

文章编号: 2095-4980(2020)03-0380-05

一种基于时域滤波的 BOC 无模糊捕获算法设计

王 川, 梁涛涛, 王 明

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 针对二进制偏移载波(BOC)信号进行相关运算时存在多峰的特殊性, 设计了一种基于时域滤波的 BOC 无模糊捕获算法。通过频域分析得到时域滤波器的频率响应, 再反推出时域滤波器的系数, 构建有限脉冲响应(FIR)滤波器。对不同算法进行仿真, 结果证明该时域滤波器能很好地消除 BOC 信号自相关副峰。降低滤波器阶数, 并设计可实现的基于时域滤波和多段匹配滤波器(MMF)-傅里叶变化(FFT)的 BOC 无模糊捕获算法, 仿真分析表明该算法能很好地消除副峰, 正确捕获信号。

关键词: 二进制偏移载波; 时域滤波; 捕获算法; 无模糊

中图分类号: TN967

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018375

An unambiguous acquisition algorithm of BOC signal based on time-domain filter

WANG Chuan, LIANG Taotao, WANG Ming

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Due to the multi-peak of Binary Offset Carrier(BOC) autocorrelation function, an unambiguous acquisition algorithm of BOC signal based on time-domain filter is designed. The frequency response of the time-domain filter is obtained, then the filter coefficients are deduced to construct a Finite Impulse Response(FIR) filter. The simulation of different algorithms shows that the time domain filter can completely eliminate the side peaks of BOC autocorrelation. The filter order is reduced and an achievable unambiguous acquisition algorithm of BOC signal based on time-domain filter and Multi-bank Matched Filter(MMF)-Fourier Transform(FFT) is designed. The simulation analysis shows that the algorithm can eliminate side peaks and capture the signal correctly.

Keywords: Binary Offset Carrier; time-domain filter; acquisition algorithm; unambiguous

二进制偏移载波(BOC)调制是 W Betz 于 2001 年正式提出的一种新的调制方式, 与已在 GNSS 广泛应用的二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制方式相比, BOC 调制信号具有更宽的带宽, 且能量集中在频带的边缘。采用 BOC 调制的信号模式能够使导航频段的频谱得到更为有效的利用^[1-2]。BOC 调制信号由于其优越的性能, 现已被 GPS 的 L1 和 L5 频段以及 Galileo 的 E1 和 E5 频段采用, 我国的北斗三代卫星导航系统中也在 B1C 等频段采用了 BOC 调制信号^[3]。BOC 调制信号的无模糊捕获算法研究是研制新一代导航接收机必须的技术储备, 研究高动态 BOC 信号捕获算法, 对军事用户具有重要意义。然而 BOC 调制信号的自相关函数具有多个相关峰, 自相关函数的多峰特性给 BOC 信号的捕获带来困难: 一方面副峰的存在容易造成误检; 另一方面, 主峰与副峰之间的零点容易导致漏检, 进而影响信号的正确解调。

针对 BOC 信号的捕获模糊性问题, 目前学术界主要针对 BOC(n, n)调制信号进行了算法研究, 其中基于载波剥离的 BPSK-like 算法^[4-6]和基于构建本地辅助函数的自相关边峰消除法(Autocorrelation Side-Peak Cancellation Technique, ASPeCT)^[7]是应用较多的两类算法。BPSK-like 算法在信号叠加时产生能量损失, 且未利用 BOC 自相关函数的窄相关特性; ASPeCT 算法是在本地构成辅助函数的捕获算法, 但不能完全消除副峰。随着 BOC 调制参数增大, BOC 信号的自相关结果副峰值越接近主峰, 对于调制参数大于 2 的 BOC(m, n)信号, 现有研究较少。

收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2019-03-14

作者简介: 王 川(1989-), 女, 助理研究员, 主要研究方向为卫星定位接收机、扩频通信。email:309458644@qq.com

BPSK-like 算法虽仍能适用于 BOC(m,n)信号,但其主峰宽度变宽,捕获精确度降低;基于构建本地辅助函数的泛化波形算法^[8-10],需要在本地构建多路伪码,算法复杂。由于需要构建本地伪码后与接收信号进行相关,将增加资源消耗,且这种算法无法完全消除副峰。F Benedetto^[11]等设计了一种基于滤波的算法,该算法在一定的性能损失下消除了副峰,但保持了主峰的窄宽度,这种算法较为简单;文献[12]基于滤波算法提出了一种时域滤波算法,但只给出了滤波器的频域表达式,没有其具体实现方法。

本文针对 BOC(m,n)信号无模糊捕获技术展开研究,设计了一种基于时域滤波的 BOC(m,n)信号无模糊捕获算法。首先对时域滤波器的具体实现进行了研究,利用快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)的方法得到 FIR 滤波器参数,再进一步分析降低 FIR 滤波器阶数带来的性能影响。最后设计了基于时域滤波的 MMF+FFT 捕获算法,仿真结果表明,该算法能很好地消除多峰,达到无模糊捕获的效果。

1 BOC 调制理论介绍

BOC 调制是将方波作为子载波调制到伪码上,调制流程如图 1 所示。导航数据先经过伪码 $c(t)$ 扩频调制,再通过 BOC 方波副载波 $sc(t)$ 调制,对频谱进行搬移,最后通过载波调制发送出去,接收的 BOC 信号可表示为:

$$r(t) = Ad(t - \tau)c(t - \tau)sc(t - \tau)\cos[(W_{IF} + 2\pi f_d)t + \varphi] + N(t) \tag{1}$$

式中: A 为信号幅度; $d(t)$ 为导航数据; W_{IF} 为中频信号的角频率; φ 为相位; f_d 为多普勒频移; τ 为信号延迟; $N(t)$ 为噪声。

BOC 信号通常记为 BOC(m,n),表示伪码速率 f_c 为基准频率的 m 倍,副载波频率 f_s 为基准频率的 n 倍,调制指数 $N=2m/n$ 。副载波将信号的频谱分裂为以原有载频为中心的对称的两部分,但也带来了自相关函数的多峰特性。

BOC(m,n)信号相对于 BOC(n,n)信号,在频域的频谱分布及时域的自相关函数波形上都有很大的不同,适用于 BOC(n,n)的捕获算法不一定适用于 BOC(m,n)信号。本章先对 BOC(m,n)信号的频谱分布及时域自相关函数波形进行简单分析。

首先对频谱特性进行分析,在中心频率为 46.098 MHz,采样率为 62 MHz 的条件下进行频谱分析,结果如图 2 所示。图中为 BOC(1,1),BOC(2,1),BOC(4,1)的频谱分布,根据图 2 可以看出,BOC(m,n)信号只包含 2 个主峰,但随着调制指数的增加,主峰之间的频率间隔增加,且主峰之间的副峰个数也会增加,如果调制指数为 N ,则 2 个主峰之间副峰的个数为 $N-2$ 。

图 3 为 BOC(1,1),BOC(2,1),BOC(4,1)的时域自相关函数。由图 3 可知,BOC(1,1)有 2 个副峰,BOC(2,1)有 6 个副峰,BOC(4,1)的副峰个数增加到 14 个,可得副峰的个数为 $2N-2$ 。

2 基于时域滤波的 BOC(m,n)信号捕获原理

2.1 基于滤波的无模糊捕获算法原理

在 BOC(m,n)信号无模糊捕获算法中,常用的方法是在本地设计辅助信号^[8-10]。这种方法的缺点是无法完全消除副峰,一种新的设计思路是设计滤波器对自相关结果进行滤波。

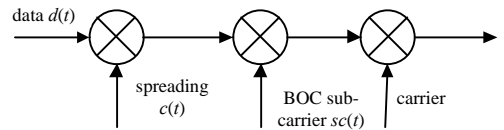


Fig.1 Procedure of BOC signal modulation
图 1 BOC 信号调制流程

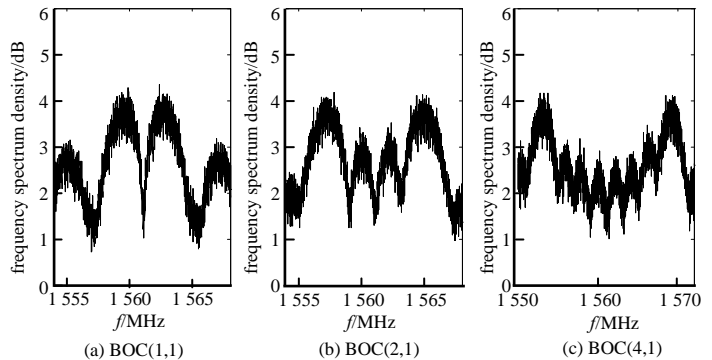


Fig.2 Frequency spectrum density of BOC signals
图 2 BOC 信号的频谱密度

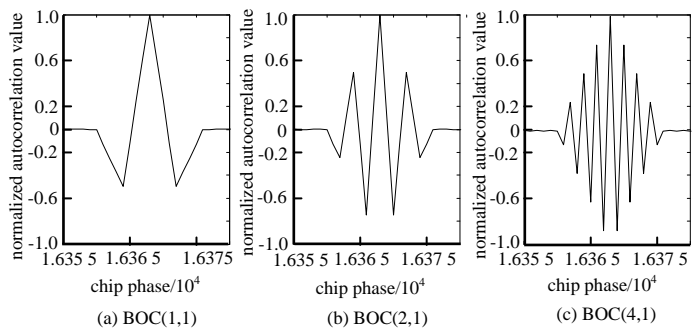


Fig.3 Correlation function curve of BOC signals
图 3 BOC 信号伪码的自相关结果

设计一种 FIR 滤波器对 BOC 自相关的非相干积累结果进行滤波以达到消除副峰的效果^[11], 滤波器分为两部分, 第一部分的冲激响应为:

$$h_1 = \frac{1}{2}\delta(t + \tau^*) + \delta(t) + \frac{1}{2}\delta(t - \tau^*) \quad (2)$$

式中 τ^* 为需要调节的延迟量。滤波器的作用是对非相干积累结果进行前后延迟再相加, 以达到消除副峰的目的。滤波器的频率响应为:

$$H_1(w) = 1 + \cos w\tau^* \quad (3)$$

该滤波器的频带必须包含 BOC 自相关功率谱的主瓣, 因此 τ^* 取 $T_s/2$ 。为消除 BOC 主瓣外的副瓣, 还需要设计第 2 部分的滤波器, 其冲激响应为:

$$h_2 = \frac{1}{2}\delta(t + 2\tau^*) + \delta(t) + \frac{1}{2}\delta(t - 2\tau^*) \quad (4)$$

频率响应为:

$$H_2(w) = 1 + \cos 2w\tau^* \quad (5)$$

则总的滤波器频率响应为:

$$H_{\text{filter}} = H_1(w) * H_2(w) = \frac{1}{2}\cos 3w\tau^* + \cos 2w\tau^* + \frac{3}{2}\cos w\tau^* + 1 \quad (6)$$

该滤波器设计简单, 适用于 BOC(m, n) 信号, 在一定的性能损失下消除了副峰。但该算法的主峰宽度变回到相同码速率下 BPSK 信号峰值的宽度。

2.2 时域滤波算法原理

无模糊捕获算法设计思路是用滤波器对 BOC 信号自相关结果进行滤波以达到消除副峰的目的。在此思路下, 设计一种时域滤波算法, 可以很好地消除副峰, 且保持主峰宽度不变^[12]。

以 BOC(2,1) 为例, 观察 BOC(m, n) 的自相关函数。从图 3 中的波形可以看出, BOC(2,1) 主峰峰值为 1, 第一副峰峰值为 -0.75, 第二副峰峰值为 0.5, 第三副峰峰值为 -0.25。每个峰值的宽度约为副载波的半周期。

为达到无模糊捕获的目的, 即最终的相关结果只留主峰。设计滤波器, 对 BOC 信号的自相关结果进行滤波, 消除副峰, 使相关结果只留下主峰。设主峰的时域函数为 $x(t)$, 多峰的时域函数为 $y(t)$, 则有

$$y(t) \approx \sum_{i=-(N-1)}^{N-1} \left[\left(1 - (-1)^i \frac{i}{N} \right) x(t - it_s) \right] \quad (7)$$

式中 t_s 为副载波的半周期。通过式(7)可以反求出滤波器的频率响应 $H(w)$ 。设 $x(t)$ 的傅里叶变换为 $X(W)$, $y(t)$ 的傅里叶变换为 $Y(W)$, 则

$$Y(w) \approx X(w) \left[1 + \sum_{i=1}^{N-1} (-1)^i \frac{N-i}{2} \cos wit_s \right] \quad (8)$$

最终得到滤波器的频率响应为:

$$H(w) = 1 / H_0(w) \quad (9)$$

$$H_0 = 1 + \sum_{i=1}^{N-1} (-1)^i (1 - i/N) 2 \cos(wT_c i / N) \quad (10)$$

式中 T_c 为码片宽度。由于 H_0 中存在零点, 导致 $H(w)$ 的值无穷大, 必须对滤波器函数进行近似处理。当滤波器 $H(w)$ 大于某个门限 T 时, 将 $H(w)$ 置为 0。信号的功率谱密度和滤波器频谱如图 4 所示, 滤波器门限 $T=100$ 。

3 基于时域滤波的捕获算法设计及仿真分析

3.1 时域滤波器的设计

$H(w)$ 为滤波器的频率响应, 但未对滤波器进行时域的实现。实际应用中, 频域滤波需先将数据进行 FFT 变换。在频域进行处理, 计算较为复杂, 且在高动态的环境中, 多普勒频移较大时, 需对频率进行并行搜索, 对码相位进行串行搜索。这种情况下, 进行频域滤波将大大增加系统的复杂度。

对滤波器的频率响应进行 IFFT 变换, 得到其在时域中的滤波器系数, 构建能够在时域实现的 FIR 滤波器。

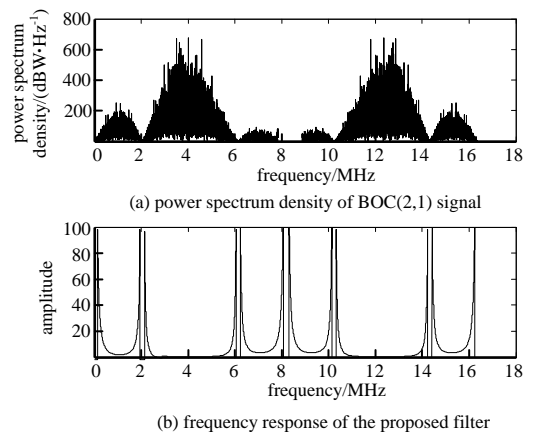


Fig.4 Power spectrum density of BOC(2,1) signal and the frequency response

图 4 BOC(2,1) 信号功率谱密度和滤波器的频响

根据文献[12], 设置滤波器门限为 $T=100$ 。以“北斗二代”一号卫星信号为仿真对象, 码率为 2.046 m/s, 用 BOC(2,1)进行调制, 仿真采样率为 16.368 MHz, 码片搜索步长为 1/8 码片。

仿真对比分析本文提出的基于时域滤波的捕获算法、BPSK-like 算法^[5]、基于辅助信号的泛化波形^[12]算法。该仿真为理想情况, 只考虑码片相位对相关峰的影响, 不考虑信号的频偏、噪声及其他干扰等相关峰的影响, 相关能量对比如图 5 所示。由图 5 可见, BPSK-like 算法虽消除了副峰, 但得到的自相关峰宽度较大, 由于采用了基于 BPSK 信号的处理方式, 图中 BPSK 处理后, 相关峰宽度为 16 点, 即 2 个伪码长度; 基于辅助信号的泛化波形法利用了 BOC 信号的窄相关特性, 保持了主峰的窄宽度, 宽度为 1/4 个码片, 但副峰仍有残留, 不能完全削弱副峰。本文设计的基于时域滤波的算法, 主峰宽度为 1/2 个码片宽度, 虽然拓宽了主峰, 但在应用中是可接受的, 同时可以完全抑制副峰。

设计时域滤波器时, 阶数很大的滤波器并不适合在实际设计中应用, 因此本文考虑通过抽取减小滤波器的阶数, 但减小滤波器阶数会使滤波器性能受到一定的影响。设 $T=100$, 经过不同阶数的滤波器后的时域相关结果如图 6 所示。设 $R_{SN}=15$, 由图 6 可以看出, 当滤波器阶数为 127 时, 主峰较为明显; 当阶数为 63 阶时, 主峰比较明显, 但同时可见主峰下半部宽度拓宽, 已不能完全抑制副峰; 当滤波器阶数为 31 时, 副峰高度仅为主峰的一半, 实际应用中, 此滤波器不能正确捕获主峰。在后续的捕获算法设计中, 设置滤波器阶数为 127。

3.2 基于时域滤波的 BOC 无模糊捕获算法设计

在高动态环境中, 信号的多普勒频移范围较大, 此时基于并行码相位的 FFI-IFFT 方法不再适用。本文采用文献[13]提到的 MMF+FFT 捕获算法框架, 加入时域滤波, 设计了一种基于时域滤波的 BOC 无模糊捕获算法, 其算法如图 7 所示。

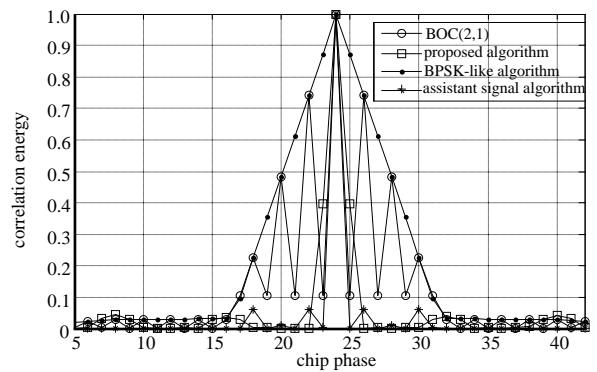


Fig.5 Comparison of different algorithms of BOC(2,1) signal
图 5 BOC(2,1)不同捕获算法的相关能量对比图

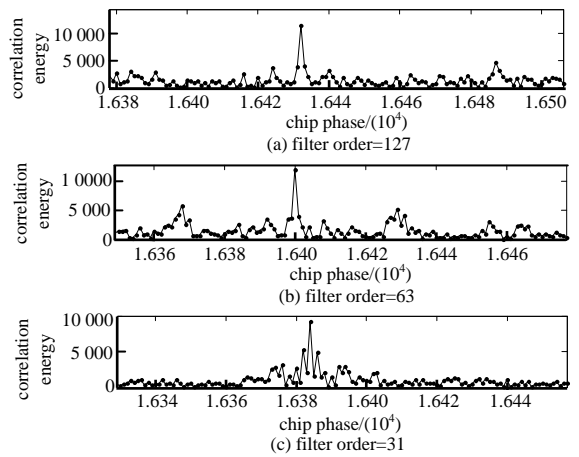


Fig.6 Performance comparison of different filter orders
图 6 不同阶数滤波器性能比较

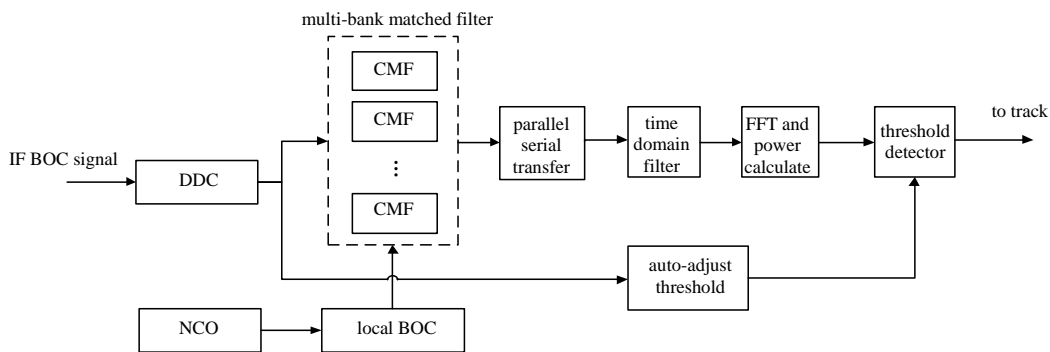


Fig.7 Acquisition algorithm diagram of BOC signal
图 7 BOC 信号捕获算法架构

接收到的信号经过下变频后, 先与本地产生的 BOC 信号经过多段匹配滤波后, 进行并串转换, 再经过时域滤波。对经过时域滤波后的信号进行 FFT 变换, 并对能量进行计算, 最后与捕获门限进行对比。

利用 Matlab 实现 BOC 捕获算法, 并进行仿真分析。以“北斗二代”一号卫星信号为仿真对象, 码率为 2.046 MHz/s, 伪码周期 2 046, 用 BOC(2,1)进行调制。设采样率为 16.368 MHz, 则一个码片相位有 8 个采样点, 码片搜索步进为 1/8 个码片周期。算法中预检测积分时间为 1 ms, 则多普勒搜索的步进为 1 kHz。设输入信号信噪比 15 dB, 本地码相位和接收信号的码相位偏差为 1 900 个码相位, 多普勒频移为 20 kHz。

捕获算法仿真结果如图 8 所示。从图 8 中可以看到, 经过时域滤波后, 主峰明显, 基本消除了副峰带来的干扰, 实现了 BOC 信号的无模糊捕获。仿真图中码相位为 1 177, 计算可得 C/A 码的码相位为 1 900, 频率为 45 kHz, 经过计算, 可得原始信号的多普勒频移为 20 kHz, 与原始信号的码相位和多普勒频移相符。

4 结论

本文基于滤波原理对 BOC 调制信号进行了捕获算法的设计, 首先给出了 BOC 调制信号的基本原理, 对于 BOC(m,n)信号进行传统捕获中相关运算时存在多峰的特殊性, 设计了时域滤波器以达到峰值的无模糊捕获, 并对多种算法进行了对比。在此基础上, 本文进一步分析了降低滤波器阶数的性能, 通过仿真验证了其可行性。最后设计基于时域滤波和 MMF-FFT 的 BOC 无模糊捕获算法, 并对算法进行仿真分析, 该算法能很好地消除多峰, 达到无模糊捕获的效果。

参考文献:

- [1] LOHAN E S, LAKHZOURI A, RENFORS M. Binary-Offset-Carrier modulation techniques with applications in satellite navigation systems[J]. *Wireless Communication and Mobile Computing*, 2007, 7(6):767-779.
- [2] XU Ying, YUAN Hong. Navigation signal structure based on complex carrier modulation[J]. *Science China: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2011, 54(6):1035-1045.
- [3] 章林锋, 何海波, 李琳, 等. 北斗 B1C 信号及导航电文的特点分析与比较[J]. *现代导航*, 2018, 4(2):79-97. (ZHANG Linfeng, HE Haibo, LI Lin, et al. Characteristic analysis and comparison of Beidou B1C signal[J]. *Modern Navigation*, 2018, 4(2):79-87.)
- [4] 胡修林, 周艳玲, 唐祖平. 导航信号的 BOC 调制方式[J]. *无线电工程*, 2007, 37(3):31-33. (HU Xiulin, ZHOU Yanling, TANG Zuping. The BOC modulation of navigation signal[J]. *Radio Engineering of China*, 2007, 37(3):31-33.)
- [5] BURIAN A, LOHAN E S, RENFORS M. BPSK-like methods for hybrid-search acquisition of Galileo signals[C]// 2006 IEEE International Conference on Communications. Istanbul, Turkey: IEEE, 2006:5211-5216.
- [6] 黄彬, 汪文雯, 张纪超, 等. 一种新的 BOC 信号捕获算法[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(8):199-203. (HUANG Bin, WANG Wenwen, ZHANG Jichao, et al. A novel acquisition algorithm of BOC signal[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(8):199-203.)
- [7] JULIEN O, MACABIAU C, CANNON M E, et al. 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.
- [8] 冯永新, 徐美荣, 刘宪涛, 等. 基于 BOC 调制信号的频域主瓣叠加捕获算法[J]. *数据采集与处理*, 2012, 27(1):27-31. (FENG Yongxin, XU Meirong, LIU Xiantao, et al. Main lobe overlapped acquisition algorithm of frequency domain based on BOC modulation signal[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2012, 27(1):27-31.)
- [9] YAO Zheng, LU Mingquan, FENG Zhenming. Unambiguous sine-phased binary offset carrier modulated signal acquisition technique[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(2):577-580.
- [10] YANG Zaixiu, HUANG Zhigang, GENG Shengqun. Unambiguous acquisition performance analysis of BOC(m,n) signal[C]// 2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science. Wuhan, China: IEEE, 2009.
- [11] BENEDETTO F, GIUNTA G, LOHAN E S, et al. A fast unambiguous acquisition algorithm for BOC-modulated signals[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(3):1350-1355.
- [12] 汪伟. BOC 信号无模糊捕获技术的研究与实现[D]. 北京: 北京理工大学, 2015. (WANG Wei. The research and realization of unambiguous acquisition algorithm on BOC signals[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.)
- [13] 吴军伟, 梁涛涛, 秦代成, 等. 一种 GNSS 信号捕获中的比特压缩与重构方法[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2014, 12(5):698-701. (WU Junwei, LIANG Taotao, QIN Daicheng, et al. A bit compress and recover approach in GNSS signal acquisition[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2014, 12(5):698-701.)

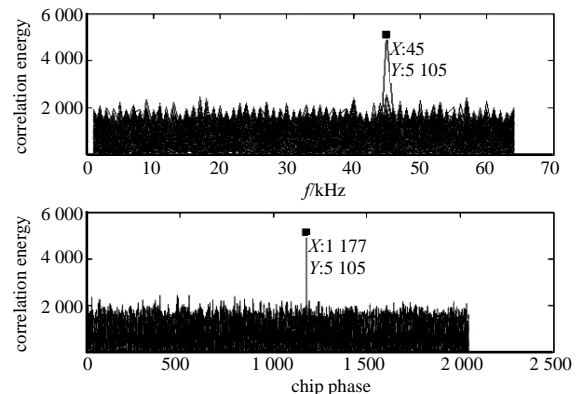


Fig.8 Results of acquisition design
图 8 捕获算法结果