# 基于频域符号相关的北斗信号捕获新算法

王嘉宁，廉保旺，吴鹏

（西北工业大学 电子信息学院，陕西 西安　710072）

**摘　要**：北斗导航信号中 NH 码会导致北斗导航信号的捕获概率降低和捕获时间的增加。为了实现对导航信号的快速捕获，在不进行码剥离的条件下提出了一种基于 PMF-FFT 结构的频域符号相关算法。该算法首先对接收到的北斗导航信号进行部分匹配滤波（PMF）和 FFT，其次，对各个码相位对应 PMF-FFT 输出结果进行频域符号相关处理以消除符号跳变的影响，从而实现有符号跳变下，北斗导航信号的快速捕获。仿真结果表明，在相同的虚警概率和检测概率下，文中所提出的算法相对于 PMF-FFT 算法和 PMF 非相关积分算法分别有 1.8 dB 和 1.5 dB 的灵敏度提升。

**关　键　词**：北斗信号；频域相关；捕获；PMF-FFT

**中图分类号**：TP91　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-2758（2016）05-0867-07

近年来，随着北斗区域导航系统的服务运行，北斗卫星导航接收机的研制迎来一股热潮[1]。北斗导航信号在导航电文中引入了速率为 1 kB/s 的 NH 码，可以使接收机快速实现数据同步，降低频谱谱线的间隔，进一步抑制窄带干扰。但对北斗导航信号的捕获而言，随机采样的 1ms 接收信号内都可能存在符号翻转，这对现有的导航信号捕获方法提出了严重挑战，更制约了北斗接收机灵敏度的提高[2]。如何克服 NH 码的影响，实现信号的快速捕获，已成为北斗卫星导航快速捕获方面的研究热点。

经典的伪码捕获技术主要分为 3 种：①基于时域的捕获算法，通过大量的时域并行相关器实现信号的直接捕获[3]，该算法结构简单，但是捕获时间较长；②使用 FFT 将信号变换到频域进行处理的频域相关算法[4]；此类算法需要大量 FFT 运算，耗费的硬件资源较大，捕获灵敏度不高。③基于时域相关和频域 FFT 结合的 PMF-FFT 算法，该算法可以同时完成码相位和频率的二维并行搜索，较上述 2 种算法减少了捕获时间[5-6]，但是该算法结构较为复杂，而且北斗信号中频繁的符号跳变对其影响很大。目前的软件接收机中对北斗信号的捕获主要分采用的是通过剥离 NH 码来实现的，但是这些算法往往存在计算量大捕获时间长的问题[7-8]。

针对上述问题，本文提出一种基于 PMF-FFT 算法的频域符号匹配算法来实现北斗信号的快速捕获，该算法首先对接收到的北斗导航信号进行 PMF-FFT 处理，其次，通过引入多频域符号匹配处理技术消除符号跳变带来的影响，从而提高了北斗导航信号的捕获灵敏度，实现对北斗信号的快速捕获。

## 1　PMF-FFT 算法模型

首先，本文利用 PMF-FFT 算法对北斗导航信号进行捕获，PMF-FFT 算法捕获流程如图 1 所示。

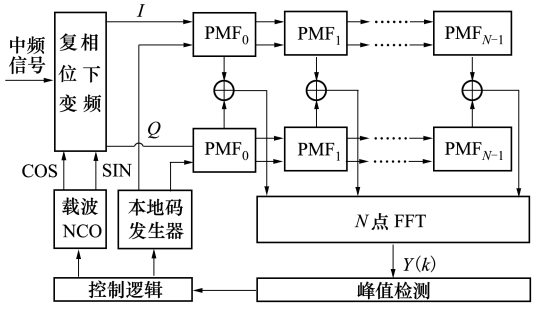



图 1　PMF-FFT 算法捕获流程

**收稿日期**：2016-03-12　　**基金项目**：国家自然科学基金（61501430）资助

**作者简介**：王嘉宁（1983—），西北工业大学博士研究生，主要从事卫星信号捕获研究。

接收机将收到的中频 GNSS 采样信号,经过复相位下变频为零中频数字信号: $S_{bs}(iT_s)$

$$S_{bs}(iT_s) = AC(iT_s - \tau)D(iT_s - \tau) \times \exp[\mathrm{j}(2\pi f_d iT_s + \phi_0)] + N(iT_s) \quad (1)$$

式中, $A$ 表示信号的幅度,$C(iT_s)$ 表示扩频码,$D(iT_s)$ 表示调制的导航信息(在北斗信号中,其表示导航电文和 NH 码的乘积,其速率为 1 kB/s),$\tau$ 表示伪码相位的偏移, $T_s$ 表示采样间隔,$f_d$ 表示多普勒频移,$\phi_0$ 表示载波初相位,$N(iT_s)$ 为为高斯白噪声。

北斗接收机缓存 $P \times N$ 点 $S_{bs}$ 信号,$P$ 为每段相干积分的点数,$N$ 为 FFT 点数。同时将本地扩频码序列 $X(iT_s)$ 缓存 $P \times N$ 点,并将本地扩频码序列 $X(iT_s)$ 和零中频数字信号 $S_{bs}(iT_s)$ 进行长度为 $P$ 的分段相干积分处理, 从而得到相关积分结果 $Z_{\mathrm{coh}}(m)$,$m \in [0, N-1]$。其次,对 $Z_{\mathrm{coh}}(m)$ 进行 $N$ 点的 FFT 变换,忽略掉噪声项,得到序列 $Y(k)$,$k \in [0, N-1]$,当导航信号无符号跳变时,该序列如(2)式所示。

$$Y(k) = AR(\Delta\tau)\frac{\sin(\pi f_d T_s P)}{\sin(\pi f_d T_s)} \cdot \frac{\sin\left[\pi\left(f_d T_s P - \frac{k}{N}\right)N\right]}{\sin\left[\pi\left(f_d T_s P - \frac{k}{N}\right)\right]} \times \exp\left[\mathrm{j}\pi\left(f_d T_s P - \frac{k}{N}\right)(N-1) - \mathrm{j}2\pi f_d T_s P + \phi_0\right] \quad (2)$$

式中, $R(\tau) = \sum_{i=0}^{P-1} C(iT_s - \tau)C(iT_s)/P$ 为 $P$ 点扩频码的归一化自相关函数。对 $Y(k)$ 取模得到 $|Y(k)|$,并将 $|Y(k)|$ 送入峰值检测器,当 $|Y(k)|$ 超过检测门限即认定为完成导航信号的捕获。

$$Y(k) = AR(\Delta\tau)\frac{\sin(\pi f_d T_s P)}{\sin(\pi f_d T_s)} \cdot \exp(-\mathrm{j}2\pi f_d T_s P + \phi_0) \times \left\{\exp\left[\mathrm{j}\pi\left(f_d T_s P - \frac{k}{N}\right)(L-1)\right] \cdot \frac{\sin\left[\pi\left(f_d T_s P - \frac{k}{N}\right)L\right]}{\sin\left[\pi\left(f_d T_s P - \frac{k}{N}\right)\right]} - \exp\left[\mathrm{j}\pi\left(f_d T_s P - \frac{k}{N}\right)(N+L-1)\right] \times \frac{\sin\left[\pi\left(f_d T_s P - \frac{k}{N}\right)(N-L)\right]}{\sin\left[\pi\left(f_d T_s P - \frac{k}{N}\right)\right]}\right\} \quad (3)$$

(3)式表示的是,当 PMF 结果序列中存在第 $L$ 个 PMF 结果处发生一个符号跳变时的结果。

对比(2)、(3)式可得到,当 $L=N/2$ 时,$|Y(k)|$ 的最大值有约 3 dB 的衰减,并且最大值所在的频率点也会出现偏移,这种情况会随着符号跳变点的增多而恶化。为此,本文对有一个符号跳变时的 B3 频点信号使用 PMF-FFT 算法进行捕获仿真。仿真条件中扩频码速率为 10.23 Mc/s,扩频码长 10 230,$C/N_0 = 42$ dB/Hz,每个码片采样点数为 2,取 PMF 相关点数为 640,FFT 点数为 64,总缓存长 2 ms 的接收信号,符号跳变出现在 1 ms,其中多普勒频移 $f_d$ 为 5 000 Hz,频率分辨率 $\Delta f = 500$ Hz,码相位偏移为 0,仿真结果如图 2 所示。

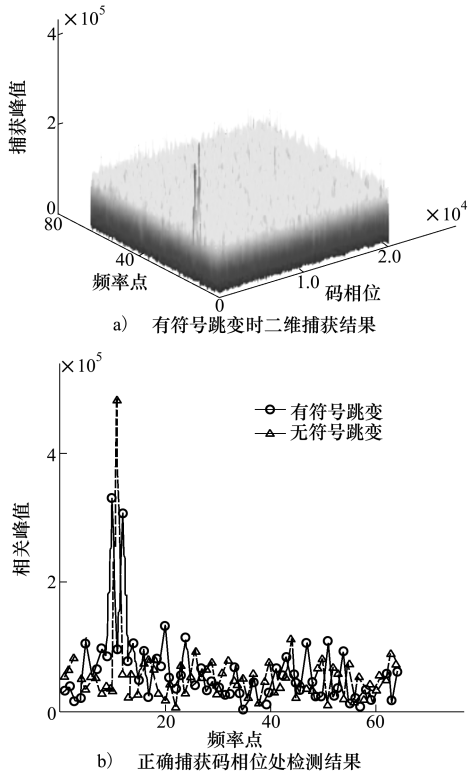



图 2 符号跳变对 PMF-FFT 的影响

图 2a)中在正确捕获码相位处出现了 2 个近似的峰值,2 个峰值分别位于频率点 10 和 12 处,其多普勒频移分别为 4 500 Hz 和 5 500 Hz(Matlab 计数起始位置位 1),图 2b)则对比了正确捕获码相位处

有无符号跳变时 FFT 变换的结果,图 2b)中正确的相关峰出现在频点 11 处,其对应的多普勒频移为 5 000 Hz,仿真结论与本文的理论分析一致。为了消除符号跳变的影响,实现对北斗导航信号的快速捕获,本文在 PMF-FFT 算法的基础上,提出了一种基于频域符号相关的北斗导航信号快速捕获算法。

## 2　基于频域相关的捕获方法

通过分析北斗导航信号捕获的计算过程,为了消除符号跳变的影响,本文利用一个时域符号补偿序列 对 PMF-FFT 的捕获结果结论进行修正,其中时域符号补偿序列 表示如下

$$B(m)=\begin{cases}1, & 0<m<L\\ -1, & L\leqslant m<N\end{cases} \tag{4}$$

经过时域补偿的序列,进行 FFT 变换后得到的捕获结果如(5)式所示。

$$|Y(k)'|=|\mathrm{FFT}[Z_{\mathrm{coh}}(m)\cdot B(m)]|=|Y(k)|_{\mathrm{Max}} \tag{5}$$

将经过 PMF-FFT 后的捕获序列 $|Y(k)|$ 与时域符号补偿后的序列 $|Y(k)'|$ 进行联合判决,选择其中绝对量值较大与检测门限进行比较,如果超过检测门限则认为捕获成功。

使用时域补偿序列对接收信号进行补偿的难点主要有 2 个:①在于如何确定符号跳变点;②当数据跳变点较多时需要进行 FFT 的次数较多,需要较大的硬件资源来支持。

使用时域补偿序列对接收信号进行补偿的难点主要有 2 个:①在于如何确定符号跳变点;②当数据跳变点较多时需要进行 FFT 的次数较多,需要较大的硬件资源来支持。

针对以上问题,本文首先在使用 PMF 计算时,改变接收信号的起始位置,即控制接收信号滑过本地序列,保证接收扩频码的起始位置与本地码起始位置对齐,确保符号跳变出现在每个扩频码序列的 1 ms 起始位置;其次,通过选择适当的相关积分长度,从而使每周期接收信号的采样点约为的整数倍,从而提高符号补偿带来的增益(考虑到导航信号使用伪随机序列的特殊性,该点比较容易满足)。其过程如图 3a)所示。

为减少运算量,这里将时域的相乘项进行变换,通过时频域转化公式,可以得到如下的结果

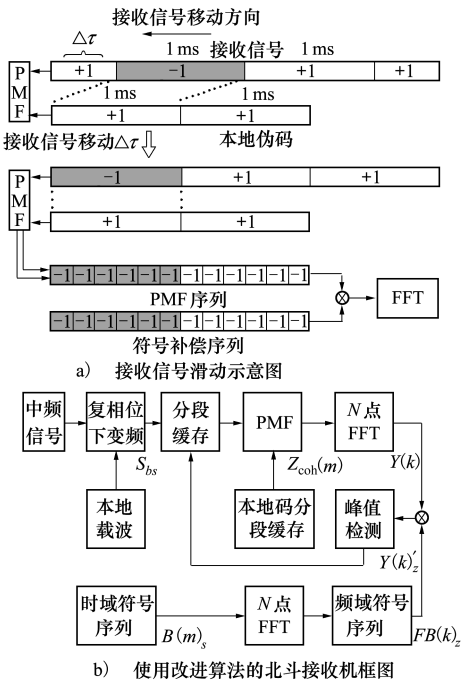



图 3　本文改进算法示意图

$$\begin{aligned}Y(k)' &= \mathrm{FFT}[Z_{\mathrm{coh}}(m)B(m)]\\ &= \mathrm{FFT}[Z_{\mathrm{coh}}(m)]\otimes\mathrm{FFT}[B(m)]\end{aligned} \tag{6}$$

通过使用频域相关技术,可以将对时域信号的多次 FFT 操作,变换为频域的相关,减少 FFT 模块个数。从而进一步降低数据符号 $D(m)$ 的计算量,当总的缓存信号长度为 $T$ ms 时,$D(m)$ 中最多包含有 $T-1$ 个符号跳变,则 $D(m)$ 的组合有 $2^{T-1}$ 种,以 $T=3$ 为例

$$\begin{aligned}&+1+1+1\equiv-1-1-1+1+1-1\equiv\\ &-1-1+1+1-1+1\equiv\\ &-1+1-1-1+1+1\equiv+1-1-1\end{aligned} \tag{7}$$

接收机可以根据预设的参数将几组将符号补偿序列 $B(m)_s, s=0,1,\cdots 2^{T-1}-1$ 通过 FFT 变换预置进几个 RAM 模块中,运算时直接读取 RAM 中的预置结果并与 $Y(k)$ 相关得到 $Y(k)'$ 序列。

基于以上分析本文给出一种使用频域相关的算法,其具体步骤如下:

Step1　接收机将接收到的 IQ 支路中频信号经复相位下变频为零中频信号 $S_{bs}(i)$,取长度为 $P\times N$ 的零中频信号(共计 $T$ ms)缓存,共分成 $N$ 段(则 $N=2^n$,$n$ 为整数,最后一段小于 $P$ 点时可以用后续信号补足),每一段的数据长 $P$。

Step2　接收机缓存长为 $P\times N$ 本地扩频码信号 $S_{\mathrm{loc}}(i)$。

Step3 接收机根据相干积分时间 $T$ 生成 $N$ 点时域的符号序列 $B(m)_s$,对 $B(m)_s$ 分别进行 FFT 变换,结果记为 $FB(k)_s$ 并分别保存在 RAM 中。

Step4 连续读取 $N$ 段长度为 $P$ 的缓存接收信号 $S_{bs}(i)$ 和本地扩频码 $S_{\mathrm{loc}}(i)$,完成相对应 PMF 运算,得到 $Z_{\mathrm{coh}}(m)$,然后对 $Z_{\mathrm{coh}}(m)$ 进行 $N$ 点 FFT 运算,得到 PMF-FFT 输出结果 $Y(k)$,并缓存。

Step5 读取 RAM 中保存的 $FB(k)_s$ 分别与 $Y(k)$ 进行频域相关操作,将频域相关结果记为 $Y(k)'_s$。

Step6 将序列 $Y(k)$ 与 $Y(k)'_s$ 送入峰值检测器,取模最大的一个与预设的检测门限进行比较,如果超过阈值则认为捕获成功,转入步骤 7,否则,从缓存的接收信号的下一个码相位点处读取信号,转入步骤 4

Step7 转入跟踪状态。

使用本文算法改进算法的接收机如图 3b)所示。

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真参数设置

为检验改进算法的捕获性能,本文以 B3 频点信号进行捕获过程仿真,仿真参数中,NH 码速率为 1 kB/s,伪码的速率为 10.23 Mc/s,码长 10 230,信号的调制方式为 BPSK.捕获算法中随机生成 4 ms 的 NH 码,并与伪码扩频、调制后,经过高斯信道得到仿真所需的中频信号,接收端采样速率 $f_s$ = 62 MHz,每个码片抽取一个采样信号,对接收信号执行本文提出算法、捕获算法采用的相关长度 $P$ = 640,FFT 点数 $N$ = 64,则分段累积时间为 $640/10.23\times10^6$ ≈0.064 ms,捕获过程中频率动态范围为±8 kHz,FFT 变换频率分辨率为 $\Delta f$≈250 Hz。可以满足后续的跟踪环路的要求。在运算过程中最多可能出现 3 次符号跳变。故需要缓存到本地 RAM 中的 FFT 变换结果为 $2^3-1=7$ 个。

### 3.2 仿真结果分析

图 4 设置调制的 NH 码为 1-1 1-1,码片偏移 1 000,预设多普勒频移 $f_d$ 为 1 000 Hz,载噪比为 40 dB/Hz,本文正确捕获码相位为 9 232,多普勒频率点为 61,由于文中算法是改变接收信号的码相位,数据下标开始为 1,正确的捕获码相位为 10 230-1 000+2=9 232,捕获码相位正确,仿真中检测的多普勒频率点为 61,采用的是改变符号序列的相位进行相关的方式,需要将多普勒频移进行换算到直接采用 PMF-FFT 算法的频率点上,即 64-61+2=5,此时对应的多普勒频率正是 1 000 Hz。对比图 4b)中在此载噪比条件下经典的 PMF-FFT 算法,此时其相关峰的最大值和多普勒频移已经错误。

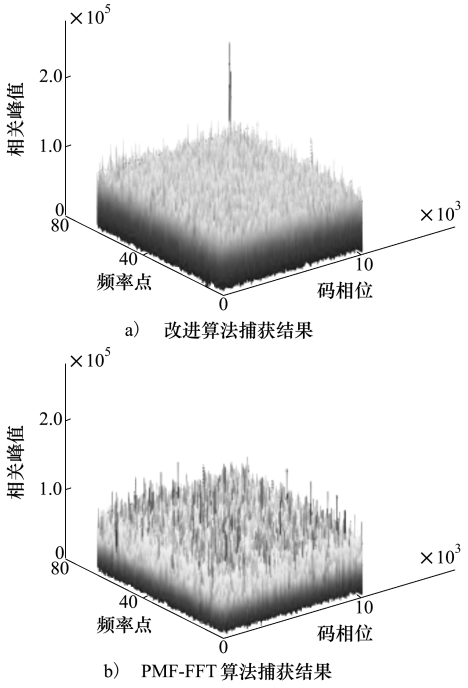



图 4 本文算法和 PMF-FFT 算法捕获结果对比

为了进一步对比验证本文算法的性能,在此将本文算法与现有的 PMF-FFT 和 PMF-非相干积分法进行性能对比仿真,其中虚警概率设置 $P_{fa}$ = 0.02。其他参数设置同上。

本文首先给出了 3 种算法虚警概率的仿真对比,其中本文算法和 PMF-FFT 算法采用文献[9]中的检测门限计算方法,PMF 非相干积分采用文献[10]的检测门限计算方法。

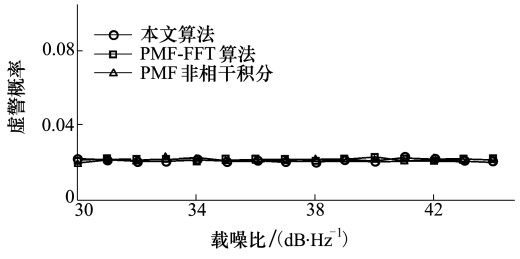



图 5 3 种算法虚警概率对比

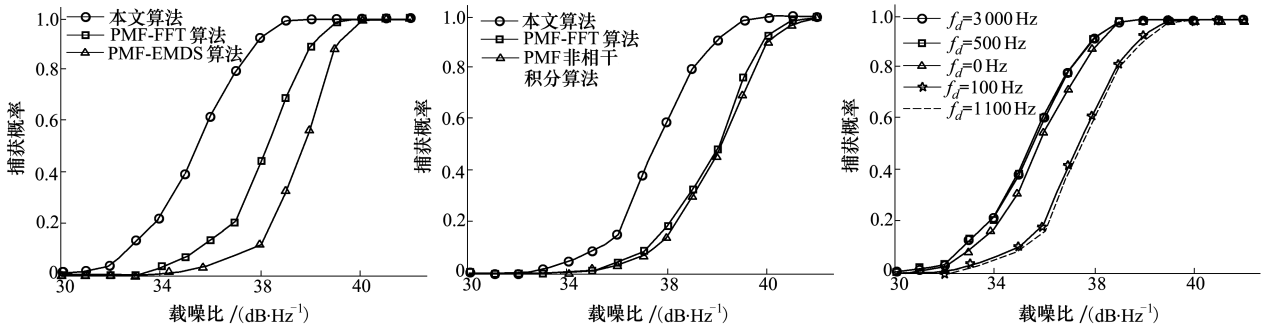
图 5 可见几种情况下的仿真虚警概率与设定虚警概率非常一致,故后续的性能仿真都基于此虚警概率进行对比验证。

### 3.3　捕获性能对比

由图 6a)和 6b)可见,由于本文改进算法引入了频域的符号相关计算,消除了符号跳变的影响,使得捕获过程中获得了较高的增益,提高了系统的灵敏度.在无多普勒频移的情况下,本文算法与 PMF-FFT 算法比较,本文算法在载噪比为 40 dB/Hz 时,捕获概率达到 100%,相对于 PMF-FFT 算法有约 2 dB 的增益,相对于 PMF 非相干积分有 3 dB 的性能提升。当多普勒频移为 1 100 Hz,此时本文改进算法相对于 PMF-FFT 算法有约 1.5 dB,对比 PMF 非相干积分有 2 dB 的增益。这是由于多普勒频移对 FFT 的影响,尤其是当频偏位于 FFT 频率格中间时,会使 FFT 输出增益降低,使得 PMF-FFT 算法和本文算法的捕获算法性能有所下降,而 PMF 非相关积分算法,则是将 PMF 后的序列直接进行非相关积分,故其不存在此部分的性能损失。在此本文给出了改进算法不同频偏下的捕获性能,如图 6c)所示,图中的仿真结果也与上文的理论分析相吻合。

算法的捕获性能对比本文参考文献[14]的方式,即假设多普勒频移在-2 000~2 000 Hz 范围内均匀分布,在各个多普勒频移下 90%检测概率对应的信号平均载噪比作为捕获灵敏度.捕获结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,对于 90%的检测概率,本文算法比 PMF-非相干积分捕获算法灵敏度提高约 1.5 dB,比 PMF-FFF 捕获灵敏度提高约 1.8 dB。




a)　无频偏下捕获概率对比　　b)　频率 1 100 Hz 下捕获概率对比　　c)　本文改进算法在不同频偏下捕获性能

图 6　改进算法的捕获性能对比

**表 1　捕获灵敏度对比**

| 算法 | 本文算法 | PMF 非相干积分 | PMF-FFT |
|---|---|---|---|
| 捕获灵敏度/% | 40 | 41.5 | 41.8 |

### 3.4　实现复杂度分析

FPGA 实现时,硬件资源也是非常重要的影响因素,所以对上述算法需要消耗的硬件资源。资源进行对比,结果如表 2 所示。

在进行实现复杂度分析时,本文算法和对比的 PMF-FFT 算法均考虑在串行分段积分下得出,由对比可见本文算法相对于 PMF-FFT 算法在适度增加运算量的情况下,提升了系统的检测性能。

**表 2　捕获算法实现复杂度对比**

| 算法 | 乘法器 | FFT 单元 | RAM |
|---|---|---|---|
| PMF 非相干积分 | 4 | 0 | 0 |
| PMF-FFT | 4 | 64 点 FFT | 2 个 40 960 点 RAM |
| 本文算法 | 18 | 64 点 FFT | 2 个 40 960 点 RAM<br>7 个 64 点 RAM |

## 4　结　论

在北斗 BD3 频点导航信号中,NH 码的存在导致现有的信号捕获方法的捕获时间较长。本文提出了一种基于 PMF-FFT 的频域符号相关信号捕获算法,利用时域的乘法对应频域的卷积的特性,通过预

置频域符号补偿序列,补偿符号跳变带来的性能损失,仿真结果表明针对 BD3 信号,在同样的虚警概率下,本文算法在检测灵敏度上相对于对比的 PMF-FFT 算法和 PMF 非相关积分算法分别有 1.5 dB 和 1.8 dB 的提升。

## 参考文献:


[1] 严昆仑, 章红平, 张提升. NH 码对新一代 GNSS 信号捕获跟踪的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版)2015, 40(5): 682-687
Yan Kunlun, Zhang Hongping, Zhang Tisheng. Effects of NH Code for Beidou Signal Acquisition and Tracking[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(5): 682-687 (in Chinese)

[2] 孟骞, 刘建业, 曾庆化. 北斗 Neumann-Hoffman 码规避与捕获方法研究[C]//第六届北斗卫星导航年会, 2015
Meng Qian, Liu Jianye, Zeng Qinghua. Beidou Neumann-Hoffman Code Evasion and Acquisition Method[C]//China Satellite Navigation Conference CSNC2015, 2015 (in Chinese)

[3] 赵晋, 张建秋, 尹建君. 一种时域并行差分相关捕获算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010,32(1): 10-13
Zhao Jin, Zhang Jianqiu, Yin Jianjun. Parallel Differential Correlation Acquisition Algorithm in Time Domain[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010,32(1): 10-13 (in Chinese)

[4] 莫建文, 欧阳缮, 肖海林, 孙希延. 基于 DBZP 差分相干的 GPS 信号捕获算法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(6): 1085-1089
Mo Jianwen, Ouyang Shan, Xiao Hailin, Sun Xiyan. GPS Signal Acquisition Algorithm Based on DBZP Differential Coherent [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(6): 1085-1089 (in Chinese)

[5] 姚如贵, 冯泽明, 赵雨, 王伶. 基于 FFT 的时频并行捕获算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(3): 446-450
Yao Rugui, Feng Zeming, Zhao Yu, Wang Ling. Proposing a Fast Time-Frequency-Domain Parallel Acquisition Algorithm Based on FFT[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(3): 446-450 (in Chinese)

[6] 李文刚, 黄鑫磊, 刘文龙. 低信噪比环境下的长码捕获新算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2013, 40(4): 29-36
Li Wengang, Huang Xinlei, Liu Longwei. New Acquisition Scheme with High Sensitivity for Long Code[J]. Journal of Xidian University, 2013, 40(4): 29-36 (in Chinese)

[7] Juang J C, Tsai C T, Chen Y H. Development of a PC-Based Software Receiver for the Reception of Beidou Navigation Satellite Signals[J]. Journal of Navigation, 2013, 66(5): 701-718

[8] Bhuiyan Mzh, Sderholm S, Thombre S. Implementation of a Software-Defined Beidou Receiver[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Springer Berlin Heidelberg, 2014, 303:751-762

[9] Spangenbcrg S M, Scott I, Mdaughlin S. An FFT-Based Approach for Fast Acquisition in Spread Spectrum Communication Systems[J]. Wireless Personal Communication, 2000, 13(1/2):27-56

[10] Borid D, Akos D. Noncoherent Integrations for GNSS Detection: Analysis and Comparisions[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(1): 360-375

[11] 唐成凯,廉保旺,张玲玲. 卫星通信系统双向中继转发自干扰消除算法[J]. 西安交通大学学报,2015,49(2):74-79
Tang Chengkai, Lian Baowang, Zhang lingling. An Algorithm to Eliminate Self-Interference of Bidirectional Relaying for Satellite Communication Systems[J]. Journal of Xi′an Jiaotong University, 2015, 49(2): 74-79 (in Chinese)

[12] Sahmoudi M, Amin M G, Landry Jr R. Acquisition of Weak GNSS Signals Using A New Block Averaging Pre-Processing[C]// Proc IEEE/ION PLANS 2008, 2008: 1362-1372

[13] Abou-Khousa M, Ghrayeb A, El-Tarhuni M. A Multipath Detection Scheme for CDMA Systems with Spacetime Spreading[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2008, 57(1):146-156

[14] 丁继成.弱信号条件下 GPS 接收机关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009
Ding Jicheng. Research on Key Technologies of GPS Receiver on Weak Signal Environments[D]. Harbin, Harbin Engineering University,2009 (in Chinese)

# Method for BDS Signal Based on Sign Correlation in Frequency Domain

Wang Jianing, Lian Baowang, Wu Peng

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi′an 710072, China)

**Abstract**: Focusing on the problem of low acquisition probability and long acquisition time bought by NH code, under the condition of without NH code stripped, we propose a novel code acquisition algorithm based on PMF-FFT structure. Firstly, we obtained a set of frequency domain related vectors by PMF(partial matched filter) and FFT transform.Then we performed frequency domain correlation with the PMF-FFT results and sign sequences to remove the NH code. The theoretical analysis and simulation results show that compared with the PMF-FFT and PMF-incoherent algorithms the proposed algorithm can effectively improve the detection sensitivity, under the same condition.

**Keywords**: algorithms; Beidou navigation; frequency domain correlation; acquisition; PMF-FFT