0 , FFT

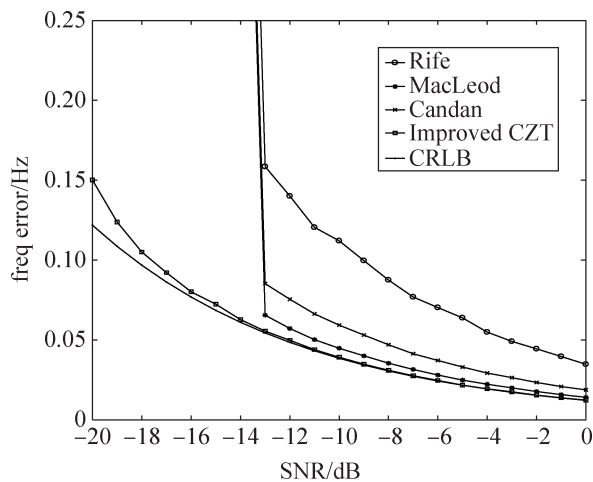


图 1 几种频率估计算法性能对比

Fig.1 The performance comparison of several frequency estimation algorithms

频谱分辨率为 Δf , 则频率偏差的估计值为

$$\hat{\delta} = \frac{\hat{f}_0}{\Delta f} - \left[\frac{\hat{f}_0}{\Delta f} \right] \quad (8)$$

其中, $[\bullet]$ 表示取距离最近的整数。由此, 构造补偿信号, 如式(9)所示, 其中 t_s 为采样间隔。

$$s_c(n) = e^{-j2\pi \frac{\hat{\delta}}{N} n t_s} \quad (9)$$

进一步可得到补偿后的信号

$$x_c(n) = x(n) s_c(n) \quad (10)$$

③ 相位估计

对 $x_c(n)$ 进行 apFFT, 然后利用式(3)得到相位估计。

1.3 性能分析

通过频移补偿后, 信号频率处于低频偏区域, 则算法相位估计性能接近零频偏下 apFFT 的相位估计性能, 因此理论上算法的相位估计误差为:

$$\sigma_{\hat{\theta}_0} = \frac{1}{\sqrt{3M \cdot \text{SNR} \sin^2(\delta)}} \Big|_{\delta=0} = \frac{1}{\sqrt{3M \cdot \text{SNR}}} \quad (11)$$

同样数据长度下的 CRLB_2 为

$$\text{CRLB}_2 = \frac{1}{\sqrt{2(2M-1) \cdot \text{SNR}}} \quad (12)$$

经计算可知, 本文算法相位估计性能约为 1.154 7 倍的 CRLB_2 。

2 仿真实验

首先对频率偏差影响进行仿真。假设 $f_s = 1\,024$ Hz, 数据总长度 $N = 1\,024$, 则 FFT 频率分辨率 1 Hz; apFFT 数据处理长度为 $N-1$; 信号基准频率 $f_0 = 412.0$ Hz, 频率偏差以 0.05 为步长从 0 增加至 0.5; 蒙特卡洛仿真次数 1 000。几种信噪比下的相位估计均方根误差结果如图 2 所示, 其中 apFFT 为典型的全相位 FFT 算法^[8], FreqCom apFFT 为本文所提算法。可以看出 apFFT 算法的相位估计误差随着频率偏差增大而显著增大, 而 FreqCom apFFT 算法在 SNR = -16 dB 时仍然具有较好的平稳性, 说明改进算法的相位估计性能基本不受频率偏差影响。

进一步对算法的误差性能进行仿真, 仿真参数如前设置。同一信噪比下, 分别对 11 个频率偏差进行蒙特卡洛仿真, 得到 11 个相位估计均方差值, 再将这 11 个均方差值进行平均, 得到该信噪

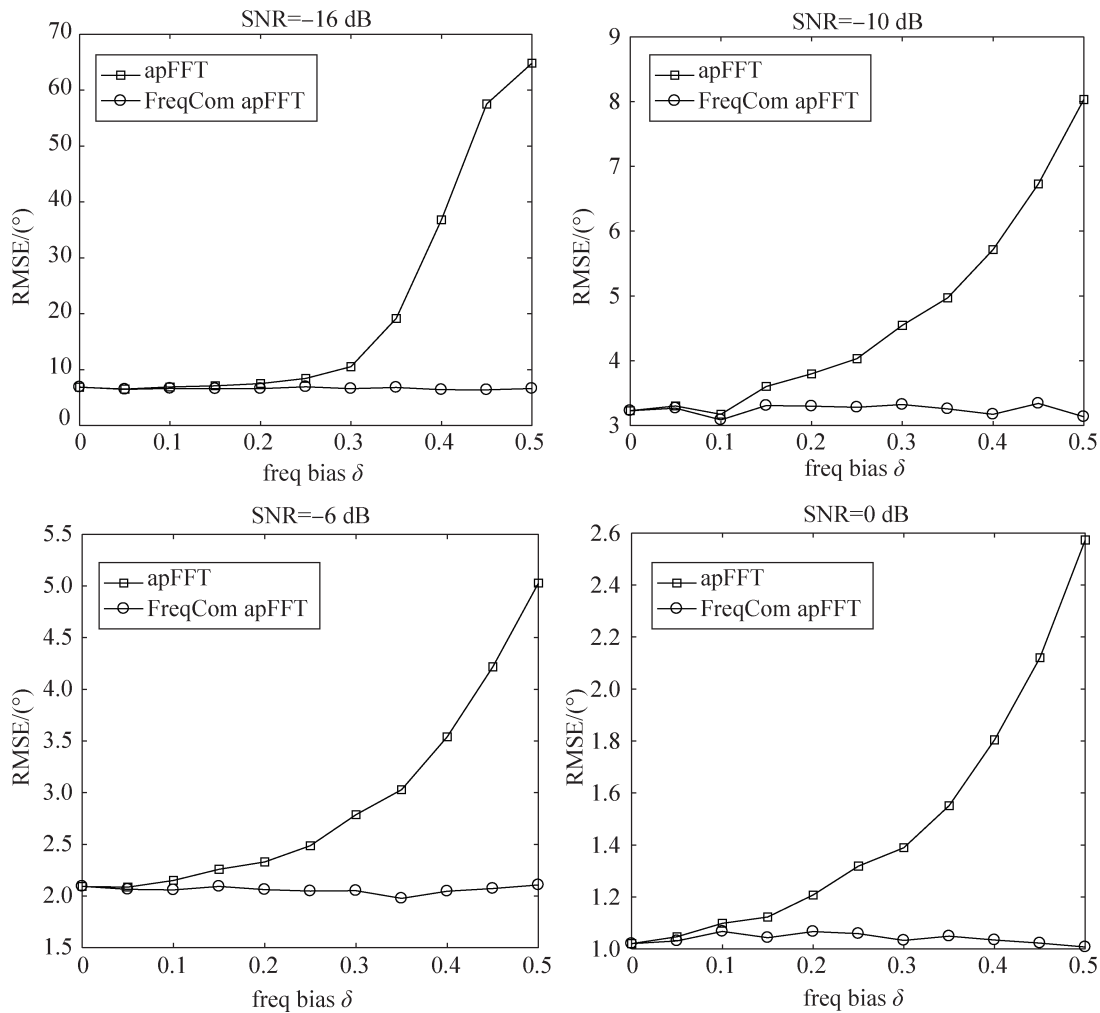


图 2 apFFT与改进算法相位估计性能随频率偏差的变化

Fig.2 The estimation performance of apFFT and the improved method with various frequency bias

比下的相位估计均方差，结果如图3所示，其中，MC表示FreqCom apFFT算法的蒙特卡洛仿真结果统计，theoretical表示FreqCom apFFT算法的理论值； $CRLB_2$ 、 $CRLB_3$ 分别为两参数和三参数克拉美-罗下界。可以看出，蒙特卡洛仿真结果与理论值吻合；算法的相位估计性能优于 $CRLB_3$ ，受 $CRLB_2$ 约束；在信噪比为-16 dB时，算法的相位估计性能依然较好，约为 $CRLB_2$ 的1.162 2倍，在仿真信噪比区间内，相位估计均方差平均约为 $CRLB_2$ 的1.158 2倍，与理论分析基本一致。图3的结果显示了算法具有较强的抗噪声能力和较高的估计性能。

为了进一步验证算法性能，选择经典 Rife 算法、相位差算法(DiFFT)、apFFT算法以及本文所提算法(FreqCom apFFT)进行对比仿真，并与两参数克拉美罗下界($CRLB_2$)和三参数克拉美罗下界

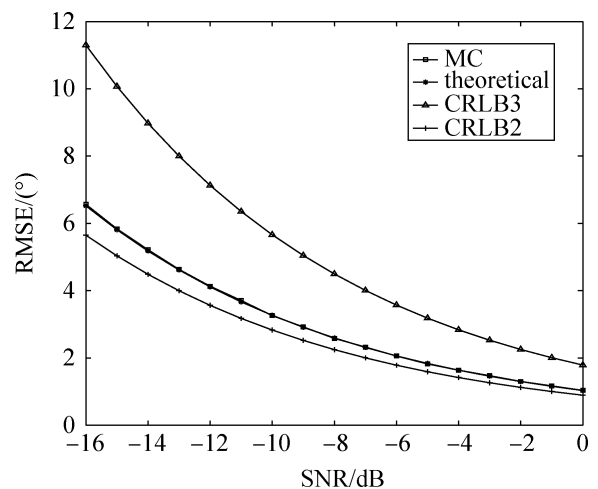


图 3 改进算法相位估计误差性能仿真

Fig.3 The phase estimation performance of the improved algorithm by Mont Carlo simulation with various SNR

(CRLB₃)对比。仿真参数如前设置；同样在相同信噪比下，分别对11个频率偏差进行蒙特卡洛仿真，得到11个相位估计均方差值，再将这11个均方根误差进行平均，得到该信噪比下的相位估计均方差。蒙特卡洛仿真次数1000，结果如图4所示。可以看出，改进算法具有较低的信噪比容限，而apFFT算法则在信噪比高于-12 dB时，估计性能才趋于稳定；改进算法的相位估计均方根误差明显低于其余3种算法，相对apFFT算法改善了约35.22%；在仿真信噪比区间内，改进算法的相位估计均方根误差与CRLB₂比较接近，而Rife算法和相位差法的相位估计误差高于CRLB₃。图4的结果显示了改进算法具有较高的相位估计精度和较低的信噪比容限。

3 试验验证

我国首个火星探测器天问一号(TW-1)与2020年07月24日在海南文昌发射，2021年01月08日TW-1处于近火捕获阶段，距离地球约1.33亿km，链路衰减和动态性明显增大。深空干涉测量系统组织阿根廷深空站(AG01, 35 m口径)和纳米比亚站(NM01, 18 m口径)进行跟踪测量。为

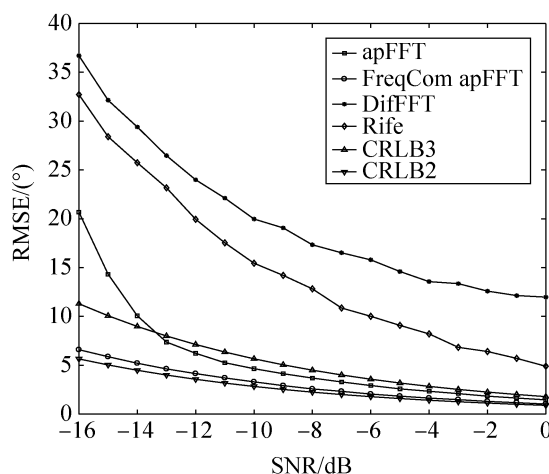


图4 不同算法相位估计性能对比

Fig.4 The estimation performance comparison of different algorithms

了验证本文所提相位估计算法，对此次干涉测量数据进行了处理。TW-1探测器下行载波为X频段，DOR信标信号CCSDS规范，共两组DOR信号，分别位于载波约±3.85 MHz、±19.2 MHz，图5给出了两站接收的四个通道信号频谱，分别为DOR信标(ChId=1,3,4)和主载波信号(ChId=2)，可以看出下行信号频谱明显。

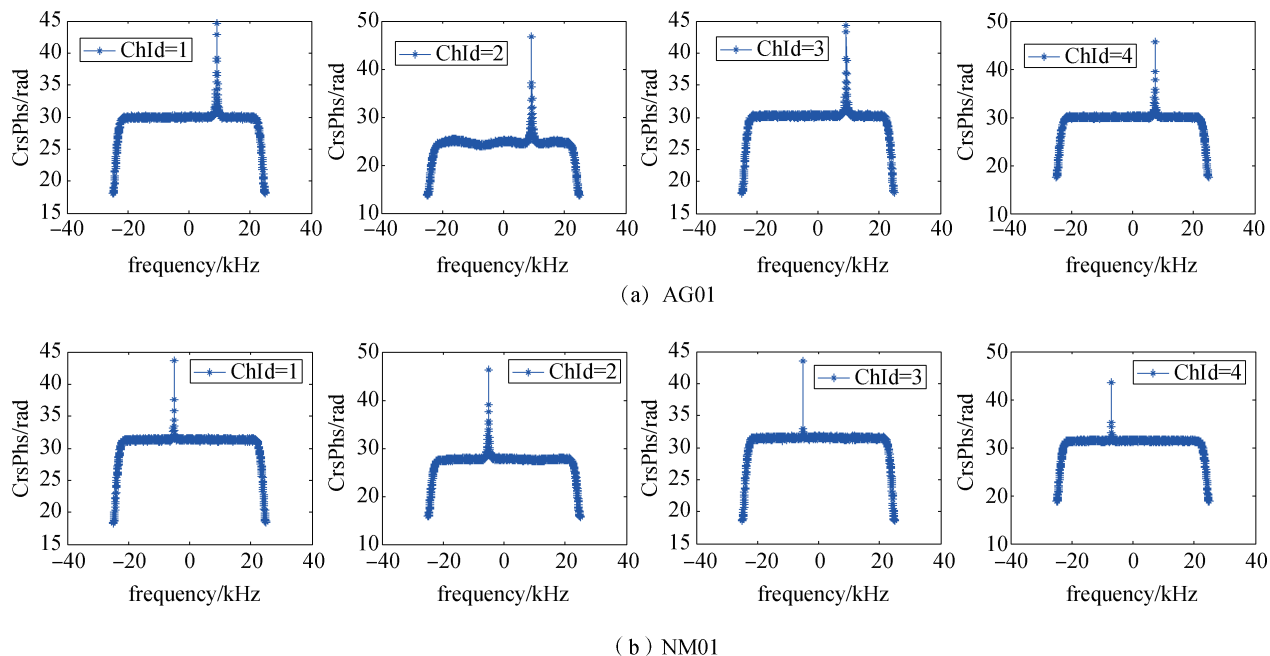


图5 TW-1数据频谱(20210108)

Fig.5 The spectrum of TW-1 (20210108)

图 6 给出了两测站接收的探测器 DOR 信标数据相位估计结果。可以看出，每个测站 4 个通道的相位估计随机误差均较高，最高达到 0.27 rad。但对比可以看出，单站所有通道的相位抖动规律基本一致，两站的相位变化特性也呈现一定相关性，这说明相位估计受信噪比之外的因素影响，其中大气介质延迟的扰动是主要因素。根据干涉测量数据处理原理，需要对测站数据进行测站间和通道间差分处理。

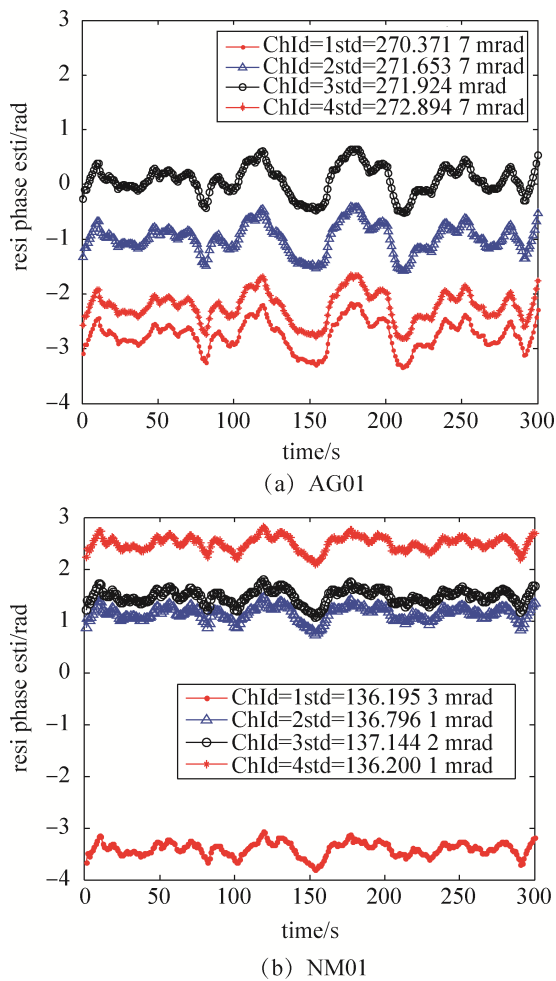


图 6 TW-1 相位估计结果(20210108)
Fig.6 The phase estimation result of TW-1 (20210108)

在图 6 相位估计的结果上，进行测站间、通道间差分，图 7 给出了通道 2 与通道 3 的双差分。可以看出，相位抖动基本消失，此时随机精度约 8.8 mrad。考虑到双差分对随机误差的放大作用（双差分处理对随机误差放大 2 倍），可以认为相位估计精度约为 4.4 mrad。

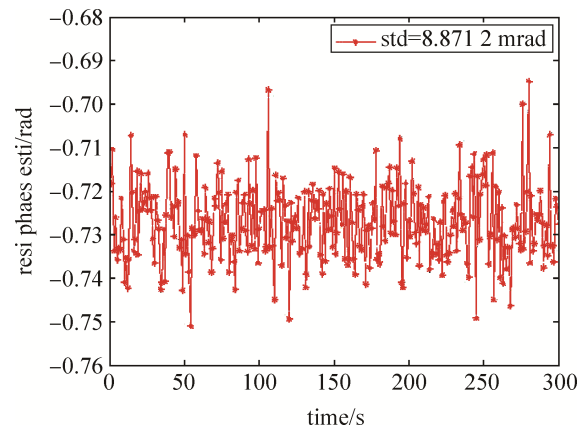


图 7 TW-1 双差分相位估计结果(20210108)
Fig.7 The double difference of phase estimation of TW-1 (20210108)

在图 6 的基础上，对相位进行双差分处理，可得到时延估计，如图 8 所示，时延估计随机精度约为 50 ps，这与我国 VLBI 网的干涉测量时延精度基本一致^[16]。

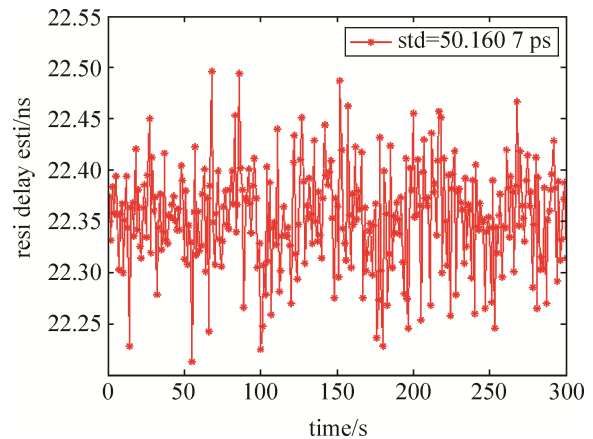


图 8 TW-1 干涉测量时延估计结果(20210108)
Fig.8 The delay estimation of TW-1 (20210108)

4 结束语

本文针对无线电测量领域中高精度相位估计需求，结合 apFFT 相位一致性的特点，提出了一种基于高精度频移补偿的 apFFT 相位估计方法。首先，利用一种改进的 CZT 频率估计算法对信号进行高精度频率估计，并以此对信号进行频移补偿；然后，对补偿信号进行 apFFT，求解信号相位。蒙特卡洛仿真结果表明，所提算法的相位估计性能不受信号频率位置影响，相位估计误差性能与理论值一致，受 $CRLB_2$ 约束，约为 1.158 2 倍的

CRLB₂; 改进算法性能与经典 Rife 算法、相位差算法 (DiFFT)、apFFT 算法等三种典型算法进行了对比, 结果表明所提算法具有较低的信噪比容限和较高的估计精度, 相对 apFFT 算法改善了约 35.22%。进一步, 利用我国首次火星探测器 TW-1 近火捕获段干涉测量数据进行算法验证, 结果表明, 经过站间、通道间差分处理消除大气介质延迟扰动后, 相位估计精度约 4 mrad, 干涉测量时延估计精度约 50 ps。仿真和实测数据处理结果表明, 本文所提算法可为深空探测中高精度无线电测量和深空探测器高精度测定轨提供支持, 在后续深空探测任务中具有重要意义。

参考文献

- [1] RIFE D C, VINCENT G A. Use of discrete fourier transform in the measurement of frequencies and levels of tones[J]. Bell Syst Tech. J., 1970(49): 197-228.
- [2] 邓振森, 刘渝, 王志忠. 正弦波频率估计的修正 Rife 算法[J]. 数据采集与处理, 2006, 21(4): 473-477.
DENG Zhenmiao, LIU Yu, WANG Zhizhong. Modified Rife algorithm for frequency estimation of sinusoid wave[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2006, 21(4): 473-477.
- [3] 齐国清, 贾欣乐. 基于 DFT 相位的正弦波频率和初相的高精度估计方法[J]. 电子学报, 2001, 29(9): 1164-1167.
QI Guoqing, JIA Xinle. High-accuracy frequency and phase estimation of single-tone based on phase of DFT[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(9): 1164-1167.
- [4] 丁康, 钟舜聪. 通用的离散频谱相位差校正方法[J]. 电子学报, 2003, 31(1): 142-145.
DING Kang, ZHONG Shuncong. A universal phase difference correcting methods on discrete spectrum[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(1): 142-145.
- [5] 齐国清. 离散实正弦信号参数估计的 Cramer Rao 方差下限[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(2): 151-155.
QI Guoqing. Cramer Rao bounds of real sinusoid parameter estimation from discrete-time observations [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2003, 18(2): 151-155.
- [6] ABOUTANIOS E, MULGREW B. Iterative frequency estimation by interpolation on Fourier coefficients[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(4): 1237-1242.
- [7] 王兆华, 侯正信, 苏飞. 全相位 FFT 频谱分析[J]. 通信学报, 2003, 24(B11): 16-19.
WANG Zhaohua, HOU Zhengxin, SU Fei. Spectral analysis of all-phase FFT[J]. Journal on Communications, 2003, 24(B11): 16-19.
- [8] 黄翔东, 王兆华. 全相位 FFT 相位测量法的抗噪性能[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(3): 286-291.
HUANG Xiangdong, WANG Zhaohua. Anti-noise performance of all-phase FFT phase measuring method[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2011, 26(3): 286-291.
- [9] 陈明徕, 罗秀娟, 张羽, 等. 基于全相位谱分析的剪切光束成像目标重构[J]. 物理学报, 2017, 66(2): 141-146.
CHEN Minglai, LUO Xiujuan, ZHANG Yu, et al. Sheared-beam imaging target reconstruction based on all-phase spectrum analysis[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(2): 141-146.
- [10] 王彦林, 石云波, 康强, 等. 基于双窗全相位 FFT 的激光多普勒频率提取与校正方法[J]. 激光与红外, 2019, 49(12): 1395-1401.
WANG Yanlin, SHI Yunbo, KANG Qiang, et al. Frequency extraction and correction based on double-window all-phase FFT of laser Doppler[J]. Laser&Infrared, 2019, 49(12): 1395-1401.
- [11] 戈立军, 赵澜, 李月, 等. 全相位 FFT 的 OFDM 系统 $\Sigma\Delta$ 量化噪声整形[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2017, 44(4): 80-85, 117.
GE Lijun, ZHAO Lan, LI Yue, et al. Quantization noise shaping of the sigma-delta modulator based on the all phase FFT in OFDM systems [J]. Journal of Xidian University(Natural Science), 2017, 44(4): 80-85, 117.
- [12] AGREZ D. Improving phase estimation with leakage minimization[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2005, 54(4): 1347-1353.
- [13] CANDAN C. A method for fine resolution frequency estimation from three DFT samples[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(6): 351-354.
- [14] MACLEOD M D. Fast nearly ML estimation of the parameters of real or complex single tones or resolved multiple tones[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(1): 141-148.
- [15] LU Weitao, Chen Lue, Wang Zheng, et al. A high-accuracy, high anti-noise, unbiased frequency estimator

based on three CZT coefficients for deep space exploration mission[J]. Sensors 2022, 22: 7364.

- [16] 刘庆会, 黄勇, 舒逢春, 等. 天问一号 VLBI 测定轨技术[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2022, 52(3), 239507: 1-11.
LIU Qinghui, HUANG Yong, SHU Fengchun, et al. VLBI technique for the orbit determination of Tianwen-1[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2022, 52(3), 239507: 1-11.

[作者简介]

路伟涛 1985 年生, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为深空无线电轨道测量和时空基准维持。

任天鹏 1982 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为深空无线电轨道测量和空间态势

感知。

陈略 1983 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为深空无线电轨道测量和时空基准维持。

张雨佳 1994 年生, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为深空无线电轨道测量。

韩松涛 1982 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为深空无线电轨道测量。

周之金 1997 年生, 学士, 研究实习员, 主要研究方向为深空无线电轨道测量和时空基准维持。

韩倩倩 1990 年生, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为深空无线电轨道测量。

(本文编辑: 杨秀丽)