

文章编号:1000-6893(2010)11-2253-06

多峰值信号的伪码相位估计法

刘芳^{1,2}, 冯永新¹

(1. 沈阳理工大学 通信与网络工程中心, 辽宁 沈阳 110168)

(2. 南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

A Pseudo-code Phase Estimation Method Based on Multi-peak Signals

Liu Fang^{1,2}, Feng Yongxin¹

(1. Communication and Network Institute, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

(2. Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

摘要: 考虑到多峰值信号的出现以及传统相位估计法的不足与缺陷, 特别是针对传统方法无法提取多峰值信号主峰的不足, 以及在非整数采样条件时相位误差估计的较大缺陷, 提出了一种提高多峰值信号伪码相位精度的估计方法。首先通过频域提取处理去除副峰引发的模糊性, 达到提取主峰的目的; 然后建立了插值方程, 从而提高相位估计精度。在此基础上进行了验证与评估, 结果表明, 此估计法可以正确提取多峰值信号的主峰, 相对于传统方法而言, 相位估计精度明显提高。

关键词: 多峰值; 信号; 伪码; 主峰; 估计

中图分类号: V448; TN914.53 **文献标识码:** A

Abstract: A pseudo-code phase estimation method is presented which attempts to deal with the emergence of multi-peak signals and the defect of traditional phase-estimation, especially its inability to extract the main peak of multi-peak signals, and large phase estimation errors in non-integer sampling conditions. The new method improves the accuracy of multi-peak signals. First, the ambiguity caused by vice-peak is removed by frequency domain abstract processing, and the purpose of extracting main peak is achieved. Second, an interpolation equation is established to improve the phase estimation accuracy. On this basis, validation and assessment are conducted, and the results show that this estimation method can accurately extract the main peak of multi-peak signals, and improve phase estimation accuracy significantly as compared with traditional methods.

Key words: multi-peak; signal; pseudo-code; main peak; estimation

由于新体制调制方式^[1-2]的出现, 多峰值信号成为了新一代卫星导航通信的典型应用, 例如: 全球定位系统(GPS)中的M码信号以及伽利略(Galileo)系统中的E1、E5频段信号等, 都采用了二进制偏移载波(BOC)以及改进的BOC调制方式。虽然采用BOC调制方式可以使得信号频谱分离, 提高信号的抗干扰能力, 但是也使得相关函数出现多峰值现象, 为其信号同步^[3-7]以及相位估计带来了新的挑战。

近年来国内外也提出了一些多峰值信号的相位估计方法。例如龚国辉等人提出的提高伪随机噪声(PN)码相位精度的三点二次插值法^[8], 利用相关谱峰及其邻近的两个数据点确定二次插值多项式, 然后求取插值多项式的极大值点以确定相关谱峰精确位置, 有效地提高直接序列扩频(DSSS)

信号PN码相位的测量精度, 但是此算法只适用于单峰信号。对于多峰值信号的主峰提取也提出了较为有效的方法, 例如P. Fishman和J. W. Betz提出的Fishman&Betz算法^[9], 通过滤波的方法滤出信号的主瓣, 再与本地伪码的主瓣进行相关, 从而去除了多峰值信号多值性, 然而其使用了3个滤波器, 从而造成资源很大的浪费。随后, N. Martin等又提出了改进的算法^[10], 只使用了1个滤波器, 但是其性能受滤波器性能的影响较大。

由此可见, 现阶段对多峰值信号的伪码相位估计方法还并不完善, 有效的多峰值信号伪码相位估计方法的提出成为了必然。为此, 本文在研究信号特性的基础上, 提出一种多峰值信号伪码相位精度的估计方法, 并进行了效能验证。

1 多峰信号特性

BOC调制信号作为多峰值信号的典型代表,
© 航空学报杂志社 <http://hkxb.buaa.edu.cn>

收稿日期: 2010-01-27; 修订日期: 2010-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(60802031)

通讯作者: 刘芳 E-mail: onceowned58@tom.com

其调制方式有别于二进制移相键控(BPSK)调制信号。其原理为:扩频伪码首先进行副载波调制,进一步进行载波调制,从而产生BOC调制信号 $BOC(f_{sc}, f_c)$,其中 f_c 为伪码速率, f_{sc} 为副载波频率。其信号的自相关函数具有多个峰值,而在导航系统中,导航精度与信号自相关函数存在密切关系,只有中心最大峰才与相关函数对应,为此对于多峰值信号而言,对其主峰的提取尤为重要。可以考虑从副载波相位估计角度着手,剥离接收信号中的副载波,进而提炼出主峰值。以BOC(10,5)及BOC(5,2)信号为例,采用副载波相位估计手段对伪码的相位估计结果分别如图1及图2所示,可见由于副载波相位存在误差,从而估计的伪码主峰位值也存在误差,进而将会给伪码相位估计带来一定的负担。

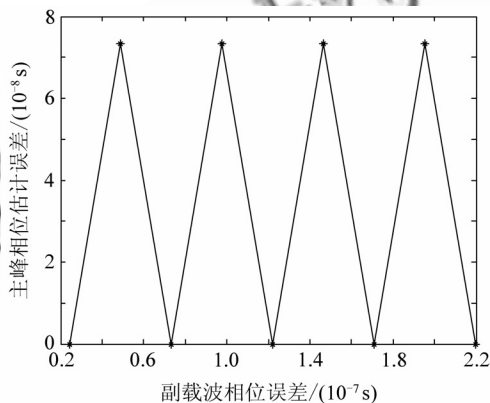


图1 BOC(10,5)信号主峰误差结果

Fig. 1 The main peak errors of BOC(10,5) signal

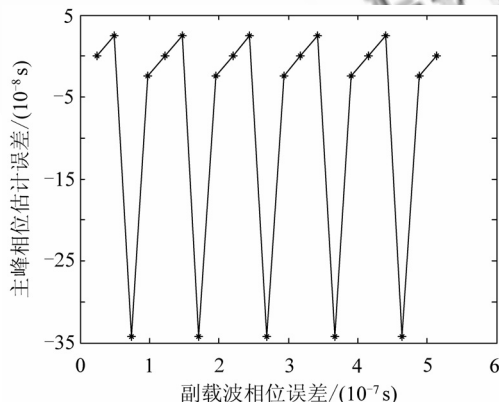


图2 BOC(5,2)信号主峰误差结果

Fig. 2 The main peak errors of BOC(5,2) signal

即使可以对多峰值信号提炼主相关峰,但由于信号传输过程中的损失,使得相关峰并不是理想的平滑状态,尤其是接收信号起始相位并

不处于采样频率整数倍时。以PN码为例,假设接收信号起始相位为 $s_1 = 21.425$ ms,而处理过程的采样间隔为 $s_2 = 1$ ms,令 k 为接收信号的起始相位偏移量,其中 k 为 s_1 与 s_2 相除的余数,其相关结果如图3所示。可见估计的最大值相位与真实值有较大的误差,即 $k = 0.425$,那么最终输出误差将达到0.425 ms。进一步,输入误差与输出估计误差关系如图4所示,可见随着 k 的变化,输出伪码相位估计误差也有所变化。虽然可以通过提高采样频率的方式来提高相位估计精度,但是必将大大增加处理复杂度、降低处理速度。

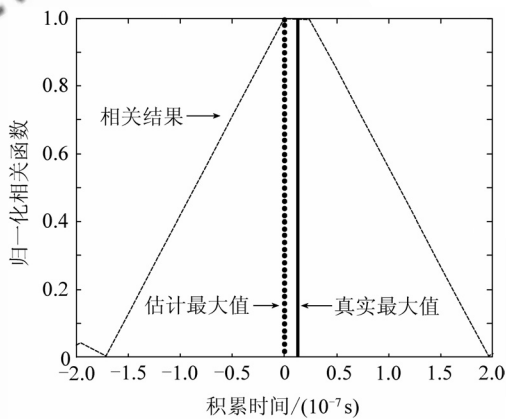


图3 相关结果

Fig. 3 The correlation results

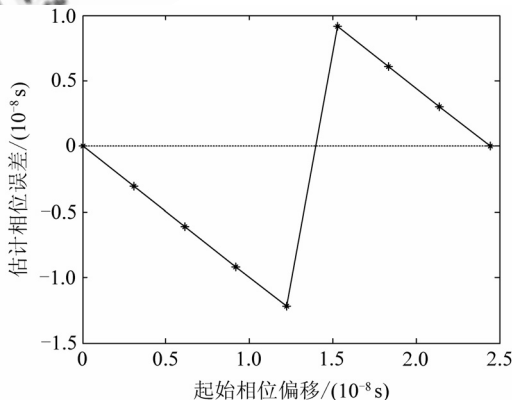


图4 输入误差与输出估计误差关系

Fig. 4 The relationship of input error and output error

2 伪码相位估计法

综合考虑多峰值信号的多峰特性,以及信号相位偏移量的存在,传统的方法无法满足其伪码相位估计要求,为此提出了一种提高多峰值信号

相位估计(Multi-Peak Phase Estimate, MPPE)精度的方法。MPPE 方法包括 2 个阶段,即频域提取阶段和插值方程阶段。首先从去除副载波的角度着手,进行频域提取处理,从而去除副峰引发的模糊性,恢复单峰值特性;其次为提高相位估计精度,在恢复单峰值的同时,建立了插值方程,从而使得相位估计精度有所提高。

在频域提取阶段,对于信号前端处理后的接收序列 $x(n)$ 而言,由于副载波的存在使其频率分为对称的边带。为此,首先对 $x(n)$ 进行快速傅里叶变换(FFT)。

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi\frac{kn}{N}} \quad (k = 0, 1, \dots, N-1) \quad (1)$$

式中: k 为某一频域点; N 为采样点数; f_s 为采样频率。 N 点覆盖了 0 到 f_s 的频率范围。 $k=0$ 到 $k=N/2$ 的频域点携带了全部信息,而其余点只是基带重要信息频率的副本,因而其频谱是关于 $k=0$ 到 $k=N/2$ 之间的点对称的。因此,对频域 $X[k]$ 分别进行 $k=[0, N/2]$ 及 $k=[N/2, N-1]$ 的提取,其时域等效为

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N/2} X[k]e^{j2\pi\frac{kn}{N}} \quad (2)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=N/2}^{N-1} X[k]e^{j2\pi\frac{kn}{N}} \quad (3)$$

通过频域提取的方式可以等效为对信号进行边带滤波处理,并提取出上边、下边带序列。

对本地 PN 序列 $z(n)$ 而言,则利用时域复指数相乘等效频域频率移动的原理,对进行 FFT 变换的频域序列进行以频率分辨率 f_s/N 为步进的移动,使移动后序列频率为副载波频率 f_{sc} 。同样移动后频域序列的频谱也具有对称性,基于以上原理可以将其频率进行提取,从而也分离出相应的上边、下边带。在此基础上,利用频域相乘等效于时域卷积的原理,对处理后的本地与接收序列进行相关运算,进一步进行相应的相位估计。

但是正如前文所述,当接收信号起始相位处于采样频率的非整数倍时,会进一步对提取的主峰相位估计精度有所影响。同样以 BOC(10,5) 及 BOC(5,2) 信号为例,通过频域提取处理后的伪码相位估计误差如图 5 及图 6 所示,由于输入伪码相位误差的存在,其峰值位置也出现误差,而且与理论的真实值并不吻合,可见单纯的主峰提取还无法满足伪码相位的精确估计,为此在主峰提取的基础上,建立了插值方程。

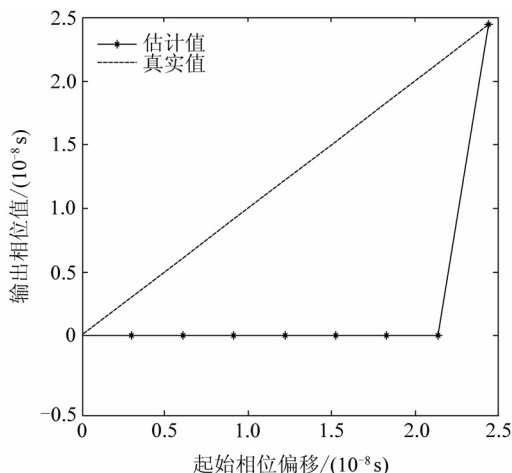


图 5 BOC(10,5)信号伪码相位误差结果

Fig. 5 The pseudo-code phase errors of BOC(10,5) signal

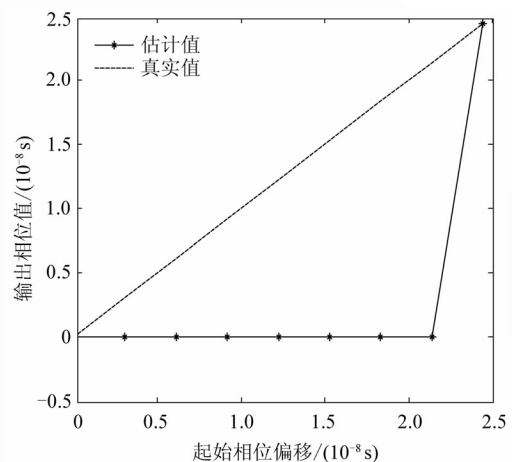


图 6 BOC(5,2)信号伪码相位误差结果

Fig. 6 The pseudo-code phase errors of BOC(5,2) signal

在插值方程阶段,其处理方法与三点二次插值法相似,也是基于相关谱峰及附近 2 个数据点的处理方法。首先建立二次插值多项式: $y=ax^2+bx+c$,将 3 个数据点的值代入式可得

$$y_0 = ax_0^2 + bx_0 + c \quad (4)$$

$$y_1 = ax_1^2 + bx_1 + c \quad (5)$$

$$y_2 = ax_2^2 + bx_2 + c \quad (6)$$

从而,计算出系数

$$b = \frac{x_2^2 y_1 + x_1^2 y_0 + x_0^2 y_2 - x_2^2 y_0 - x_0^2 y_1 - x_1^2 y_2}{x_2^2 x_1 + x_0^2 x_2 + x_1^2 x_0 - x_0^2 x_1 - x_2^2 x_0 - x_1^2 x_2} \quad (7)$$

$$a = \frac{x_2 y_1 + x_1 y_0 + x_0 y_2 - x_2 y_0 - x_0 y_1 - x_1 y_2}{x_2^2 x_0 + x_0^2 x_1 + x_1^2 x_2 - x_0^2 x_2 - x_2^2 x_1 - x_1^2 x_0} \quad (8)$$

$$c = y_0 - \left(\frac{x_2 y_1 + x_1 y_0 + x_0 y_2 - x_2 y_0 - x_0 y_1 - x_1 y_2}{x_2^2 x_0 + x_0^2 x_1 + x_1^2 x_2 - x_0^2 x_2 - x_2^2 x_1 - x_1^2 x_0} \right)$$

$$x_0^2 - \left(\frac{x_2^2 y_1 + x_1^2 y_0 + x_0^2 y_2 - x_2^2 y_0 - x_0^2 y_1 - x_1^2 y_2}{x_2^2 x_1 + x_0^2 x_2 + x_1^2 x_0 - x_2^2 x_1 - x_2^2 x_0 - x_1^2 x_2} \right) x_0 \quad (9)$$

因此,求得方程的最大值位置,也即相位估计值为

$$P_{\max} = -\frac{b}{2a} \quad (10)$$

以 BOC(10,5)及 BOC(5,2)信号为例,其相位估计值与真实值对比结果如图 7 及图 8 所示,可见,估计值与真实值并不相符,但是无论 BOC(m, n)的参数 $\lambda = m/n$ 是奇数还是偶数,估计结果与真实值都存在一定的关系,最终相位估计结果为

$$P_e = 2P_{\max} \quad (11)$$

还是偶数,通过此方法都可以有效地提取主峰。

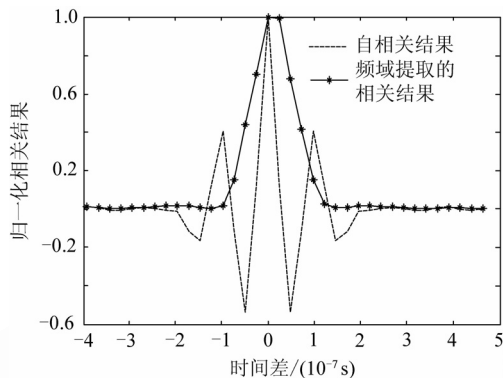


图 9 BOC(10,5)相关峰值

Fig. 9 The correlation results of BOC(10,5)

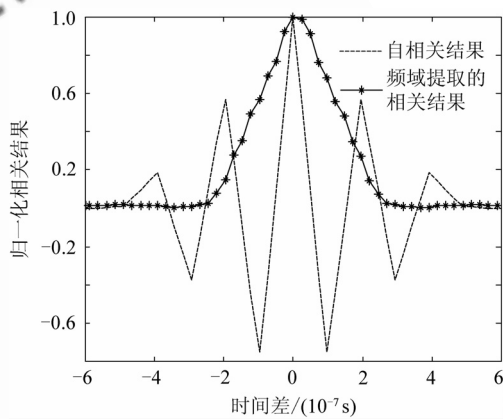


图 10 BOC(5,2)相关峰值

Fig. 10 The correlation results of BOC(5,2)

通过频域提取阶段的处理可以提取主峰,而且当接收信号的起始相位为采样时间的整数倍情况下,可以正确估计伪码相位。进一步,以 BOC(10,5)为例,在接收信号的起始相位为采样时间的非整数倍情况下,在插值方程阶段进行两组测试。

① 设采样频率较小时,即 $f_s = 500$ Hz,采样时间 $T_c = 2.000 0$ ms,真实起始相位为 $101.000 0$ ms 时,仿真结果如图 11 所示,利用传统方法所估计的

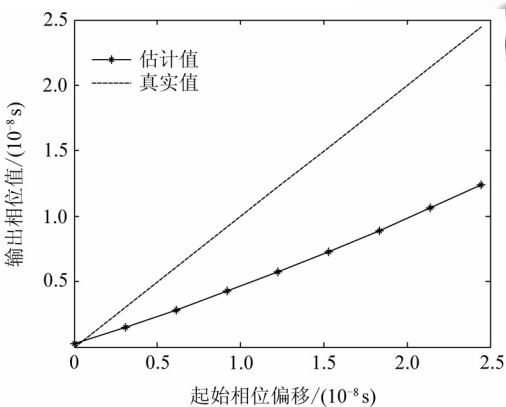


图 7 BOC(10,5)信号伪码相位误差对比结果

Fig. 7 The compared results of pseudo-code phase error of BOC(10,5) signal

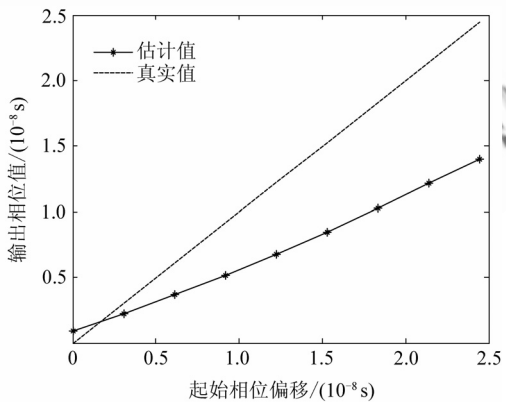


图 8 BOC(5,2)信号伪码相位误差对比结果

Fig. 8 The compared results of pseudo-code phase error of BOC(5,2) signal

3 效能验证

为验证 MPPE 方法的合理性及有效性,于 Matlab 仿真平台上进行了效能验证。频域提取阶段,以 BOC(10,5)及 BOC(5,2)为例的处理结果分别如图 9 及图 10 所示。可见无论 $\lambda = m/n$ 为奇数

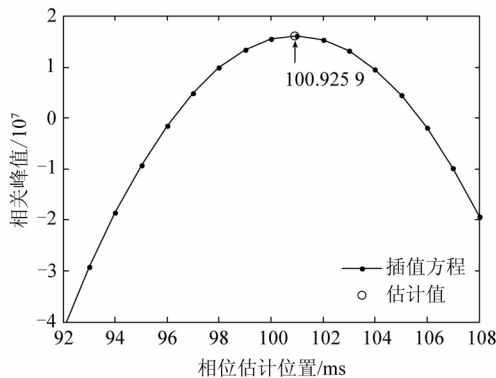


图 11 插值方程估计结果 1

Fig. 11 The first results of interpolation equation estimate

相位值则为 100.000 0 ms 或 102.000 0 ms,而利用插值方程从而估计的相位值为 100.925 9 ms,其估计误差为 0.074 1 ms,可见其与真实值的误差较小。

② 同样测试环境下,起始相位为 100.000 0 ms 时,仿真结果如图 12 所示,利用插值方程估计的相位值为 99.856 5 ms,估计误差为 0.143 5 ms,同样与真实值的误差较小。

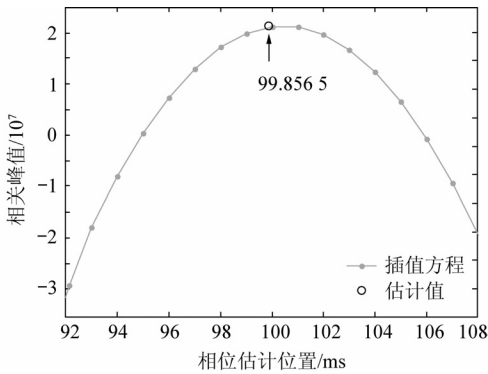


图 12 插值方程估计结果 2

Fig. 12 The second results of interpolation equation estimate

进一步对估计法进行效能分析,在提高其采样频率情况下,例如 $f_s = 81.84$ MHz 时,在一个相位采样点内进行不同相位偏移情况的测试,估计相位误差测试结果如图 13 所示,可见随着输入相位偏移的变化,输出的相位估计误差也有所抖动,但是抖动量相对较小。

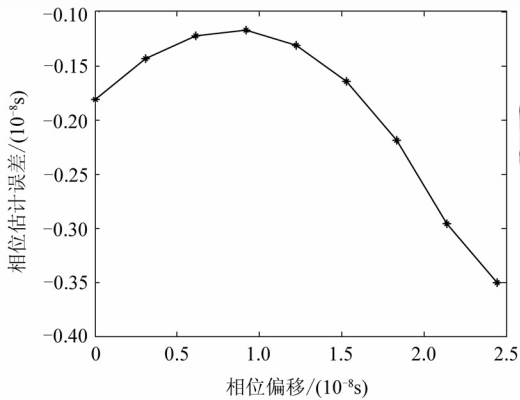


图 13 不同相位偏移时的估计误差

Fig. 13 The estimation results in different phase shifts

进一步与传统方法进行了主相关峰值的对比,其结果如图 14 所示。可见随着输入相位偏移的增加,新方法相对于传统方法而言,其主相关峰值下降趋势较平缓,从而使得估计法较稳定。相位估计误差对比结果如图 15 所示。可见新方法相对于传统方法而言,伪码相位估计精度明显有所提高。

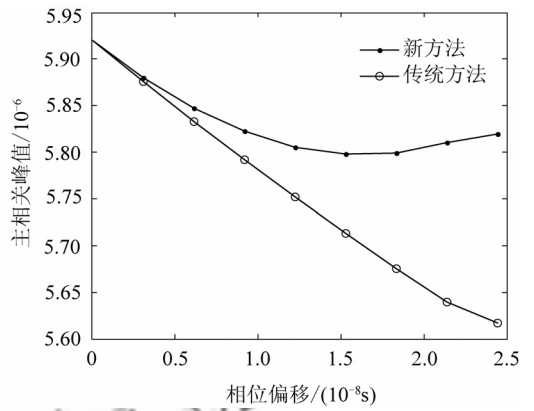


图 14 不同相位偏移时的主相关峰值

Fig. 14 The main peak results in different phase shifts

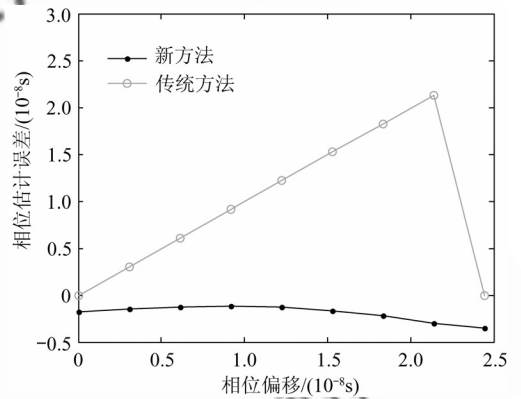


图 15 不同相位偏移时估计误差的对比

Fig. 15 The error comparison results in different phase shifts

考虑到信号传输过程以及前端处理过程中,外界环境以及处理损失的影响,使得信号的信噪比有所下降,进而对相位估计精度有所影响,因此,其于此估计法进行了有效工作信噪比的测试。设采样频率 $f_s = 81.84$ MHz,不同信噪比(SNR)情况下,随着一个相位采样点内不同相位偏移的变化,相位估计误差如图 16 所示,可见随着信噪比的降低其估计误差变大。进一步,对估计法的频域提取阶段

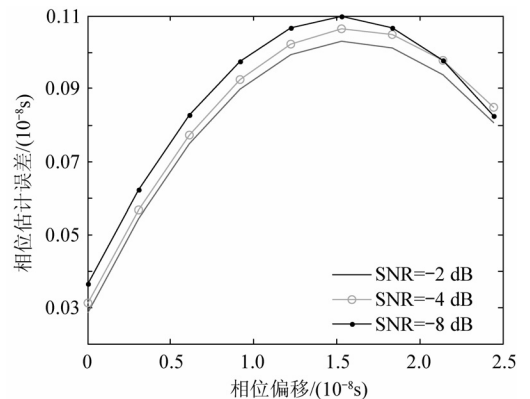


图 16 不同信噪比时的估计误差

Fig. 16 The estimation error result in different SNR

和插值方程阶段分别进行了信噪比容限的分析,其结果分别如图 17 及图 18 所示,可见对于频域提取阶段而言,当 SNR 小于 -38 dB 时,其相位估计误差抖动较大,而对于插值方程阶段而言,当 SNR 小于 -18 dB 时,其相位估计误差抖动开始增大,因此估计法的有效工作 SNR 大于 -18 dB。

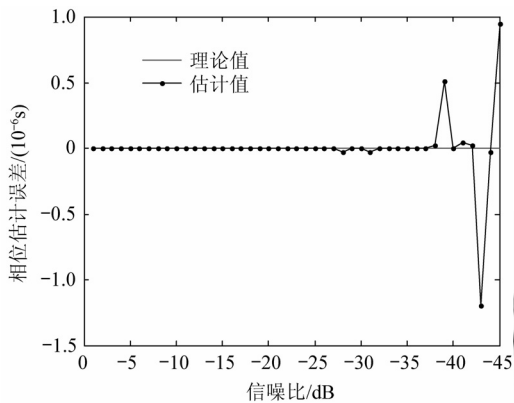


图 17 信噪比对频域提取的影响

Fig. 17 The impact of SNR on frequency domain abstract

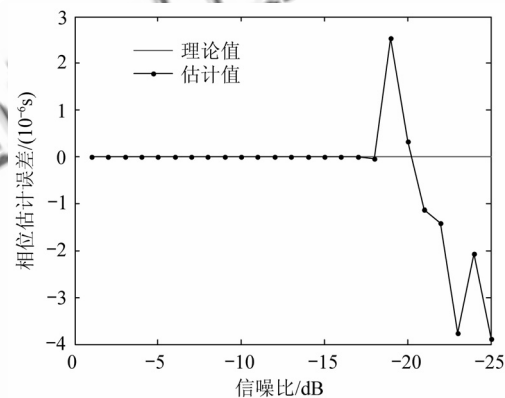


图 18 信噪比对插值方程的影响

Fig. 18 The impact of SNR on interpolation equation

4 结论

(1) 针对传统方法无法满足多峰值信号的相位精度要求特性,提出了一种 MPPE 方法。

(2) 在接收信号的起始相位为采样时间的非整数倍情况下,该方法处理后的峰值位置与信号自相关的主峰位值完全相同。

(3) 在接收信号的起始相位为采样时间的非整数倍情况下,MPPE 方法的相位估计精度明显优于传统的方法。

参 考 文 献

[1] Liu F, Tian M H, Feng Y X. Research of the new navigation signals characteristic [C] // 2009 WRI International Conference on Communications and Mobile Computing. Kunming: World Research Institutes, 2009: 409-413.

- [2] 刘芳, 钱博, 冯永新. 基于裂谱信号的抗干扰特性研究与分析[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(4): 208-210.
Liu Fang, Qian Bo, Feng Yongxin. Research and analysis of anti-jamming characteristic based on split frequency spectrum signal [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(4): 208-210. (in Chinese)
- [3] 杜黎明, 袁亚平, 甄卫民. M 码接收处理技术的分析与仿真[J]. 全球定位系统, 2008(4): 16-21, 30.
Du Liming, Yuan Yaping, Zhen Weimin. Analysis and simulation of code receiving for the GPS M Code signal [J]. GNSS World of China, 2008(4): 16-21, 30. (in Chinese)
- [4] 王庆民, 封欣, 伍蔡伦. BOC 卫星导航信号直接解调的方法及实现[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(4): 570-573.
Wang Qingmin, Feng Xin, Wu Cailun. Method and implementation of direct demodulation of BOC satellite navigation signals [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(4): 570-573. (in Chinese)
- [5] Julieno O, Cannon M E. ASPeCT: unambiguous sine-BOC(n, n) acquisition/tracking technique for navigation applications [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(1): 150-162.
- [6] 樊子晔, 陈佳品, 李振波. 用于 BOC(1, 1) 信号捕获的非模糊算法[J]. 光电与控制, 2009, 16(5): 34-38.
Fan Ziye, Chen Jiapin, Li Zhenbo. Unambiguous acquisition methods for BOC(1, 1) [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(5): 34-38. (in Chinese)
- [7] Burian A, Lohan E S, Renfors M. BPSK-like methods for hybrid search acquisition of Galileo signals [C] // IEEE International Conference on Communications. 2006: 5211-5216.
- [8] 龚国辉, 李思昆. 提高 DSSS 信号 PN 码相位测量精度的三点二次插值法[J]. 通信学报, 2007, 28(2): 130-133.
Gong Guohui, Li Sikun. Improving DSSS signal PN code phase measurement precision by 3-points quadratic interpolation [J]. Journal on Communications, 2007, 28(2): 130-133. (in Chinese)
- [9] Fishman P, Betz J W. Predicting performance of direct acquisition for the M-code signal [C] // Proceedings of ION National Technical Meeting. 2000: 574-582.
- [10] Martin N, Leblond V, Guillotel G, et al. BOC(x, y) signal acquisition techniques and performances [C] // Proceedings of ION National Technical meeting. 2003: 188-198.

作者简介:

刘芳(1979—) 女, 博士, 讲师。主要研究方向: 空间通信、导航制导。

Tel: 024-24682229

E-mail: onceowned58@tom.com

冯永新(1974—) 女, 博士, 教授。主要研究方向: 电子对抗、空间通信。

(编辑: 张利平, 晓坤)