

基于小波阈值去噪和共轭模糊函数的时频差联合估计算法

窦慧晶* 王千龙 张雪

(北京工业大学电子信息与控制工程学院 北京 100124)

摘要: 为了解决二阶互模糊函数对相关噪声处理的局限性问题,以及基于四阶累积量的联合估计算法的运算量大的问题,该文利用小波阈值去噪方法结合非圆信号的特性,提出一种新的时频差联合估计算法。该方法首先对接收信号进行小波阈值去噪,然后构造共轭模糊函数,最后再进行2维搜索,得到时差和频差参数。仿真实验给出不同信噪比下的参数估计结果,得出这种算法能抑制相关噪声,又能相对降低运算复杂度,并且在较低信噪比下也能做出准确估计。

关键词: 信号处理; 小波阈值去噪; 非圆信号; 共轭模糊函数; 联合估计

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)05-1123-06

DOI: 10.11999/JEIT150878

A Joint Estimation Algorithm of TDOA and FDOA Based on Wavelet Threshold De-noising and Conjugate Fuzzy Function

DOU Huijing WANG Qianlong ZHANG Xue

(College of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology,
Beijing 100124, China)

Abstract: To solve the problem that the second-order fuzzy function can not deal with related noise, as well as the problem of large computation based on fourth-order cumulants joint estimation algorithm, this paper proposes a new joint estimation algorithm of TDOA and FDOA by using wavelet thresholding denoising method combined with characteristics of non-circular signals. The method operates firstly wavelet thresholding denoising for the received signal, then constructs conjugate fuzzy function, and finally two-dimensional search is made to obtain the time difference and frequency difference parameters. The simulation experimental results under different signal-to-noise ratio show that the proposed algorithm can not only suppress correlated noise, but also has relatively lower computational complexity and also can make accurate estimation under low signal-to-noise ratio.

Key words: Signal processing; Wavelet threshold de-noising; Non-circular signal; Conjugate fuzzy function; Joint estimation

1 引言

在卫星对干扰源定位过程中,接收器接收数据中时差和频差参数的精确估计对干扰源的准确定位起到关键作用^[1,2]。然而在参数估计技术中,通常利用互模糊函数算法^[3]来实现时频差参数的联合估计^[4-6]。但是在相关噪声环境的情况下,该算法又有一定的局限性,所以有人引入了四阶累积量的概念,虽然基于四阶统计量的方法^[7-9]能够抑制相关

噪声,但高阶累积量的计算量会增大。而之后提出的基于小波去噪的互模糊函数算法^[10]虽然在计算量上优于四阶累积量算法,并且也能处理相关噪声下的参数估计问题,但是随着信噪比的进一步降低,此算法就会表现出不足,从而使估计误差增大。所以本文利用非圆信号的特征^[11],结合共轭模糊函数算法^[12,13],研究一种基于小波阈值去噪^[14,15]的共轭模糊函数的时频差联合估计新算法,先对接收信号进行小波阈值去噪处理,再利用通信信号的非圆性以及一般噪声的圆性来去除噪声,最后得到时差和频差参数的精确估计。

2 非圆信号

非圆信号已经是现代通信中一种常见的信号,如一般的AM, BPSK, MASK等信号。对于零均值的复随机变量 x , x 的二阶统计信息全部由其相关

收稿日期: 2015-07-23; 改回日期: 2015-11-19; 网络出版: 2016-01-14

*通信作者: 窦慧晶 dhuijing@bjut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61171137), 北京市教委科研发展计划(KM201210005001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61171137), Beijing Municipal Education Commission Research and Development Programs (KM201210005001)

$E\{xx^*}\}$ 和共轭相关 $E\{x^2\}$ 决定。并且, $E\{x^2\} = \rho e^{j\varphi} E\{xx^*}\}$, 其中, φ 和 ρ 分别为 x 的非圆相位和非圆率, 并满足 $0 \leq \rho \leq 1$ 。当 $\rho = 0$ 时, x 为二阶圆随机变量, 当 $0 < \rho \leq 1$ 时, x 称为二阶非圆随机变量。常见的 BPSK 信号的非圆率为 1。

信号 $x(t)$ 的相关函数和共轭相关函数分别为

$$R_x(t, \tau) = E\{x(t)x^*(t-\tau)\} \quad (1)$$

$$R'_x(t, \tau) = E\{x(t)x(t-\tau)\} \quad (2)$$

如果存在 (t, τ) 使得 $R'_x(t, \tau)$ 不等于零, 则称 $x(t)$ 为二阶非圆随机过程, 否则称 $x(t)$ 为二阶圆随机过程。当 $\tau = 0$ 时, $E\{x^2(t)\} = \rho e^{j\varphi} E\{x(t)x^*(t)\}$ 。也就是若 $E\{x^2(t)\} = 0$, 则称为圆信号; 若 $E\{x^2(t)\} \neq 0$, 则称为非圆信号。如果 $x(t)$ 是非圆率为 1 的非圆信号, 有

$$E\{x^2(t)\} = e^{j\varphi} E\{x(t)x^*(t)\} \quad (3)$$

此时, $x(t) = x_0(t)e^{j\phi}$, $x_0(t)$ 为实值信号, ϕ 为信号相位。

3 时差(TDOA)和频差(FDOA)的联合估计算法

3.1 信号模型

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= s(t) + n_1(t) \\ y(t) &= As(t-D)e^{j2\pi\Delta ft} + n_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别为两个接收机接收到的两路信号; $s(t)$ 为辐射源信号; A 是衰减系数; D 为辐射信号到两接收机的时差; Δf 为辐射信号到两接收机的频差; $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 为未知的零均值加性高斯噪声, 且都与源信号 $s(t)$ 不相关。

3.2 算法描述

3.2.1 经典的二阶互模糊函数算法 当接收到的噪声 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 互不相关时, 可以用二阶相关操作来进行 TDOA 和 FDOA 的联合估计。

文献[3]所提到的互模糊函数定义如式(5):

$$A_{xy}(\tau, f) = \int_0^T x(t)y^*(t+\tau) e^{-j2\pi ft} dt \quad (5)$$

式(5)中, T 代表积分时间, 它决定了时差和频差同时估计的精度; τ 和 f 表示时延和频移。

将式(4)代入式(5), 得到

$$\begin{aligned} A_{xy}(\tau, f) &= \frac{1}{T} \cdot A \cdot e^{-j2\pi\Delta f\tau} \cdot \int_0^T s(t)s^*(t+\tau-D) \\ &\quad \cdot e^{-j2\pi(f+\Delta f)t} dt \\ &= A \cdot e^{-j2\pi\Delta f\tau} \cdot A_{ss}(\tau-D, f+\Delta f) \end{aligned} \quad (6)$$

显然从式(6)可以看出 2 维模糊函数中, $|A_{xy}(\tau, f)|$ 在点 $(D, -\Delta f)$ 会出现峰值, 通过 2 维迭代搜索就可以得到参数的同时估计。

由于受到相关噪声的影响, 利用式(6)估计会影响结果的准确性, 因此产生误差, 从而影响系统的定位功能。

3.2.2 基于四阶累积量的复模糊函数算法 为了解决相关高斯噪声的影响, 通常会利用高阶累积量, 因为高于二阶的累积量恒为零这一特点, 所以利用高阶累积量可以有效抑制掉高斯噪声, 因而就克服了相关高斯噪声的影响。由参考文献[7], 记 $c_{xy}^{(n)}(t; \tau)$ 为 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的 n 阶互累积量, 综合高阶累积量性质和信号模型可以得出:

$$c_{xy}^{(n)}(t; \tau) = \text{Cum}_n[x(t), y^*(t), \dots, x(t), y^*(t+\tau)] \quad (7)$$

与二阶累积量算法类似, 推出四阶累积量联合估计算法为

$$\begin{aligned} A^{(n)}(\tau, f) &= \int_0^T c_{xy}^{(n)}(t; \tau) e^{-j2\pi ft} dt \\ &= A \int_0^T c_s^{(n)}(t; \tau-D) e^{-j2\pi(f+\Delta f)t} dt \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $c_s^{(n)}(t; \tau) = \text{Cum}_n[s(t), s^*(t), \dots, s(t), s^*(t+\tau-D)]$ 。所以当满足 $(\tau, f) = (\Delta t, -\Delta f)$ 时, $|A^{(n)}(\tau, f)|$ 取得最大值, 可以同时有时差和频差参数做出估计。

3.2.3 基于小波去噪的互模糊函数的时差频差联合估计算法 参考文献[10]中提到, 对接收的两路信号分别进行小波去噪, 以提高信号的信噪比, 从而得到比较纯净的信号 $x'(t)$ 和 $y'(t)$ 。对得到的纯净信号直接进行互模糊函数运算:

$$A_{x'y'}(f, \tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x'(t)y'^*(t+\tau) e^{-j2\pi ft} dt \quad (9)$$

由于小波去噪的方法已经基本可以去除相关噪声的影响, 所以用式(10)是可以准确估计的。

$$\begin{aligned} A_{xy}(\tau, f) &= \frac{1}{T} \cdot A \cdot e^{-j2\pi\Delta f\tau} \\ &\quad \cdot \int_0^T s(t)s^*(t+\tau-D) e^{-j2\pi(f+\Delta f)t} dt \\ &= A \cdot e^{-j2\pi\Delta f\tau} \cdot A_{ss}(\tau-D, f+\Delta f) \end{aligned} \quad (10)$$

然而随着信噪比的进一步下降, 用式(10)进行估计, 产生的误差也就随之增大, 因此需要进一步改进算法, 来提高算法的精度。

3.2.4 基于小波阈值去噪和共轭模糊函数的时差频差联合估计算法 由于通常采用的通信信号都具有非圆特性, 即源信号 $s(t)$ 的互相关函数 $E\{s(t)s^*(t)\}$ 和共轭互相关函数 $E\{s^2(t)\}$, 满足 $E\{s^2(t)\} = e^{j\varphi} E\{s(t)s^*(t)\}$; 而噪声通常又是圆性的, 所以对任意的 t_i 和 t_j 都有 $E\{n_i(t_i)n_j(t_j)\} = 0$; 并且 $n_i(t)$ 和 $s(t)$ 不相关。

现在利用非圆信号的非零二阶共轭矩这一特点, 研究一种基于小波阈值去噪的共轭模糊函数的时差频差联合估计算法。因为小波分析的多分辨率分析和小波包的多层分解特性, 使小波分析在处理

非平稳信号中有一定的优势。从文献[14], 文献[15]也知道先利用小波变换对接收信号进行预处理之后, 可以提高接收信号的信噪比; 再者, 通常在通信系统中, 使用的信号都是非圆信号, 并且这些信号中混入的噪声大多数也不具有非圆信号的性质, 所以, 这里可以再次利用信号的非圆性和噪声的圆性将信号提取出来, 进一步提高参数估计的精度。在实际应用中也可以根据信号形式的不同选择不同的处理方法, 但是当是非圆信号时, 就可以采用本文基于小波阈值去噪的共轭模糊函数的时差频差联合估计算法, 表现出一定的优势。

本文将采用小波阈值去噪法对接收的两路信号进行预处理。这里采用文献[14]提到的一个软硬阈值折中的函数如式(11)所示:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(w_{j,k}) \cdot (|w_{j,k}| - \alpha\lambda), & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (11)$$

式中, α 为估计因子, 且 $0 \leq \alpha \leq 1$ 。可以通过适当地调整 α 的大小, 来获得更好的去噪效果。之后提出的一些阈值改进函数大多也都是基于软硬阈值折中函数改进而来的。

下面介绍如何利用非圆信号的特性来对时差和频差做出联合估计:

首先, 由二阶互模糊函数引出共轭互模糊函数的定义:

$$A_{xy}(\tau, f) = \int_0^T x(t)y(t+\tau)e^{-j2\pi ft} dt \quad (12)$$

而经过小波去噪进行预处理之后的两路接收信号为 $x'(t)$ 和 $y'(t)$, 所以,

$$A_{x'y'}(\tau, f) = \int_0^T [s'(t) + n'_1(t)] [As'(t+\tau-D) \cdot e^{j2\pi\Delta f(t+\tau)} + n'_2(t+\tau)] e^{-j2\pi ft} dt \quad (13)$$

由噪声与信号的不相关性, 以及 $E\{n_l(t_i)n_l(t_j)\} = 0$, 所以得到

$$\begin{aligned} A_{x'y'}(\tau, f) &= \int_0^T As'(t)s'(t+\tau-D)e^{j2\pi\Delta f(t+\tau)}e^{-j2\pi ft} dt \\ &= Ae^{j2\pi\Delta f\tau} \int_0^T s'(t)s'(t+\tau-D) \cdot e^{-j2\pi(f-\Delta f)t} dt \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14)两边取绝对值:

$$\begin{aligned} |A_{x'y'}(\tau, f)| &= |Ae^{j2\pi\Delta f\tau}| \left| \int_0^T s'(t)s'(t+\tau-D) \cdot e^{-j2\pi(f-\Delta f)t} dt \right| \\ &= C \left| \int_0^T s'(t)s'(t+\tau-D)e^{-j2\pi(f-\Delta f)t} dt \right| \\ &= C |A_{s's'}(\tau-D, f-\Delta f)| \end{aligned} \quad (15)$$

式中, $C = |Ae^{j2\pi\Delta f\tau}|$, 并且 $A_{s's'}(\tau, f) = \int_0^T s'(t)$

$\cdot s'(t+\tau)e^{-j2\pi ft} dt$ 是信号 $s(t)$ 的共轭模糊函数。由三角不等式以及柯西-施瓦兹不等式得出:

$$\begin{aligned} |A_{s's'}(\tau, f)|^2 &= \left| \int_0^T s'(t)s'(t+\tau)e^{-j2\pi ft} dt \right|^2 \\ &\leq \int_0^T |s'(t)|^2 dt \int_0^T |s'(t+\tau)|^2 dt \end{aligned} \quad (16)$$

又由

$$\int_0^T |s'(t)|^2 dt = \int_0^T |s'(t+\tau)|^2 dt = \int_0^T s'(t)s'^*(t) dt \quad (17)$$

根据非圆信号的性质式(3), 有

$$E\{s(t)s(t)\} = e^{j\varphi} E\{s(t)s^*(t)\} \quad (18)$$

所以,

$$\int_0^T s'(t)s'^*(t) dt = e^{-j\varphi} \int_0^T s'(t)s'(t) dt \quad (19)$$

$$|A_{s's'}(\tau, f)|^2 \leq \left| \int_0^T s'(t)s'^*(t) dt \right|^2 = |R_{ss}(0, 0)|^2 \quad (20)$$

综上所述可知:

$$|A_{x'y'}(\tau, f)|^2 \leq |A_{x'y'}(D, \Delta f)|^2 \quad (21)$$

所以, 时差 D 和频差 Δf 的估计值可以由函数 $|A_{x'y'}(\tau, f)|$ 的峰值所对应的变量 τ 和 f 给出。算法整体框图如图 1 所示。

4 仿真实验与结果分析

仿真实验按以下步骤进行:

(1) 构造两个 BPSK 信号;

(2) 分别给两个信号加入噪声 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$, 构成新的含噪信号;

(3) 对于经典二阶互模糊函数算法, 设置步值, 直接进行 2 维搜索; 而对于四阶累积量算法先进行四阶累积量计算再进行 2 维搜索; 对于基于小波去噪的互模糊函数算法则先对两路含噪信号进行小波去噪, 再进行互模糊函数算法; 本文算法也是先对两路含噪信号进行小波阈值去噪之后, 再对互模糊函数算法改进, 取共轭, 之后再进行搜索。

假设发射信号 $s(t)$ 是 BPSK 信号, 载频 f 为 0.5 MHz, 采样频率 f_s 为 10 MHz, 衰减系数 A 为 1, 初相 $\phi = 0$ 。接收机接收的信号的时间差 TDOA 和 FDOA 分别设定为 $D = 20$, $\Delta f = 0.25$; 实验运用 matlab 软件仿真, 针对本文算法进行仿真验证, 并与经典的二阶互模糊函数算法和四阶累积量算法以及和文

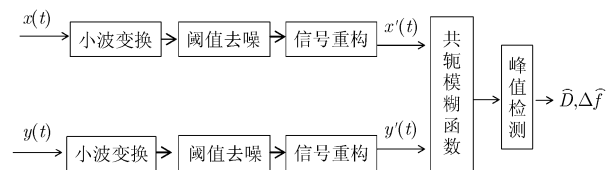


图1 算法整体框图

献[9]中基于小波去噪的互模糊函数算法进行对比分析。

4.1 实验 1

假设噪声 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 相关, 且两路接收信号的信噪比分别 $\text{SNR1}=5\text{ dB}$, $\text{SNR2}=-5\text{ dB}$, 采样点数为 512 点。仿真结果如图 2 所示。

4.2 实验 2

假设噪声 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 相关, 且两路接收信号的信噪比分别 $\text{SNR1}=5\text{ dB}$, $\text{SNR2}=-10\text{ dB}$; 采样点数为 256。仿真结果如图 3 所示。

4.3 实验 3

在实验 1 条件下, 进行四阶累积量算法与本文算法的计算复杂度的比较, matlab 仿真运行时间结果如表 1 所示。

表 1 仿真运行时间对比(s)

SNR2(dB)	四阶累积量算法	本文算法
0	0.636277	0.146546
-5	0.749406	0.148406

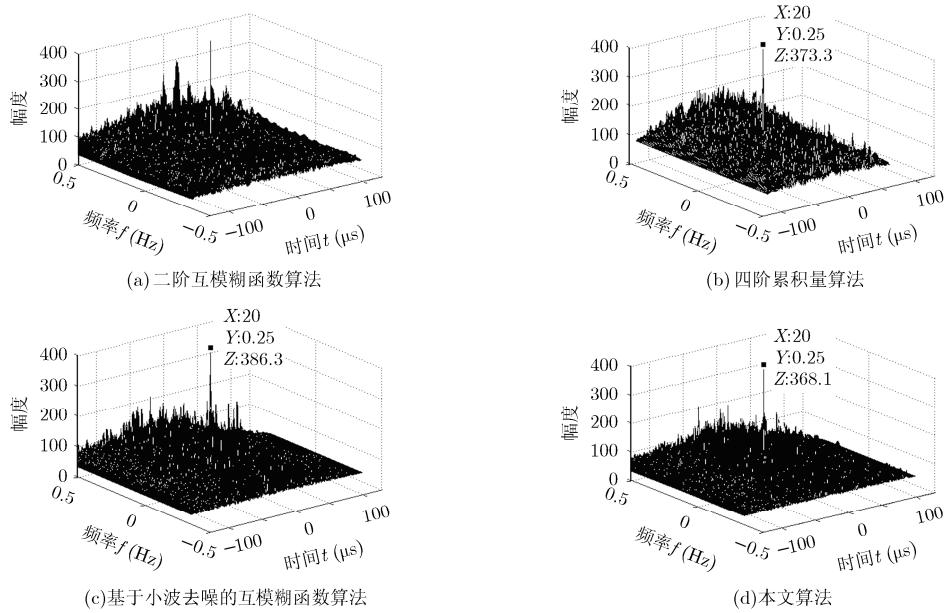


图 2 4 种算法在实验 1 条件下的仿真结果(相关噪声)

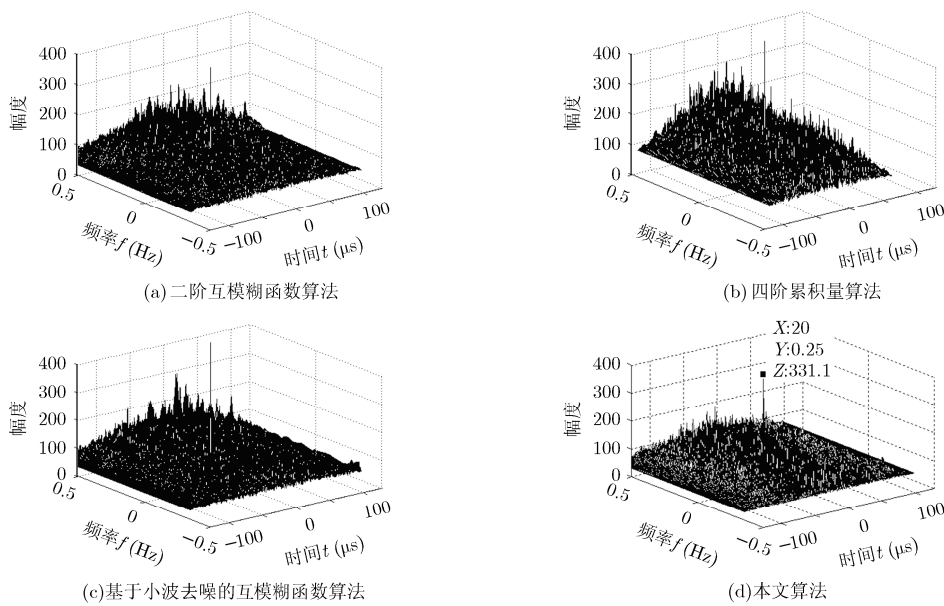


图 3 4 种算法在实验 2 条件下的仿真结果(相关噪声)

从表1仿真运行时间对比上,可以明显看出本文算法比四阶累积量算法运行时间短,考虑到共轭模糊函数是对互模糊函数的改进,在仿真实验中,本文算法与基于小波去噪的互模糊函数算法的运行时间相当,没有表现出明显优势,但是由实验1和实验2,从参数的估计误差方面分析四阶累积量算法和基于小波去噪的模糊函数算法以及本文算法的估计性能,得出时差和频差随信噪比SNR2变化的均方误差曲线,如图4所示。

实验分析:由实验1可以看出,在相关噪声环境下,传统的二阶互模糊函数算法已经出现伪峰,不能正确对时差和频差参数做出估计。从实验2可以看出,当信噪比降低的时候,二阶互模糊函数算法中的伪峰已经淹没准确峰值。而随着采样点数的降低,四阶累积量算法也不能正确估计参数,基于小波去噪的互模糊函数算法也出现了不同程度的伪峰,影响了参数的准确估计;而此时,本文基于小波阈值去噪的共轭模糊函数算法则表现出明显的优势。并且从实验3的表1也可以明显看出,在都能

正确估计参数的同时,本文算法的运算时间远小于四阶累积量算法,从而可以验证本文算法的时效性。从图4的均方根误差曲线可以看出,在相同条件下,本文算法的均方根误差更小。综合分析,本文算法不仅可以处理相关噪声下的参数估计,而且计算复杂度也远小于传统的四阶累积量算法,从而可以验证本文算法的有效性。

5 结束语

本文研究了非圆信号的概念以及小波阈值去噪的方法,利用非圆信号具有非零二阶共轭矩这一特点,结合互模糊函数引入共轭互模糊函数的概念,从而将圆性噪声和非圆信号加以区分,在信噪比较低的情况下也可以对参数做出正确估计。最后通过仿真实验可以验证本文算法的有效性,得出在相关噪声和低信噪比情况下该算法优于传统的四阶累积量算法,在保证参数正确估计的同时,提高了信噪比,降低了计算量;并且与基于小波去噪的互模糊函数算法相比较,参数估计性能更优。

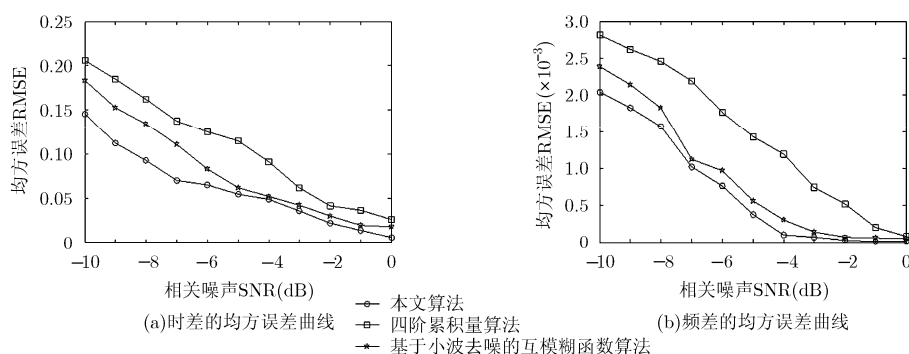


图4 时差与频差的均方误差曲线

参考文献

- [1] WU Shilong, LUO Jingqing, and GONG Liangliang. Joint FDOA and TDOA location algorithm and performance analysis of dual-satellite formations[C]. 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS), Dalian, 2010, V2-339-V2-342. doi: 10.1109/ICSPS.2010.5555463.
- [2] YEREDOR A. Quantifying the advantages of joint processing in TDOA estimation[C]. IEEE 7th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), Hoboken, NJ, 2012: 205-208. doi: 10.1109/SAM.2012.6250468.
- [3] DANDAWATR A V and GIANNAKIS G B. Differential delay-Doppler estimation using second- and higher-order ambiguity functions[J]. *IEEE Proceedings F, Radar and Signal Processing*, 1993, 140(6): 410-418.
- [4] 蒋柏峰, 吕晓德, 赵耀东, 等. 一种基于 DTTB 信号的无源相干雷达模糊函数快速算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 589-594. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00900.
- [5] 柏如龙, 刘承禹, 李鑫. CDMA 信号时差频差联合估计算法研究[J]. 无线电工程, 2013, 43(6): 21-25.
- JIANG Baifeng, LV Xiaode, ZHAO Yaodong, et al. A fast algorithm of ambiguity function for passive coherent radar based on DTTB signal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(3): 589-594. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00900.
- BAI Rulong, LIU Chengyu, and LI Xin. Research on TDOA/FDOA joint estimation algorithm for CDMA signals[J]. *Radio Engineering*, 2013, 43(6): 21-25.

- [6] 杨宇翔, 夏畅雄, 同武勤. 高低轨双星定位中的时变时频差参数估计[J]. 信号处理, 2012, 28(10): 1465-1474.
YANG Yuxiang, XIA Changxiong, and TONG Wulin. Estimation of the time varying TDOA and FDOA in GEO-LEO dual-satellites location system[J]. *Signal Processing*, 2012, 28(10): 1465-1474.
- [7] 张威, 边东明, 张更新, 等. 基于四阶互模糊函数的TDOA/FDOA参数估计研究[J]. 无线电通信技术, 2013, 39(1): 28-31.
ZHANG Wei, BIAN Dongming, ZHANG Gengxin, *et al.* Based on the fourth-order mutual fuzzy function of TDOA/FDOA parameter estimation research[J]. *Radio Communications Technology*, 2013, 39(1): 28-31.
- [8] WANG Hongzhi, XU Peixin, and BI Aiqi. A new adaptive time delay estimation using fourth-order cumulants based on polarity iterative[C]. 2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering (ISEEE), Sopporo, 2014, 1: 257-259.
- [9] 侯慧娟, 盛戈皞, 朱文俊, 等. 基于高阶累积量的局部放电超高频信号时延估计算法[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 342-347. doi: 10.3969/j.issn.1003-6520.2013.02.013.
HOU Huijuan, SHENG Gehao, ZHU Wenjun, *et al.* Time-delay estimation algorithm of partial discharge ultra high frequency signals based on higher-order cumulant[J]. *Voltage Engineering*, 2013, 39(2): 342-347. doi: 10.3969/j.issn.1003-6520.2013.02.013.
- [10] 李文雪. 双星干扰源定位系统时差频差参数估计研究[D]. [硕士论文], 北京工业大学, 2014.
LI Wenxue. Research on TDOA&FDOA estimation based on double satellite interference localization system[D]. [Master dissertation], Beijing University of Technology, 2014.
- [11] 文飞. 非圆信号参数估计方法研究[D]. [博士论文], 电子科技大学, 2014.
WEN Fei. Reserch on the non-circular signal parameter estimation method[D]. [Ph.D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [12] YAO Guangxiang, LIU Zhiwen, and XU You-gen. TDOA/FDOA joint estimation in a correlated noise environment[C]. IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and Technologies, Beijing, 2005, 1: 831-834.
- [13] 齐晓东, 陆春伟, 徐友根, 等. 基于共轭模糊函数的时差-频差联合估计方法[J]. 航天电子对抗, 2009, 25(6): 58-61.
QI Xiaodong, LU Chunwei, XU Yougen, *et al.* TDOA-FDOA estimation with conjugate ambiguity function[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2009, 25(6): 58-61.
- [14] DOU Hui-jing, LEI Qian, CHENG Jun, *et al.* Research on TDOA parameters estimation for satellite interference location[C]. 2012 IEEE 11th International Conference on Signal Processing (ICSP), Beijing, 2012, 1: 259-262.
- [15] 吴光文, 王昌明, 包建东, 等. 基于自适应阈值函数的小波阈值去噪方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(6): 1340-1347. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00798.
WU Wenguang, WANG Changming, BAO Jiandong, *et al.* A wavelet threshold de-noising algorithm based on adaptive threshold function[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1340-1347. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00798.
- 窦慧晶: 女, 1969年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为数字信号处理、信号参量估计、阵列信号处理、语音信号处理等.
- 王千龙: 男, 1988年生, 硕士生, 研究方向为数字信号处理、卫星干扰源定位参数估计.
- 张雪: 女, 1990年生, 硕士生, 研究方向为数字信号处理、信号参量估计.