

# 基于 FFT 预处理与 ASPeCT 高阶 BOC 捕获优化算法研究

王海汇, 叶红军

(中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081)

**摘要:** 针对二进制偏移载波 (BOC) 信号在高阶调制下因自相关函数副峰密集, 副峰幅值高而导致的严重的捕获模糊问题, 提出一种基于 FFT 均值预处理与 ASPeCT 算法相融合联合捕获优化系统, 构建一种创新的“预处理-捕获”协同处理框架, 该框架通过 FFT 均值预处理, 不仅显著降低了运算复杂度, 更关键的是从频域层面抑制了高阶 BOC 信号所特有的密集副峰分量, 从根本上优化了 ASPeCT 算法的输入信号质量, 突破了传统方法固定加权系数难以适配高阶调制副峰结构的固有局限; 仿真结果表明: 该系统能实现 BOC (14, 2) 等阶信号的无模糊捕获, 在  $-62 \sim -5$  dB 的关键信噪比区间, 达到相同检测概率与传统 ASPeCT 算法所需信噪比降低  $2 \sim 3$  dB, 同时捕获效率提升约 35%; 该研究系统地解决了传统 ASPeCT 算法对高阶 BOC 信号捕获适配性瓶颈, 为现代导航系统的可靠捕获提供了技术支撑。

**关键词:** 高阶 BOC 信号; 无模糊捕获; ASPeCT 算法; 副峰抑制; 捕获性能

## Research on FFT Pre-processing and ASPeCT High-Order BOC Acquisition Optimization Algorithm

WANG Haihui, YE Hongjun

(The 54th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation,  
Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** To address the severe acquisition ambiguity problem of Binary Offset Carrier (BOC) signals under high-order modulation—caused by dense and high-amplitude side peaks in the autocorrelation function—a joint acquisition optimization system integrating FFT mean-value preprocessing and the ASPeCT algorithm is proposed. An innovative “preprocessing-acquisition” collaborative processing framework is established. Through FFT mean-value preprocessing, this framework not only significantly reduces computational complexity but, more importantly, suppresses the dense side-peak components characteristic of high-order BOC signals from the frequency-domain perspective. This fundamentally improves the input signal quality for the ASPeCT algorithm and overcomes the inherent limitation of traditional methods, where fixed weighting coefficients struggle to adapt to the side-peak structure of high-order modulation. Simulation results show that the system achieves unambiguous acquisition of high-order signals such as BOC (14, 2). In the critical signal-to-noise ratio (SNR) range from  $-62$  dB to  $-5$  dB, it reduces the required SNR by  $2 \sim 3$  dB compared to the traditional ASPeCT algorithm under the same detection probability, while improving the simultaneous capture efficiency by approximately 35%. This study systematically resolves the adaptability bottleneck of the traditional ASPeCT algorithm in acquiring high-order BOC signals and provides technical support for reliable acquisition in modern navigation systems.

**Keywords:** high-order BOC signal; unambiguous acquisition; ASPeCT algorithm; side peak suppression; acquisition performance

收稿日期: 2025-10-16; 修回日期: 2025-11-24。

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFE0208400)。

作者简介: 王海汇(2000-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 叶红军(1983-), 男, 硕士, 正高级工程师。

引用格式: 王海汇, 叶红军. 基于 FFT 预处理与 ASPeCT 高阶 BOC 捕获优化算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(2): 211-218, 226.

## 0 引言

全球卫星导航系统 (GNSS, global navigation satellite system) 在现代导航、定位与授时应用中面临着日益紧张的频带资源与不断提升的抗干扰需求。因传统二进制相移键控 (BPSK, binary phaseshift keying) 调制的导航信号频谱利用效率有限并且在低信噪比环境中易受干扰, 性能难以满足未来发展的需要<sup>[1]</sup>。

为克服上述局限, 二进制偏移载波 (BOC, binary offset carrier) 调制技术应运而生<sup>[2]</sup>。BOC 调制通过将信号能量分散至主瓣两侧, 实现与传统二进制相移键控信号的频谱分离, 从而显著提升了系统的频谱利用效率和抗窄带干扰能力。然而, BOC 信号自相关函数的多峰结构特性<sup>[3]</sup>引入了捕获模糊这一核心挑战。捕获模糊即接收机在捕获过程中可能错误地锁定副峰而非真实的主峰, 导致捕获失败或精度下降。此问题在低阶 BOC (如 BOC (1, 1)) 信号中表现的并不明显, 但在高阶 BOC (如 BOC (14, 2)) 信号中的问题变得极为严重, 因其副峰幅度与主峰更为接近, 显著增加了算法误锁副峰的风险, 这会导致捕获时间延长与捕获成功率下降。

为解决 BOC 信号的捕获模糊问题, 学术界已提出多种技术路线, 主要包括以下几类: 其一为副峰消除技术, 如 BPSK-like 方法<sup>[4]</sup>将 BOC 相关函数近似为 BPSK 形式以实现无模糊捕获, 但在近似的过程中会牺牲约 50% 的信号功率, 导致检测性能损失; 其二为副载波相位消除技术<sup>[5]</sup> (SCPC, sub-carrier phase cancellation), 该技术通过引入额外的相位处理来削弱副峰, 但其处理流程会引入主峰损耗, 在高动态或低信噪比环境下性能受限。此外还有相关函数重构技术, 如自相关副峰消除算法<sup>[6-7]</sup> (ASPeCT, autocorrelation side peak cancellation technique) 通过构造两路本地参考信号进行加权差分以抑制副峰, 在低阶 BOC 信号中表现优异, 但其固定的加权系数难以适配高阶 BOC 信号复杂的多峰结构, 导致副峰抑制性能急剧恶化。

综合分析表明, 现有方法在处理高阶 BOC 信号时普遍面临副峰抑制性能、主峰完整度与实现复杂度之间的权衡困境。ASPeCT 算法在低阶信号中具备良好平衡性, 但其在高阶应用中的适应性不足构成主要瓶颈。

基于此, 本研究提出一种融合 FFT 均值预处理与 ASPeCT 算法的联合捕获优化系统, 构建一种创新的“预处理—捕获”协同处理框架。该框架通过 FFT 均值预处理, 不仅显著降低了运算复杂度, 更关键的是从频域层面抑制了高阶 BOC 信号特有的密集副峰分量, 从根本上优化了 ASPeCT 算法的输入信号质量, 突破了传统方法固定加权系数难以适配高阶调制副峰结构的固有局限。仿真结果表明, 该系统在 BOC (14, 2) 等高

阶信号捕获中实现无模糊捕获, 在关键信噪比区间 (-62 ~ -5 dB) 达到相同检测概率所需信噪比降低 2 ~ 3 dB, 同时捕获效率提升约 35%, 系统性解决了传统 ASPeCT 算法对高阶 BOC 信号捕获适配性瓶颈。

## 1 BOC 调制技术原理

为提升导航信号的频谱利用率与抗干扰能力, BOC 调制技术被引入新一代全球卫星导航系统中<sup>[8-11]</sup>。与传统 BPSK 调制不同, BOC 调制的核心在于利用一个方波副载波对扩频信号进行二次调制, 从而将信号能量从载波中心频点搬移至两侧的旁瓣, 实现了频谱分裂。

BOC 调制最显著的特征体现在其功率谱密度上。以正弦 BOC (1, 1) 为例, 其功率谱密度<sup>[12]</sup>可表示为:

$$G_{\text{Boc}}(f) = f_c \left[ \frac{\sin(\pi f / f_s) \sin(\pi f / 2f_s)}{\pi f \cos(\pi f / 2f_s)} \right]^2 \quad (1)$$

式中,  $f_c$  为伪随机码的速率;  $f_s$  为方波副载波频率。将 BOC (1, 1) 信号与 BPSK (1) 信号功率谱密度进行对比, 如图 1 所示。

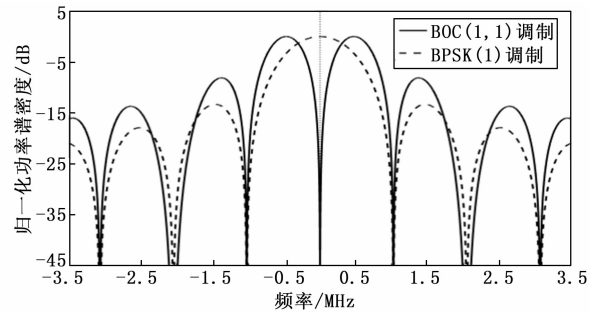


图 1 BOC (1, 1) 和 BPSK (1) 功率谱密度对比

由图 1 可知, BOC (1, 1) 信号的功率谱主瓣对称地分裂于载波中心频率两侧。这种频谱分裂特性有效缓解了频带拥挤问题, 并带来了优异的频谱隔离与抗窄带干扰性能。

然而, 频谱分裂在带来优势的同时, 也引入一个关键挑战: BOC 调制信号的自相关函数呈现多峰结构<sup>[13]</sup>。其自相关函数  $R_{\text{BOC}}(\tau)$  可以近似看作扩频码自相关函数  $R_c(\tau)$  与一个 sinc 副载波函数进行调制:

$$R_{\text{BOC}}(\tau) = R_c(\tau) \text{sinc}(2f_s \tau) \quad (2)$$

式中,  $R_{\text{BOC}}(\tau)$  为扩频码的自相关函数,  $\text{sinc}(2f_s \tau)$  为副载波的 sinc 包络。该 sinc 函数的周期性过零点导致自相关峰两侧出现多个副峰。BOC 信号的调制阶数通常由比值  $m/n$  表征<sup>[14-15]</sup>, 并直接决定其自相关函数的形状。低阶 BOC 信号 (如 BOC (1, 1)) 的自相关函数副峰数量较少且幅值较低; 而高阶 BOC 信号 (如 BOC (14, 2)) 则呈现出副峰密集、且幅值接近主峰的特征。这一特性使得接收机在捕获过程中极易错误锁定某个副峰, 即产生捕获模糊问题。副峰幅值超过检测阈值的风险随

调制阶数升高而急剧增加, 成为制约高阶 BOC 信号可靠、快速捕获的根本瓶颈, 也凸显了研究具备强副峰抑制能力的新型捕获算法的必要性。

## 2 BOC 调制捕获算法

BOC 信号自相关函数的多峰特性是导致捕获模糊的根本原因。为消除副峰干扰, 实现无模糊捕获, 自相关侧峰消除算法被提出。该算法通过巧妙的信号构造设计有效抑制副峰, 同时保留了 BOC 信号的窄相关峰。

ASPeCT 算法的核心思想在于生成两组特定的本地参考信号, 并通过它们的组合来抵消接收信号中的副峰成分。具体而言, 第一路本地信号为未经调制的原始伪随机码, 记为  $c(t)$ ; 第二路则是用方波副载波  $sc(t)$  调制后的 BOC 信号, 即  $c(t)sc(t)$ 。接收到的信号  $\gamma(t)$  分别与这两路本地信号进行相关运算, 并对结果进行加权差分, 从而构造出一个新的组合相关函数  $R_{ASPeCT}(\tau)$ , 其数学表达式<sup>[16]</sup>如下:

$$R_{ASPeCT}(\tau) = [R_{r,BOC(\tau)}]^2 - \alpha[R_{r,PRN(\tau)}]^2 \quad (3)$$

式中,  $R_{r,BOC(\tau)}$  是接收信号与本地 BOC 信号的相关结果,  $R_{r,PRN(\tau)}$  是接收信号与本地 PRN 码的相关结果。 $\alpha$  是一个可调节的系数, 用于在不同滤波器带宽下优化幅峰消除效果。

ASPeCT 算法实现框图<sup>[17-18]</sup>如图 2 所示。接收到的中频信号经过下变频后, 分为两路进行并行处理: 每一路分别与同相 I 和正交 Q 载波混频, 转换为基带复数信号。随后, 这两路基带信号与本地生成的两路参考信号即 BOC 信号与 PRN 码分别进行频域相关运算, 即计算它们的 FFT, 然后与本地信号 FFT 的共轭相乘, 再作 IFFT。最后, 将得到的两个相关函数结果取平方, 并按上述公式进行加权作差。若最终输出的  $R_{ASPeCT}(\tau)$  产生一个超过预设门限的尖锐主峰, 则表明信号捕获成功, 并可同时获得精确的码相位和载波多普勒频率估计。

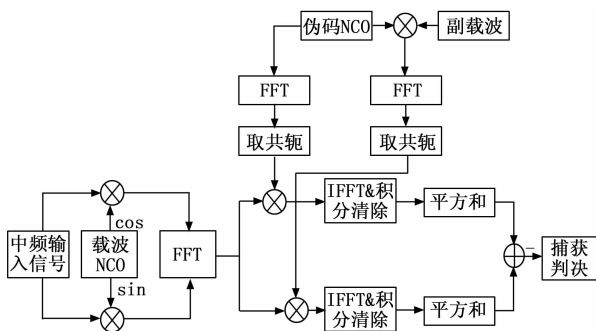


图 2 ASPeCT 算法实现框图

ASPeCT 算法的有效性在很大程度上依赖于一个理想的假设: 通过固定的加权系数  $\alpha$ , 能够完美抵消不同阶数 BOC 信号的所有副峰。其核心原理在于, 通过寻

找一个  $\alpha$  值, 使  $[R_{r,BOC(\tau)}]^2$  与  $\alpha[R_{r,PRN(\tau)}]^2$  的差分运算在所有副峰位置为零。对于 BOC (1, 1) 等低阶信号, 由于其副峰数量有限且幅度较为一致, 存在一个全局最优的  $\alpha$  值, 能够有效抑制多数副峰, 从而生成一个无模糊的陡峭主峰。

然而, 对于高阶 BOC 信号 (如 BOC (14, 2)), 其自相关函数呈现出副峰数量多、距离主峰近且幅值差异显著的复杂结构。从理论上讲, BOC 信号的自相关函数可分解为多个三角形峰的叠加, 其结构由调制阶数  $m, n$  决定。此时, 期望一个固定的  $\alpha$  值来同时满足所有密集副峰的抵消条件, 在数学上相当于求解一个超定系统, 不存在使所有副峰残差为零的唯一解。任何微小的失配都会导致副峰大量残留, 甚至在组合相关函数中引入新的虚假峰值。此外, 高阶调制下会使得两个加权差分运算项的波形差异更大, 使得通过简单线性加权实现全局副峰抵消变得极为困难。

因此, 传统 ASPeCT 算法在处理高阶 BOC 信号时, 其组合相关函数必然存在显著的副峰残留, 甚至可能因主峰劣化而完全失效, 从而丧失无模糊捕获能力。这一固有局限严重制约了其在现代导航系统中的应用, 也凸显了对算法进行改进的必要性。基于此, 对传统 ASPeCT 算法进行改进, 设计了一种对高阶 BOC 信号具有强鲁棒性的新方法。

## 3 捕获算法改进

传统 ASPeCT 算法处理高阶 BOC 信号失效的原因在于其复杂的副峰结构。为解决此问题, 本文引入一种 FFT 均值预处理方法。该方法不仅能够降低运算时的复杂度, 更重要的是, 其均值操作固有的低通滤波特性能够对自相关函数中的尖锐副峰产生平滑作用, 为后续 ASPeCT 处理提供一个可靠的信号, 从根本上提升其对复杂副峰结构的适应性。

### 3.1 FFT 均值预处理方法

在 BOC 调制信号捕获处理中, 传统 FFT 运算面临两大挑战: 一是计算复杂度随采样点数增加而显著增长; 二是当采样点数非 2 的整数次幂时, 运算效率急剧下降。这在实际嵌入式或 FPGA 平台上尤为突出, 严重制约了系统的实时性。

为此, 本文引入 FFT 均值预处理方法<sup>[19]</sup>。该方法通过对原始采样序列进行分段与压缩, 将任意长度的输入序列转换为标准的 2 的整数次幂长度, 为后续高效 FFT 运算奠定基础。具体而言, 设原始信号采样点数为  $N$ , 目标 FFT 点数为  $M$  (如  $M=1024$ )。将原序列均匀划分为  $M$  段, 对每段取算术平均值, 构造出长度为  $M$  的新序列:

$$x_{avg}(k) = \frac{1}{L} \sum_{i=(k-1)L}^{kL-1} x(i), k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (4)$$

式中,  $L$  为每段包含的采样点数, 可根据余数调整以实现均匀分布。

该方法通过低通滤波特性抑制高频噪声与尖锐副峰, 同时将序列规整为标准 FFT 长度, 显著降低运算复杂度。然而, 降采样过程引入的信息损失需要谨慎评估, 如何在此条件下保持捕获灵敏度与可靠性成为该算法实际工程化的核心考虑。

### 3.2 FFT 均值预处理与 ASPeCT 结合粗捕获算法

本文将 FFT 均值预处理模块嵌入 ASPeCT 算法框架, 均值预处理首先通过其固有的低通滤波特性有效抑制输入信号中的高频噪声, 并对自相关函数中的尖锐副峰产生平滑效果, 为后续处理信号打下了坚实的基础。并且可以将任意长度序列智能规整为 2 的整数次幂, 充分利用标准 FFT 模块的计算优势, 显著降低资源消耗与处理延时。经过均值预处理后增强了 ASPeCT 算法对不同调制阶数 BOC 信号的处理效果, 使其在面对高阶 BOC 信号的复杂副峰结构时保持卓越的适应性。基于 FFT 均值法结合 ASPeCT 的粗捕获算法实现框图如图 3 所示, 改进算法在 ASPeCT 前端嵌入 FFT 均值预处理模块。

改进算法的完整处理流程如下:

接收的射频信号经下变频转换为中频信号:

$$s_{IF}(t) = Ad(t)c(t)s_c(t)\cos(2\pi f_{IF}t + \varphi) + n(t) \quad (5)$$

其中:  $A$  为信号幅度,  $d(t)$  为导航数据码,  $c(t)$  为伪随机噪声码,  $s_c(t)$  为副载波,  $f_{IF}$  为中频频率,  $\varphi$  为相位偏移,  $n(t)$  为加性高斯白噪声。

经 ADC 采样得到离散序列  $s_{IF}(n)$  后, 与本地正交载波混频:

$$I(n) = s_{IF}(n)\cos(2\pi\hat{f}_{IF}n + \hat{\varphi}) \quad (6)$$

$$Q(n) = s_{IF}(n)\sin(2\pi\hat{f}_{IF}n + \hat{\varphi}) \quad (7)$$

其中:  $\hat{f}_{IF}$  和  $\hat{\varphi}$  分别为本地载波频率和相位的估计值。

对混频后的 I、Q 双路信号进行均值预处理, 此步骤的目的是将长度为  $N$  的原始序列, 压缩成一个长度为  $M$  的新序列, 同时通过求均值来抑制噪声。理论上, 每段包含  $L = N/M$  点。如果  $N$  不能被  $M$  整除,

则需要通过调整各段长度来处理余数, 确保所有点都被处理且总段数为  $M$ 。对于 I 分支、Q 分支每一段内的  $L$  个数据点求算数平均值, 生成一个新的、长度为  $M$  的序列:

$$I_{avg}(k) = \frac{1}{L_k} \sum_{i=S_k}^{E_k} I(i), k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (8)$$

$$Q_{avg}(k) = \frac{1}{L_k} \sum_{i=S_k}^{E_k} Q(i), k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (9)$$

式中,  $k$  为新序列的索引, 范围从 0 到  $M-1$ ,  $S_k$  是第  $k$  段在原始序列的起始索引,  $E_k$  是第  $k$  段在原始序列的结束索引,  $L_k$  为第  $k$  段包含的原始数据点个数。  $I_{avg}(k)$  和  $Q_{avg}(k)$  为预处理后得到的第  $k$  个 I、Q 分支数据点。

将预处理后的 I、Q 分支进行快速傅里叶变换:

$$I_f(k) = F[I_{avg}(n)] = \sum_{n=0}^{M-1} I_{avg}(n)e^{-j2\pi kn/M}, k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (10)$$

$$Q_f(k) = F[Q_{avg}(n)] = \sum_{n=0}^{M-1} Q_{avg}(n)e^{-j2\pi kn/M}, k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (11)$$

将预处理并 FFT 后的 I、Q 支路合并为一个复频域信号:

$$S_f(k) = I_f(k) + jQ_f(k) \quad (12)$$

式中,  $S_f(k)$  就是接收到的中频信号经过下变频和预处理后的复频域表示。

于此同时, 接收机生成长度为  $N$  (与接收信号采样点数对应) 的本地伪随机码离散序列  $c_{local}(i), i = 0, 1, \dots, N-1$ 。其中  $c_{local}(i)$  是第  $i$  个点的本地 PRN 码值, 取值为 +1 或 -1。

将本地 PRN 码与一个同频同相的方波副载波相乘, 生成 BOC 调制信号:

$$Boc_{local}(i) = c_{local}(i)s_c(i) \quad (13)$$

式中,  $s_c(i)$  是第  $i$  个点的方波副载波值, 同样取值为 +1 或 -1。其符号变化频率由 BOC 调制类型决定。

然后对本地信号进行相同的均值预处理, 此步骤与对接收信号  $I(n)$  和  $Q(n)$  的完全一致, 目的是保证两个通道在数据维度和特性上对齐。将长度为  $N$  的本地 BOC 序列  $Boc_{local}(i)$  分成  $M$  段, 对每一段求算术平均值, 得到长度为  $M$  的新序列  $Boc_{avg}(m)$ :

$$Boc_{avg}(m) = \frac{1}{L_m} \sum_{i=S_m}^{E_m} Boc_{local}(i), m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (14)$$

式中, 参数  $L_m, S_m, E_m$  的定义与接收信号预处理环节中的完全相同, 以确保分段对齐。

同样地, 将长度为  $N$  的本地 BOC 序

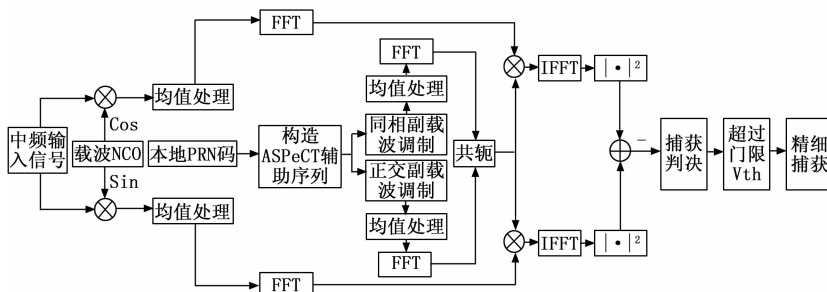


图 3 FFT 均值法结合 ASPeCT 的粗捕获算法实现框图

列  $c_{\text{local}}(i)$  分成  $M$  段。对每一段求算术平均值,得到长度为  $M$  的新序列  $c_{\text{avg}}(m)$ :

$$c_{\text{avg}}(m) = \frac{1}{L_m} \sum_{i=S_m}^{E_m} c_{\text{local}}(i), m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (15)$$

将预处理后的本地时域信号转化到频域,为后续的频域相关处理做准备。对序列  $Boc_{\text{avg}}(m)$  进行  $M$  点 FFT:

$$BOC_f(k) = F[Boc_{\text{avg}}(m)] = \sum_{m=0}^{M-1} Boc_{\text{avg}}(m) e^{-j2\pi km/M}, k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (16)$$

式中,  $BOC_f(k)$  是一个复数,表示本地 BOC 信号在第  $k$  个频点上的频域复数值。

然后对序列  $c_{\text{avg}}(k)$  进行  $M$  点 FFT:

$$PRN_f(k) = F[c_{\text{avg}}(m)] = \sum_{m=0}^{M-1} c_{\text{avg}}(m) e^{-j2\pi km/M}, k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (17)$$

最后在频域完成 ASPeCT 的核心运算:

$$P_{\text{ASPeCT}}(k) = | \text{IFFT}[S_f(k) \overline{BOC_f(k)}] |^2 - \alpha | \text{IFFT}[S_f(k) \overline{PRN_f(k)}] |^2 \quad (18)$$

式中,  $\overline{BOC_f(k)}$  和  $\overline{PRN_f(k)}$  分别为对应频域信号的复共轭,  $\alpha$  为可调节的副峰抑制系数。

然后搜索  $P_{\text{ASPeCT}}(k)$  的最大值即  $P_{\text{max}}(k)$  进行粗捕获判决,若该最大值  $P_{\text{max}}(k)$  超过预设的捕获门限  $V_{\text{th}}$ ,则判定粗捕获成功<sup>[20]</sup>。预处理通过频域副峰抑制与信号规整,突破传统 ASPeCT 固定加权系数局限,提升对高阶 BOC 信号的适应性。此时,记录下峰值对应的位置,并输出粗捕获参数:码相位估计值  $\tau_{\text{corase}}$  和多普勒频移估计值  $f_{\text{corase}}$ 。这两个参数构成了信号的初始估计,其精度在一个码元之内,为后续的精捕获阶段提供了至关重要的搜索起点。

### 3.3 FFT 均值预处理与 ASPeCT 结合精细捕获算法

随后,流程进入精捕获阶段,在此阶段将进一步提升参数码相位估计值  $\tau_{\text{corase}}$  和多普勒频移估计值  $f_{\text{corase}}$  的估计精度,FFT 均值法结合 ASPeCT 的精捕获算法实现框图如图 4 所示。

利用粗捕获获得的多普勒频移估计值  $f_{\text{corase}}$ ,对原始中频信号  $s_{\text{IF}}(n)$  进行精细的频偏补偿,得到残余频偏更小的信号  $s_{\text{comp}}(n)$ :

$$s_{\text{comp}}(n) = s_{\text{IF}}(n) e^{-j2\pi(f_w - f_{\text{corase}})nT}. \quad (19)$$

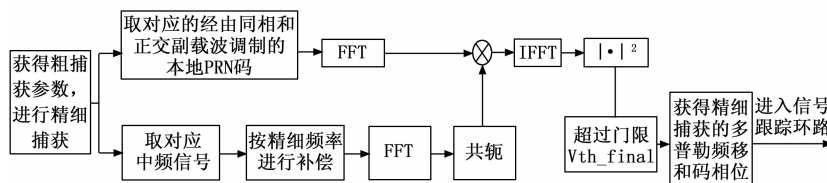


图 4 FFT 均值法结合 ASPeCT 的精捕获算法实现框图

式中,  $s_{\text{IF}}$  为原始中频信号,  $f_{\text{corase}}$  为多普勒频移估计值,  $T_s$  为采样间隔。

同时生成与粗码相位  $\tau_{\text{corase}}$  对齐的本地精确 BOC 信号。考虑到副载波的影响,本地信号需在同相与正交两支路上分别调制:

$$I_{\text{local}}(n) = c_{\text{local}}(n - \tau_{\text{corase}}) \text{sgn}[\sin(2\pi f_{\text{sc}} t)] \quad (20)$$

式中,  $I_{\text{local}}(n)$  为本地同相支路信号,  $\tau_{\text{corase}}$  为码相位估计值。

$$Q_{\text{local}}(n) = c_{\text{local}}(n - \tau_{\text{corase}}) \text{sgn}[\cos(2\pi f_{\text{sc}} t)] \quad (21)$$

式中,  $Q_{\text{local}}(n)$  为本地正交支路信号,  $\tau_{\text{corase}}$  为码相位估计值。

将频率补偿后的信号  $s_{\text{comp}}(n)$  与两支路本地信号分别转换到频域并进行共轭相乘,完成频域相关:

$$Corr_I(k) = F[s_{\text{comp}}(n)] \overline{\{F[I_{\text{local}}(n)]\}} \quad (22)$$

式中,  $Corr_I(k)$  代表同相支路本地信号进行频域相关的结果:

$$Corr_Q(k) = F[s_{\text{comp}}(n)] \overline{\{F[Q_{\text{local}}(n)]\}} \quad (23)$$

式中,  $Corr_Q(k)$  代表正交支路本地信号进行频域相关的结果。

将频域相关结果换回时域,并计算其模的平方,得到最终的精捕获相关输出:

$$P_{\text{final}} = | \text{IFFT}[Corr_I(k)] |^2 + | \text{IFFT}[Corr_Q(k)] |^2 \quad (24)$$

式中,  $P_{\text{final}}$  为精捕获的最终相关输出。

最后,搜索  $P_{\text{final}}$  的峰值。若超过预设的精捕获门限,则判定精细捕获成功,此时峰值对应的位置和频率即为码相位与多普勒频移,随后信号进入跟踪环路进行下一步骤的处理。

### 3.4 检测概率数学模型

最后为从理论上分析本文改进算法的捕获性能,并预测其在不同信噪比条件下的检测概率<sup>[21]</sup>,本文建立了一个数学模型。检测概率  $P_D$  是衡量捕获算法性能的关键指标。本文基于 FFT 均值预处理与 ASPeCT 算法相结合的架构,建立了能够准确反映捕获概率随载噪比变化的数学模型。本文采用改进的 Q 函数形式来描述检测概率  $P_D$ ,推导过程如下。

首先总处理增益由 3 个主要分量组成:

$$G_{\text{total}} = G_{\text{FFT}} + G_{\text{mean}} + G_{\text{ASPeCT}} \quad (25)$$

FFT 处理增益  $G_{\text{FFT}}$  为  $G_{\text{FFT}}$ :

$$G_{\text{FFT}} = 10 \log_{10} M \quad (26)$$

式中,  $M$  为 FFT 点数,即预处理后的序列长度,满足  $M=2^k$ ,该增益体现了频域相干积累对信噪比的提升作用。

均值处理增益为  $G_{\text{mean}}$ :

$$G_{\text{mean}} = 10 \log_{10} (N/M) \quad (27)$$

式中,  $N$  为原始序列总采样点数,  $M$  为预

处理后的序列长度，该增益通过时域平均有效抑制高频噪声。

ASPeCT 算法的增益为  $G_{ASPeCT}$ ：

$$G_{ASPeCT} = 10\log_{10}(\kappa\alpha\beta) \quad (28)$$

式中， $\kappa$  为副峰抑制系数， $\alpha$  为 BOC 调制适应性因子， $\beta$  为算法稳健性因子，共同增强了算法对复杂信号的适应能力。

综上所述增益，有效信噪比  $\gamma_{eff}$  可表示为：

$$\gamma_{eff} = \left(\frac{C}{N_0}\right) T_{coh} (G_{FFT} + G_{mean} + G_{ASPeCT}) \quad (29)$$

式中， $T_{coh}$  为相干积分时间， $\gamma_{eff}$  量化了算法对信号质量的整体提升。

进一步推导，检测统计量的波动特性由标准差函数描述：

$$\sigma\left(\frac{C}{N_0}\right) = \frac{\sigma_0}{\sqrt{1 + \eta\gamma_{eff}}} \quad (30)$$

式中， $\sigma_0$  为基础噪声标准差， $\eta$  为噪声抑制因子，反映了算法对噪声的抑制效果。

同时，相关峰值随载噪比的变化规律由均值函数表示：

$$\mu\left(\frac{C}{N_0}\right) = A[1 - \exp(-\beta\gamma_{eff})] + \mu_0 \quad (31)$$

式中， $A$  为最大相关峰幅度， $\beta$  为信噪比增长速率参数， $\mu_0$  为噪声基底均值。

最终，检测概率  $P_D$  通过改进的  $Q$  函数形式定义：

$$P_D\left(\frac{C}{N_0}\right) = 1 - Q\left(\frac{V_T - \mu\left(\frac{C}{N_0}\right)}{\sigma\left(\frac{C}{N_0}\right)}\right) \quad (32)$$

式中， $V_T$  为检测阈值。其中  $Q$  函数为标准正态分布的右尾概率函数，定义为：

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt \quad (33)$$

式中， $x$  为  $Q$  函数的自变量，是一个阈值或分界点， $t$  代表标准正态分布随机变量中所有可能的取值。

该数学模型通过整合各算法模块的增益，量化了 FFT 均值预处理对信号质量的优化作用，并准确刻画了检测概率随载噪比增加的增长特性。从数学理论方面分析，本文算法可以在中低信噪比区间展现出比传统 ASPeCT 方法更优的检测性能，这为第 4 节的仿真实验与性能对比提供了坚实的理论依据和分析基础。

## 4 仿真与分析

### 4.1 改进算法捕获精度与捕获效率分析

为检验本文所提改进 ASPeCT 算法的实际性能，在 Matlab 仿真环境中搭建了 BOC 信号捕获仿真系统。相关仿真参数设置如下：中频信号频率设为 20 MHz，伪码长度为 2 046 码片，采样频率取 80 MHz，非相干

积分时长为 1 500 ms。预设多普勒频移为 5 500 Hz，搜索区间设定为  $[-15 \text{ kHz}, 15 \text{ kHz}]$ ，搜索步进为 500 Hz；码相位延迟预设第 620 个采样点。

在上述仿真条件下，改进算法实现了对 BOC 高阶信号的快速且精确捕获。图 5 为改进算法对 BOC (14, 2) 的三维捕获结果，可见在码相位—多普勒频率—相关值空间中呈现唯一尖锐主峰。该主峰对应的码相位为 620 采样点，多普勒频率值为 5 500 Hz，与预设仿真参数完全一致，验证了算法的准确性。进一步从相关输出图 8 分析可见，改进算法输出的主峰呈尖锐状态，其基底跨度约为 5 个采样间隔，而 3 dB 带宽仅为 1.2 个采样间隔，且副峰峰值远低于检测门限。这一结果表明：主峰能量高度集中，具有优异的时频分辨能力；同时主峰形态完整、边界清晰，为码相位估计提供了可靠数据。说明改进算法能够精确无模糊捕获高阶 BOC 信号，证明了本文算法的正确性与可靠性。

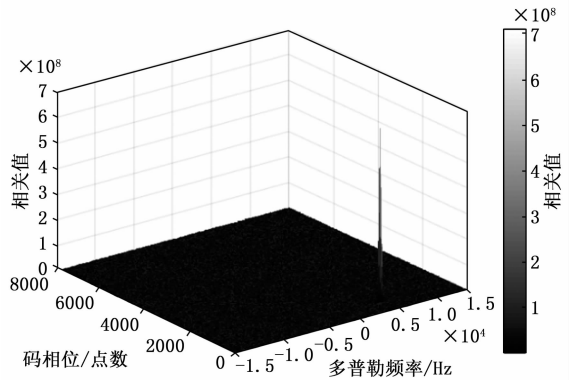


图 5 改进算法 3 维捕获 BOC (14, 2) 结果图

从计算复杂度理论层面分析，可以很好地解释本文算法在捕获效率上的优势。在信号捕获过程中，算法耗时即捕获算法耗时，主要由 FFT/IFFT 等核心运算决定。在保证性能的同时，将必要的 FFT/IFFT 运算次数控制在 4 次，表 1 对比了不同算法的理论运算复杂度与实测捕获时间。

表 1 算法捕获时间对比

算法类型	FFT/IFFT 运算量	平均捕获时间/ms
BPSK-like 算法	$2O(N\log_2 N)$	359
传统 ASPeCT 算法	$4O(N\log_2 N)$	425
本文改进算法	$4O(M\log_2 M)$	276

在捕获效率方面，由表 1 可知，传统 ASPeCT 算法的复杂度为  $4O(N\log_2 N)$ ，而本文改进算法通过预处理将序列长度从  $N$  压缩到  $M$ ，满足  $N < M$ 。本文算法平均捕获时间为 276 ms，传统 ASPeCT 算法的平均捕获时间为 425 ms，改进算法较传统 ASPeCT 算法捕获效率提升约 35%。表 1 的实验结果表明，本文算法在捕获效率上相较于传统算法表现出显著优势。

### 4.2 不同类型 BOC 信号去副峰效果对比分析

为检验算法对不同调制阶数 BOC 信号的普适性, 在 -30 dB 的相同信噪比条件下, 分别对 BOC (1, 1) 与 BOC (14, 2) 与 BOC (15, 2.5) 信号进行了测试。

如图 6 所示, 对于低阶 BOC (1, 1) 信号, 算法能完全消除副峰, 仅保留单一陡峭主峰。面对高阶 BOC 信号 (见图 7 与图 8), 算法同样表现出优异的副峰抑制能力。尽管 BOC (15, 2.5) 信号与 BOC (14, 2) 信号的自相关函数副峰结构极为复杂, 本文算法仍能有效消除其所有副峰, 仅保留一个清晰的主峰, 证明了其对高阶 BOC 调制信号的强大适应性, 从根本上避免了因误锁副峰而导致的捕获模糊问题。

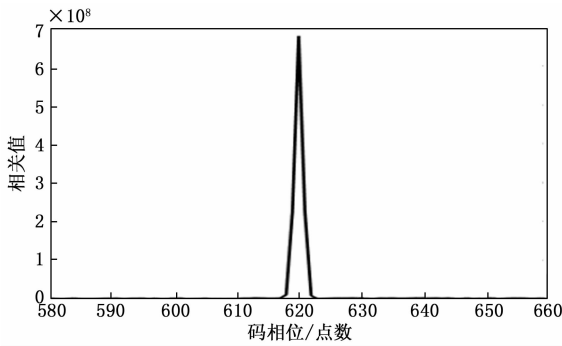


图 6 BOC (1, 1) 去副峰效果图

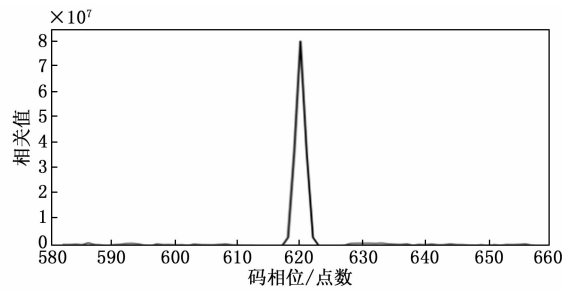


图 7 BOC (15, 2.5) 去副峰效果图

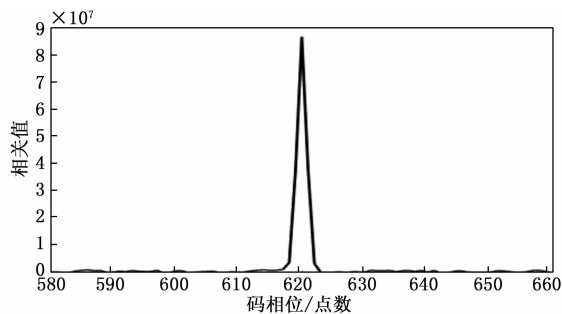


图 8 BOC (14, 2) 去副峰效果图

### 4.3 与传统算法去副峰效果对比分析

将本文算法与传统 ASPeCT 算法在相同仿真条件下进行对比。如图 9~11 所示, 传统 ASPeCT 算法在处理其擅长的低阶 BOC (1, 1) 信号时, 能有效抑制副峰; 然而, 当其面对高阶 BOC (15, 2.5) 信号和高阶 BOC (14, 2) 信号时, 正如第 2 节理论分析所预期,

其副峰抑制能力严重恶化, 处理后残留大量副峰, 无法实现无模糊捕获。

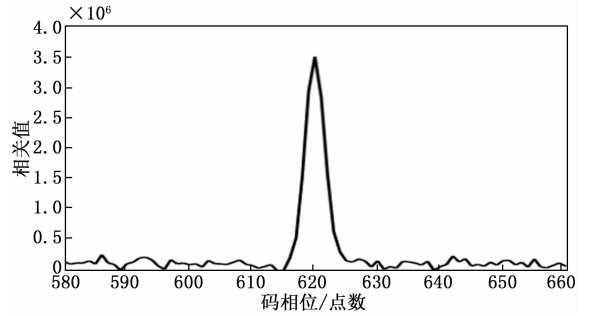


图 9 传统 ASPeCT 对 BOC (1, 1) 的处理效果图

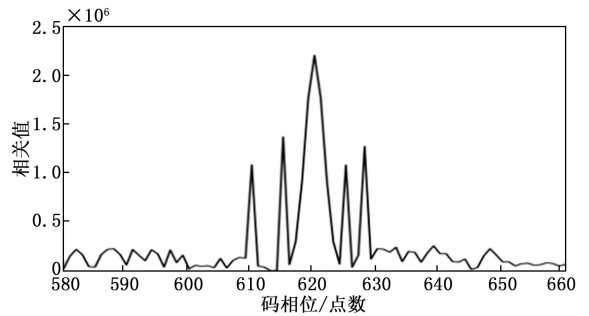


图 10 传统 ASPeCT 算法对 BOC (15, 2.5) 的处理效果图

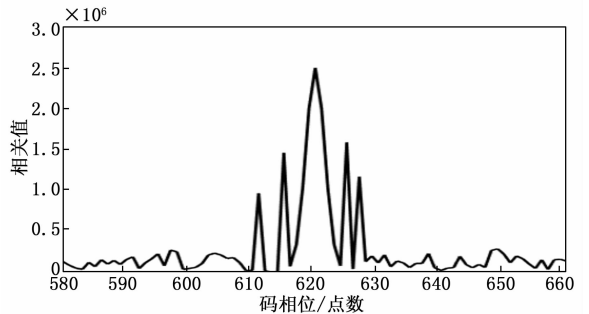


图 11 传统 ASPeCT 算法对 BOC (14, 2) 的处理效果图

为定量验证改进算法在副峰抑制性能上提升的统计显著性, 本文在相同仿真条件下, 对两种算法各进行 100 次独立蒙特卡洛实验<sup>[22]</sup>, 记录每次实验中的主副峰比 (PSR) 作为关键性能指标。主副峰比的公式如下:

$$PSR = 20 \times \log_{10} \left( \frac{A_{\text{main}}}{A_{\text{side}}} \right) \quad (34)$$

式中,  $A_{\text{main}}$  为主峰副值,  $A_{\text{side}}$  为副峰最大副值。统计分析结果如表 2 所示。

表 2 副峰抑制性能对比

算法类型	处理信号类型	平均 PSR/dB	标准差/dB
传统 ASPeCT 算法	BOC(14,2)	8.6	1.4
改进算法	BOC(14,2)	17.5	0.8
改进算法	BOC(15.2.5)	16.7	0.9

根据表 2 的数据采用双样本  $t$  检验，其中双样本  $t$  检验的统计量计算公式为：

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (35)$$

式中， $\bar{X}_1$  代表第一组样本的均值， $\bar{X}_2$  代表第二组样本的均值， $S_p$  为合并标准差， $n_1$  代表第一组样本的容量， $n_2$  代表第二组样本的容量。

其中合并标准差  $S_p$  的计算公式为：

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (36)$$

式中， $S_1$  代表第一组样本的标准差， $S_2$  代表第二组样本的标准差， $n_1$  和  $n_2$  为自由度。

基于表 2 数据对传统算法与改进算法处理处理 BOC (14, 2) 信号的结果进行双样本  $t$  检验。设显著性水平  $\alpha = 0.05$ ，计算得到  $t$  统计值为 58.2，其对应  $p$  值小于 0.000 1。

检验结果表明：改进算法与传统算法在副峰抑制性能上的差异具有高度统计显著性 ( $p < 0.000 1$ )，该差异由算法改进所致而非随机因素。结合表 2 数据，改进算法在处理 BOC (14, 2) 信号时平均 PSR 达 17.5 dB，较传统算法的 8.6 dB 提升超过 100%；在处理 BOC (15, 2.5) 信号时仍能保持 16.7 dB 的平均 PSR，展现出对复杂调制信号的强适应性。同时，改进算法在不同信号条件下的标准差均低于 0.9 dB，显著优于传统算法的 1.4 dB，证明本文算法在显著提升副峰抑制能力的同时具有更优的稳定性和鲁棒性。

#### 4.4 FFT 预处理结合 ASPeCT 算法性能分析

为定量评估算法检测概率性能，本节基于第 3.4 节建立的数学模型进行仿真验证。鉴于改进算法在处理 BOC (14, 2) 与 BOC (15, 2.5) 信号时表现出近乎一致的检测概率曲线，二者性能差异可忽略，因此选取 BOC (14, 2) 作为高阶调制信号的典型代表，在相同仿真环境下，将本文改进算法与传统 ASPeCT 算法的检测概率进行对比，结果如图 12 所示。

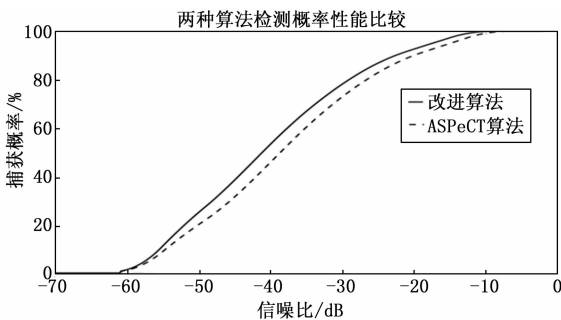


图 12 两种算法检测概率对比

图 12 仿真结果表明，随着信噪比提升，两种算法

的检测概率均随之上升。从整体趋势看，本文算法捕获高阶 BOC (14, 2) 信号时在  $-70 \sim 0$  dB 的信噪比范围内表现出更优的检测性能。具体分析图中数据可以发现：在  $-70 \sim -62$  dB 的极低信噪比区间和  $-5 \sim 0$  dB 的较高信噪比区间，两种算法的检测概率基本一致；而在  $-62 \sim -5$  dB 这一关键的中低信噪比区间，本文的检测概率显著优于传统方法，达到相同检测概率时所需信噪比平均降低约 2~3 dB。这一特点表明改进算法在大部分信道环境中具有可靠的捕获能力，验证了 FFT 预处理对信号质量的优化效果。

综合本章所有实验，捕获精度、捕获效率、副峰抑制的效果、检测概率四个指标充分验证了本文算法的优越性，该算法有效解决了传统 ASPeCT 算法在高阶 BOC 信号面前适应性差的关键瓶颈，为高阶 BOC 调制在下一代 GNSS 系统中的可靠应用提供了坚实的技术支撑。

#### 5 结束语

本文针对二进制偏移载波 BOC 调制信号，特别是高阶调制下因自相关函数多峰特性所导致的捕获模糊与效率低下问题，进行了深入研究。传统 ASPeCT 算法虽能有效处理低阶 BOC 信号，但在面对高阶 BOC 信号时，其副峰抑制能力显著下降，适应性不足。

本文提出基于 FFT 均值预处理与 ASPeCT 融合的综合捕获优化方法，通过“预处理—捕获”协同框架，从频域抑制高阶 BOC 密集副峰，突破固定加权系数局限。

理论分析 Matlab 仿真结果共同表明：改进算法均能实现低阶 BOC 信号与高阶 BOC 信号的精准捕获，捕获效率较传统算法提升约 35%，有效消除了高阶 BOC 信号的副峰干扰，具备优异的副峰抑制能力和主峰识别能力。在  $-62 \sim -5$  dB 的信噪比区间内，改进算法与传统 ASPeCT 算法相比，达到相同检测概率所需信噪比平均降低约 2~3 dB，验证了改进算法在低信噪比环境下处理高阶 BOC 信号的有效性。

未来的工作将进一步聚焦优化算法在低信噪比场景下的应用，并完成改进算法在 DSP、FPGA 等平台上的硬件部署。

#### 参考文献：

[1] 宋少杰. BOC 体制下导航信号捕获与跟踪算法研究 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.  
 [2] 许磊, 何巍巍, 赵胜. BOC 调制导航信号的精确捕获方法研究 [J]. 无线电工程, 2015, 45 (12): 36-39.  
 [3] JI Y F, CHEN X Q, FU Q, et al. Reconstruction of sub cross-correlation cancellation technique for unambiguous acquisition of BOC (kn, n) signals [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2019, 30 (5): 852-860.

(下转第 226 页)