

基于 PMF-FFT 的 Ka 宽带动态导航 增强信号捕获算法

刘奕宸, 王振岭

(中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 利用低轨卫星实现导航增强是通导融合的一种必然趋势, Ka 频段在此场景具有显著优势, 但基于该频段的通导融合增强信号具有大带宽、高动态特性, 对信号的高效捕获提出了挑战; 通过对 Ka 信号特性的针对性分析, 提出了一种改进的二级 PMF-FFT 捕获算法; 仿真结果表明, 在给定信噪比条件下, 改进的 PMF-FFT 算法对 Ka 信号的捕获性能始终优于传统算法, 相关峰值幅度较传统算法提升 17.1%; 多普勒测量误差降至 1.25 kHz, 可以为后续的精密跟踪和伪距测量处理奠定基础; 同时, 该算法有效地平衡了捕获增益与运算效率, 可以用于低轨 Ka 频段导航增强系统信号的高效捕获与接收处理。

关键词: Ka 频段; PMF-FFT; 导航增强; 信号捕获; 高动态信号

An Acquisition Algorithm for Ka-Band Wideband Dynamic Navigation Augmentation Signal Based on PMF-FFT

LIU Yichen, WANG Zhenling

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

Abstract: Using low-orbit satellites to achieve navigation augmentation is an inevitable trend in the integration of communication and navigation. The Ka-band has significant advantages in this scenario, but the integrated communication-navigation augmentation signals based on this band feature large bandwidth and high dynamics, which pose challenges to the efficient acquisition of signals. Through targeted analysis of the characteristics of Ka-band signals, an improved two-stage Partial Matched Filter-Fast Fourier Transform (PMF-FFT) acquisition algorithm is proposed. Simulation results show that under a given signal-to-noise ratio (SNR), the acquisition performance of the improved PMF-FFT algorithm for Ka-band signals is always superior to that of the traditional algorithm; the amplitude of the correlation peak is increased by 17.1% compared with the traditional algorithm, and the Doppler measurement error is reduced to 1.25 kHz. This can lay a foundation for subsequent precise tracking and pseudorange measurement processing. Meanwhile, the algorithm effectively balances acquisition gain and computational efficiency, and can be used for efficient acquisition and reception processing of signals in low-orbit Ka-band navigation augmentation systems.

Keywords: Ka-band; PMF-FFT; navigation augmentation; signal acquisition; high-dynamic signal

0 引言

随着低轨星座的技术发展, 以及对通信和导航功能的需求越发多样化, 通导融合技术已成为了重要的发展趋势。Ka 频段作为其中的可用频段之一, 与传统的 C 频段和 L 频段相比, 具有更高的定位精度、天线增益

等诸多显著优势^[1]。然而, 有低轨卫星发射的 Ka 频段导航增强信号兼顾通信和导航, 其突出的大带宽、高动态的特点也使得传统的捕获算法在信号捕获时面临诸多困难。例如利用滑动式相关器实现串行搜索捕获方法^[2], 虽然实现结构简单, 但面对新背景下的大带宽信号, 其较低的搜索速度导致其早已不再适用。利用快速

收稿日期: 2025-10-14; 修回日期: 2025-11-15。

作者简介: 刘奕宸(2000-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 王振岭(1975-), 男, 硕士, 研究员, 硕士生导师。

引用格式: 刘奕宸, 王振岭. 基于 PMF-FFT 的 Ka 宽带动态导航增强信号捕获算法[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(2): 143-150.

傅里叶变换 (FFT, fast fourier transform) 对频率进行并行搜索的捕获算法^[3]虽然提高了捕获效率, 但直接对信号采样结果进行 FFT 运算导致了搜索频率范围的无效部分过多, 浪费了运算资源^[4]。文献 [5] 提出了利用匹配滤波器在时域上进行并行捕获的算法, 但该方法需要很大硬件资源, 不适合小型化用户终端使用。

针对越来越多的新信号体制, 很多高效准确的算法被提出。文献 [6] 提出了基-4FFT 循环相关法, 该方法通过将序列分解成更短的子序列来提升 FFT 的速度。文献 [7] 提出了将匹配滤波器与快速傅里叶变换相结合的捕获算法, 可以实现对信号的快速处理, 并且与传统算法相比更节省硬件资源, 但是仍有可以优化的空间。在此算法的基础上进行加窗函数来减少相关损失是一种改进的方法^[8-9], 有利于捕获拥有复杂频率分量的信号。针对低信噪比和大频差环境, 利用对频率搜索范围进行分割, 匹配滤波器与快速傅里叶变换结合算法 (PMF-FFT, partial matched filter-fast fourier transform) 可以有效积累信号能量, 满足直接序列扩频信号的采集需求^[10]。文献 [11] 针对北斗信号接收时遇到的问题, 提出了一种二进制偏移载波调制 (BOC, binary offset carrier) 信号采集技术, 为北斗导航信号捕获提供了新思路。

在通导融合的技术体系中, 高精度时空基准是通导融合的核心需求。通过对多颗卫星伪距信息的计算, 可以为通导融合体系的时间同步和位置定位提供高精度的基准, 所以, 伪距计算是支撑融合功能实现的基础环节, 而进行伪距计算需要在捕获中获得准确的初始时延测量。信号捕获是实现导航增强信号的首要环节, 其目的是快速、准确地检测到卫星信号, 并初步获取信号的载波频率和伪码相位等参数, 为后续跟踪、解调、测距提供粗同步。所以, 捕获性能的优劣直接影响着接收设备的处理效能的发挥。目前, 针对低轨卫星体制下 Ka 频段信号的捕获算法研究较少, 现有的捕获算法在此场景下的适用与否也有待验证。因此, 研究适用于 Ka 信号的高效捕获算法具有重要的理论意义和实际应用价值。

通过对传统 PMF-FFT 算法进行改进, 提出了一种二级捕获算法, 旨在解决传统捕获算法针对 Ka 信号捕获方面的不足。通过选取合适的算法参数, 并对 FFT 扇贝损失进行有效补偿, 该捕获算法在拓宽多普勒频率检测范围的同时, 进一步提升了信号增益, 为 Ka 频段卫星导航系统的发展提供技术支持。

1 Ka 导航增强信号体制分析

Ka 频段作为卫星通信与导航领域的重要频段, 其频率范围通常界定为 26.5~40 GHz, 凭借高频段特性具备带宽资源充沛、抗电磁干扰能力强的天然优势, 是

支撑高精度导航系统发展的关键信号载体。在低轨卫星导航应用场景中, 受低轨卫星运行速度快、与地面接收机相对运动变化剧烈的影响, Ka 频段信号在传输过程中会产生显著的多普勒频偏, 其多普勒动态范围可达到 ± 400 kHz, 这一参数对信号捕获的动态适应性提出了更高技术要求。

参考常规设计选择 Ka 频段信号携带的信息符号速率为 2 000 SPS, 使用直接序列扩频法 (DSSS, direct sequence spread spectrum) 进行调制, 扩频码的码速率为 100 MHz, 经过扩频后, 信号带宽 200 MHz, 扩频比 50 000, 远超传统频段的带宽大小。Ka 信号使用直接序列扩频调制方式将信号的带宽扩展至 200 MHz。直接序列扩频调制的实现机制为: 将扩频码与待传输数据序列进行直接时域相乘, 且在单个扩频码周期内数据符号保持相位稳定。根据傅里叶变换的时域乘积性质, 该操作在频域等价于信号频谱与扩频码频谱的卷积运算, 从而实现信号带宽扩展。其中, 单个数据符号所包含的码片数量定义为扩频比, 是衡量扩频系统性能的关键参数。

信号每比特中包含 5 个伪码周期的扩频码, 每个码周期由 10 000 个码片组成。由信号格式体制可知, 每比特导航信息持续 0.5 ms, 每个码周期长 0.1 ms, 每个码片长 10 ns。Ka 信号的宽频带特性可显著提高信号的时间分辨率, 为伪距测量的精度提升奠定基础, 尤其在低轨卫星导航系统中, 大带宽能有效抵消部分高动态带来的测量误差, 增强伪距解算的稳定性。此外, 其高频特性使其天线尺寸更小、指向性更强, 可降低地面接收系统的体积与功耗, 进一步适配低轨卫星导航系统的工程化应用需求, 成为当前低轨导航增强系统优选的信号体制之一。

2 经典 PMF-FFT 算法及其扇贝损失

PMF-FFT 算法, 即部分匹配滤波器 (PMF, partial matched filter) 与快速傅里叶变换 (FFT, fast fourier transform) 相结合的算法, 其核心在于通过分段匹配滤波对输入信号进行预处理, 增强信号能量, 再利用快速傅里叶变换对 PMF 的输出进行频域分析, 从而实现信号的高效捕获。PMF-FFT 捕获算法原理如图 1 所示。

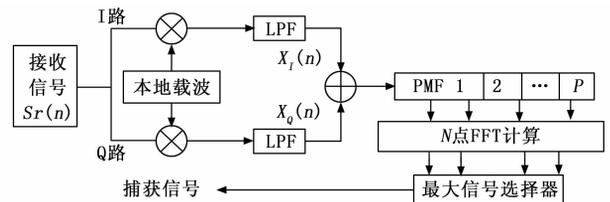


图 1 PMF-FFT 捕获算法原理图

图中, 将采样信号序列分成 P 个等长的段, 每段

长为 X 。每段输入相应的 PMF 中进行部分相关运算, 每段采样信号与对应的本地伪码段进行相乘累加操作, 输出 P 个相关值。这种分段处理的方式使得算法能够在不完全匹配整个伪码序列的情况下, 快速检测出信号的相关性, 大幅降低了计算复杂度。得到 P 个部分相关结果后, 进行 N 点 FFT。通过 FFT 运算, 将时域的码相位相关结果转换为频域的多普勒频偏分布, 从而完成对多普勒频偏的搜索。在频域中寻找最大功率峰值, 一旦检测到超过设定的门限值, 即可判定捕获成功, 输出相应的同步参数。若结果小于门限, 则将采样的信号序列继续移位进行捕获。

PMF-FFT 捕获算法的归一化幅频响应^[12]为:

$$G(f_d, n) = \frac{1}{XP} \left| \frac{\sin(\pi f_d X T_c)}{\sin(\pi f_d T_c)} \frac{\sin(\pi f_d X P T_c - \pi P \frac{n}{N})}{\sin(\pi f_d X T_c - \pi \frac{n}{N})} \right| \quad (1)$$

其中: $n=1, 2, \dots, N$, f_d 为载波多普勒频率, T_c 代表码片宽度。

式 (1) 可以拆解为 PMF 部分和 FFT 部分分别进行分析^[13], 令:

$$G_{\text{PMF}}(f_d) = \frac{1}{X} \left| \frac{\sin(\pi f_d X T_c)}{\sin(\pi f_d T_c)} \right| \quad (2)$$

$$G_{\text{FFT}}(f_d, n) = \frac{1}{P} \left| \frac{\sin(\pi f_d X P T_c - \pi P \frac{n}{N})}{\sin(\pi f_d X T_c - \pi \frac{n}{N})} \right| \quad (3)$$

式 (2) 是由 PMF 引起的幅频响应, 式 (3) 是 FFT 对应的幅频响应。根据前述 Ka 信号的特点, 设置频率的范围是 $0 \sim 400$ kHz, 部分匹配滤波器长度为 313, 分段数和 FFT 点数为 32。根据式 (1) PMF-FFT 归一化幅频响应的仿真如图 2 所示。

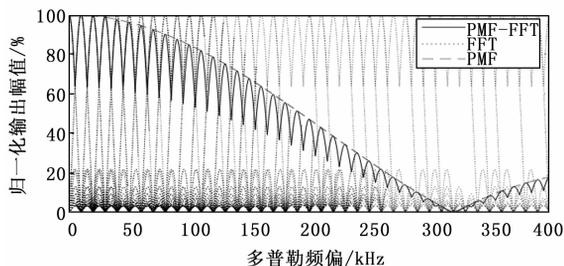


图 2 PMF-FFT 归一化幅频响应

其中: 实线对应 $G_{\text{FFT-PMF}}(f_d, n)$ 的幅频响应曲线, 虚线对应 $G_{\text{PMF}}(f_d)$ 的幅频曲线, 点线对应 $G_{\text{FFT}}(f_d, n)$ 的幅频曲线。

由图 2 可以看出, $G_{\text{PMF}}(f_d)$ 决定了捕获算法的幅频响应包络, 当多普勒频偏越大, 相应的输出结果损耗越大; $G_{\text{FFT}}(f_d, n)$ 决定了捕获算法的内部衰落, 由于 FFT 运算中相位补偿不完全^[14], 当实际多普勒频偏处于两个

FFT 频点之间, 也就是当 $f_d X T_c N$ 不为整数时, 该多普勒频偏对应的峰值输出会周期性下降, 即扇贝损失。

3 改进的二级 PMF-FFT 算法

3.1 算法架构与流程

如图 3 所示, 改进的二级 PMF-FFT 算法将捕获过程分为粗捕和精捕两级。其中, 一级 PMF-FFT 捕获实现对 Ka 信号的粗捕, 获得 Ka 信号的多普勒频偏和码相位信息, 利用粗捕信息对码搜索范围和载波频率进行调整, 再进行二级 PMF-FFT 精捕, 最终的结果进行判断是否捕获成功。在粗捕过程中, 既能满足对 Ka 信号多普勒动态范围的检测需求, 又尽可能地减少运算量。在精捕中利用粗捕信息缩小了搜索范围, 同时经过补偿可以得到更高的增益。

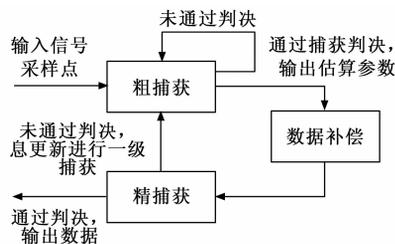


图 3 改进算法流程图

由于 Ka 信号的数据传输速率很高, 即使改进型 PMF-FFT 算法选择计算量较小的方式进行捕获处理, 但在输出捕获结果时仍然面临着码相位结果输出存在滞后性的问题。为此, 通过在捕获流程起始阶段引入时间戳机制, 精确记录各阶段处理耗时, 对耗时、多普勒估计值和伪码速率参数结合计算, 进而对滞后效应引发的码相位偏差进行有效补偿, 保障捕获结果的时效性与准确性。粗捕结束时, 补偿模块进行耗时计算, 根据码相位的输出结果、多普勒频率偏移估算当前码速率, 再结合捕获耗时得出实时的码相位。利用补偿模块计算出的码相位调整精捕获的码生成器的相位, 精捕获将以估算码相位为中心生成延迟和超前码相位的本地伪码。由于已经对接收信号码相位进行了估计, 精捕获只搜索小范围的码相位即可, 因此达到了缩小搜索范围的目的。同时粗捕输出的多普勒频率偏移也会用于调整本地振荡器的频率。

3.2 捕获参数选择

一级捕获的目的是对 Ka 信号进行初步信息获取, 为二级捕获提供补偿信息, 可以适当降低频率分辨率以提升处理速度。离散信号的频率分辨率由采样时间直接决定, 即 $\Delta f = 1/T_s$, 式中 T_s 为采样时长。由此可见, 频率分辨率越高, 所需采样时间越长, 对应的采样点数和运算量也随之增加; 反之分辨率越低, 所需采样时间越短。Ka 体制信号的伪码周期为 0.1 ms, 符号速

率 2 000 SPS。为避免比特符号翻转带来的相关积分增益损失，数据时长不能超过 0.5 ms；若数据时长不够一个伪码整周期，则无法完成一次完整的相关运算，所以最终采集数据长度在 0.1 ms 与 0.5 ms 之间。不同数据时长与频率分辨率的关系如表 1 所示。

表 1 不同采样时长与频率分辨率

数据时长/ms	码片数	频率分辨率/Hz	频率误差/Hz
0.2	20 000	5 000	2 500
0.3	30 000	3 333	1 667
0.4	40 000	2 500	1 250

一级捕获可以通过降低频率分辨率的方式提升计算速度，同时为了提高相关积分的结果峰值，增加捕获概率，最终选择 0.2 ms 的采样时长，对应频率分辨率为 5 kHz。为覆盖相应的频率范围，需要进行至少 160 点 FFT 计算，按照 FFT 点数的性质分段数 P 至少为 256。二级捕获对于频率分辨率有较高的要求，期望在限定范围内有最小的误差，所以在允许范围内采样时长越长，捕获效果越好。但选择 0.5 ms 的采样时长会导致采集数据中含有比特符号翻转现象的概率大大增加，从而降低了捕获的积分结果从而影响信号捕获。因此，选择 0.4 ms 的作为二级捕获的采样时长，对应频率分辨率为 2.5 kHz。为满足频率覆盖范围的要求，匹配滤波器分段数 P 至少为 512。

面对 Ka 信号多普勒动态范围大的特点，除了选择匹配滤波器分段数之外，还需计算 PMF 幅频响应的参数，要让 PMF 包络对应的频率响应主瓣覆盖到 400 kHz，同时保证信号能量损失尽量小，保证对 Ka 信号的捕获能力，取 PMF 包络主瓣带宽的 1/4 作为分析带宽^[15]。由式 (2) 可知，PMF 幅频响应包络的主瓣带宽受参数 X 与 T_c 的影响，其中 T_c 是由信号体制决定的固定参数，可以通过改变 X 实现多普勒范围的覆盖。图 4 为不同分段长度下的 PMF 幅频响应。

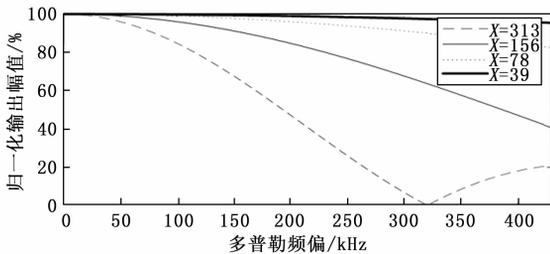


图 4 不同分段长度对 PMF 增益的影响

为了满足频率覆盖范围的同时也没有过大的增益衰减，PMF 包络的第一个主瓣零点为 $1/XT_c$ ，则有：

$$X < 250 \tag{4}$$

另外需要注意的是，此处的部分匹配滤波器长度 X 是以码片为单位的。

综上所述，选择 $X=78$ ， $P=256$ 的条件参数进行一级捕获，可以在满足捕获要求的同时尽可能减小计算量； $X=156$ ， $P=512$ 的条件进行二级捕获，拥有较高的捕获精度。

3.3 FFT 扇贝损失补偿

由于 FFT 点数限制导致的算法增益周期性下降，称为扇贝损失，当多普勒频移位于 FFT 频率分量的中间时，可能因为低于判决门限而无法捕获信号，不利于信号捕获，因此需要对扇贝损失进行补偿。针对扇贝损失常用的补偿方法有两种：补零法和加窗法^[16]。

取多普勒频移处于相邻两 FFT 频率分量正中间，此时的 FFT 幅频增益记为扇贝损失 A_{loss} ^[17]，公式为：

$$A_{\text{loss}} = \frac{1}{P} \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2P}\right)} \approx \frac{1}{P} \cdot \frac{1}{\frac{\pi}{2P}} = \frac{2}{\pi} \approx -1.96 \text{ dB} \tag{5}$$

3.3.1 补零法

补零法是一种操作相对直观的 FFT 扇贝损失补偿手段，其核心基于离散傅里叶变换的基本特性。在进行 FFT 运算时，原始的 N 点离散信号序列经 FFT 变换后，在频域呈现出有限个离散频点的结果。由于实际信号频率往往难以精准对齐这些频点，从而引发扇贝损失。补零法通过在原始 N 点时域信号序列末尾添加若干个零值点，将序列长度扩充至 M ($M > N$) 点，随后对这一更长的序列进行 M 点 FFT 运算。补零后的频率分辨率得以提升，频域采样点更为密集。这使得信号频谱在频域上的表现更为精细，从而减少了因频率未对齐 FFT 频点而产生的幅值衰减，即补偿了扇贝损失。

如图 5 所示，未经过补零时在非 FFT 频率分量位置的增益谷值很低，经过补零法之后的谷值明显改善，且补零越多，改善越高。

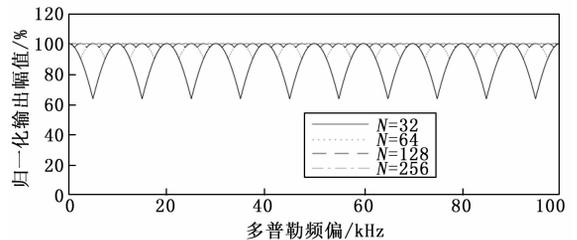


图 5 补零法对 FFT 扇贝损失的改善

补零法的优势在于不需要对原始信号进行复杂的预处理或变换，计算过程简单直接，易于在各类信号处理平台上实现。虽然补零增加了频域采样点数，使频谱看起来更平滑，但本质上它并未真正提高信号的频率分辨率。补零只是在原有频谱的基础上进行了插值，并没有引入额外的信号信息。当信号中存在多个频率成分且频率间隔较小时，补零法可能无法有效区分这些频率，补

偿效果会大打折扣。在一定情况下, 补零法可以明显改善扇贝损失带来增益衰减, 但是随着补零数的增加, 补零法带来的性能提升百分比会下降^[18], 并且 FFT 点数增长极快, 显著增加了计算量和计算时间。为覆盖 Ka 信号的动态范围要使用较多的 FFT 点数进行计算, 在此基础上使用补零法将导致计算时间过长, 难以满足捕获算法实时性的要求。

3.3.2 加窗法

加窗法的核心思想是在对信号进行 FFT 运算之前, 利用特定的窗函数对时域信号进行加权处理。窗函数能够改善信号截断处的特性, 减少频谱泄漏, 从而减小扇贝损失导致的增益衰减。

窗函数的时域表达式为:

$$w(n) = \frac{1}{1+\beta} \left(1 - \beta \cos \frac{2\pi n}{N} \right) \quad (6)$$

其中: $n=0, 1, 2, \dots, N-1$, β 为可变系数。当参数 $\beta=0$ 时代表矩形窗时域表达式, $\beta=1$ 时代表汉宁窗。加窗后的扇贝损失 A'_{loss} 为:

$$A'_{\text{loss}} = \frac{1}{P} \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2P}\right)} + \frac{\beta \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right)}{2 \sin\left(-\frac{\pi}{2P}\right)} + \frac{\beta \sin\left(\frac{3\pi}{2}\right)}{2 \sin\left(\frac{3\pi}{2P}\right)} \right| = \frac{6+2\beta}{3\pi} \quad (7)$$

随着 β 增大, 扇贝损失逐渐减小, 当 $\beta=1.7$ 时相关增益近似为 1^[19]。选择 $\beta=1.7$ 的改进窗进行 FFT 扇贝损失的补偿, 经过等效窗函数法计算^[20], FFT 输出结果为:

$$A'_{\text{FFT}}(f_d, n) = A_{\text{FFT}}(f_d, n) - \frac{\beta}{2} A_{\text{FFT}}(f_d, n-1) - \frac{\beta}{2} A_{\text{FFT}}(f_d, n+1) \quad (8)$$

其中: $A_{\text{FFT}}(f_d, n) = G_{\text{FFT}}(f_d, n) e^{j\varphi_{\text{FFT}}(f_d, n)}$ 是 FFT 部分对应的归一化频率响应, 由 FFT 幅频响应 $G_{\text{FFT}}(f_d, n)$ 和 FFT 相频响应 $\varphi_{\text{FFT}}(f_d, n)$ 组成。

由输出结果可知, 改进窗加窗可以简化为对 FFT 输出进行延迟加权再相加的形式, 无需沿用传统算法中对 FFT 输出结果进行卷积运算或通过时域信号与窗函数点积运算的复杂计算流程, 避免了上述两类复杂计算。加窗法改善 FFT 扇贝损失的仿真如图 6 所示。

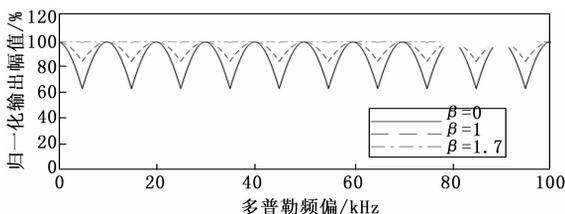


图 6 不同 β 值加窗法对扇贝损失的改善

加窗法的优势显著, 首先, 它能有效改善频谱泄漏

问题, 通过对信号进行加权处理, 大幅降低旁瓣干扰, 使频谱分析结果更接近真实信号特性, 提升频率测量和信号检测的准确性。其次, 加窗法计算逻辑简单, 无需复杂算法迭代, 在工程实践中易于实现, 能够快速应用于实时信号处理系统。所以相较于补零法来说, 加窗法更适用于 Ka 信号的捕获算法。

3.3.3 补偿搜索法

除了上述两种常用的扇贝损失补偿方法之外, 补偿搜索法也可以改善 FFT 频率分量之间的增益衰减^[21]。补偿搜索法在完成初次的搜索之后, 通过调整本地载波频率追加一次补偿搜索, 补偿搜索的载波频率与初次搜索的载波频率相差 FFT 频率分辨率的 1/2, 将两次搜索的结果去交集最大值作为最终的搜索结果。相比起前两种方法, 补偿搜索法的步骤更为复杂, 且计算量大, 实时性差, 缺点比较明显。

综上所述, 比较了 3 种补偿扇贝损失的方法, 最终选择使用可变系数 $\beta=1.7$ 的加窗法改善 FFT 扇贝损失, 在计算量增加不多的情况下显著改善扇贝损失。

3.4 二级捕获算法流程

本论文以 PMF-FFT 算法为理论框架, 面向 Ka 信号特性, 构建二级分层式搜索捕获算法体系。第一级实施粗捕获操作, 通过放宽捕获精度的方法提升信号处理速度, 对信号码相位与多普勒频移的初步估计, 实现参数的大致定位; 当捕获结果满足预设判定准则时, 算法进入第二级精捕获阶段。此阶段依托粗捕获获取的参数信息, 有效压缩搜索空间维度, 显著降低计算量, 并利用加窗法改善算法增益, 进而提升捕获效率与参数估计精度。最终完成信号捕获流程, 输出捕获结果。二级 PMF-FFT 捕获算法的具体流程如下:

- 1) 对信号进行采样, 一级捕获采样时间 0.2 ms, 二级捕获采样时间 0.4 ms, 同时记录时间戳。
- 2) 采样数据根据捕获级数进行分段, 输入部分匹配滤波器中进行部分相关。
- 3) 对相关值进行 FFT 计算。若将所有搜索码相位的相关数据都进行了 FFT 变换, 则进入下一步骤; 否则调整本地码相位, 返回步骤 2)。
- 4) FFT 结果进行峰值搜索, 提取码相位信息和多普勒频率偏移信息。如果是二级捕获, 输出捕获结果, 捕获结束, 否则进入下一步骤。
- 5) 利用码相位信息、多普勒频率、时间戳信息计算补偿参数, 调整本地振荡器频率和本地码相位, 返回步骤 1) 进行二级搜索。

4 仿真结果及分析

4.1 仿真场景与参数

为评估改进型 PMF-FFT 算法捕获 Ka 信号的性能,

利用仿真软件对算法进行仿真。仿真核心参数，如伪码结构、动态范围，均参考 Ka 频段导航增强信号特性设置。同时为聚焦算法性能验证，暂不考虑复杂的卫星轨迹等影响，仅构建无遮挡的理想接收场景，确保接收信号仅含目标信号与高斯噪声。

设置信号采样率 f_s 为 250 MHz，无多普勒载波频率 F 为 20 GHz，多普勒频率偏移 f_d 为 201 kHz，初始码相位 2 048，扩频码速率 100 MHz，码长为 10 000 chip，一级捕获阶段的频率分辨率为 5 kHz，二级捕获阶段的频率分辨率为 2.5 kHz。传统 PMF-FFT 算法的采样时长 0.4 ms，分段数 P 为 256。对传统 PMF-FFT 捕获算法和改进型 PMF-FFT 捕获算法进行仿真。

4.2 给定信号条件的捕获性能仿真与比较

在信号功率大小 -90 dBm，信噪比为 -30 dB 的条件下进行仿真，传统 PMF-FFT 算法的仿真结果如图 7、图 8 所示。

PMF-FFT 捕获结果 (SNR=-30dB, P=256, NFFT=256)

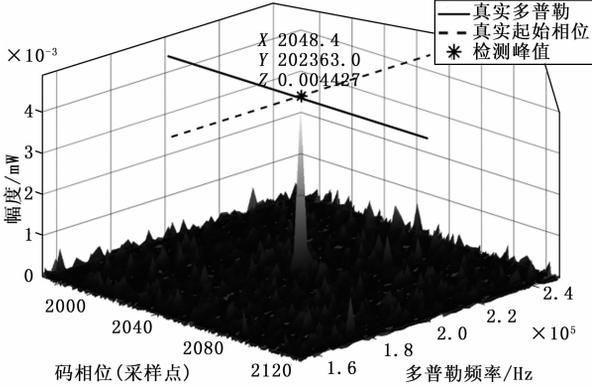
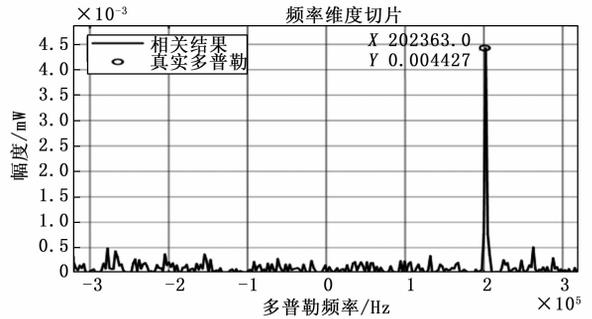


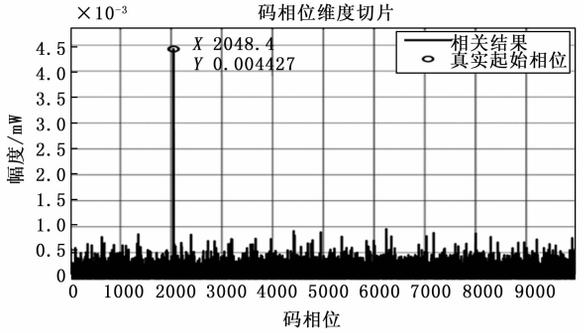
图 7 传统 PMF-FFT 算法捕获三维图

由图 7 可知，搜索捕获过程中在坐标 (2 048.4, 202 363) 处获得了明显的尖峰，与真实多普勒频率 (实线标注) 和真实起始码相位 (虚线标注) 相交于一点。通过合理设置检测门限可以判断捕获成功，此时捕获到的码相位为 2 048.4，多普勒频率为 202.36 kHz，信号检测量大小为 4.427×10^{-3} 。图 8 (a) 是频率切片图，展示了特定码相位下，不同多普勒频率对应的捕获结果，使用圆圈标记真实多普勒位置。图 8 (b) 是码相位切片图，展示了特定多普勒频率下的码相位相关结果，同样使用圆圈标记真实码相位位置。相关峰值与真实起始相位点高度重合，峰值尖锐且在码相位维度上具有良好的聚焦性，这表明算法在码相位维度也能精准捕获目标信号，有效提取码相位信息。传统捕获算法的多普勒频率测量误差为 1.36 kHz，码相位误差 0.4 码片。

在相同条件下，对改进型 PMF-FFT 捕获算法进行仿真，结果如图 9、图 10 所示。



(a) 捕获结果频率切片



(b) 捕获结果码相位切片

图 8 捕获结果的二维切片

PMF-FFT 捕获结果 (SNR=-30dB, P=512, NFFT=512)

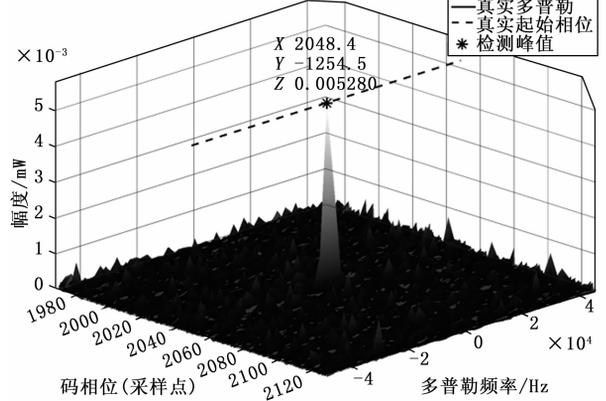


图 9 改进型 PMF-FFT 算法捕获三维图

改进型捕获算法在坐标 (2 048.4, -1 254.5) 处获得了明显的尖峰，此时捕获到的码相位为 2 048.4，信号检测量大小为 5.28×10^{-3} ，经过补偿模块对本地振荡器频率进行修正，多普勒频率残余测量值为 -1 254.5 Hz。改进型捕获算法的频率测量误差为 1.25 kHz，码相位误差 0.4 码片。

通过比较图 7 和图 9 可以看出，在相同信号能量和信噪比的情况下，改进型 PMF-FFT 捕获算法的捕获结果拥有更高的相关值幅度，且频率误差比传统算法更小，抗噪性能显著增强，这意味着改进型算法能在更恶劣的信号环境下成功捕获信号。

4.3 抗噪能力仿真与比较

为进一步测试改进型算法的抗噪能力，进行不同信

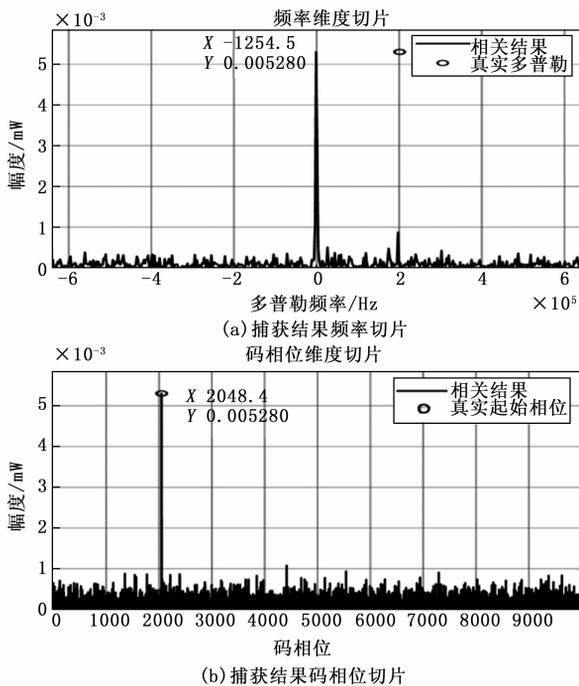


图 10 改进型捕获算法捕获结果的二维切片

噪比场景下的捕获仿真。对传统 PMF-FFT 算法和改进型 PMF-FFT 算法进行信噪比 -20、-25、-30、-35 dB 情况下的仿真。两种算法信噪比和相关幅度的关系如图 11 所示。

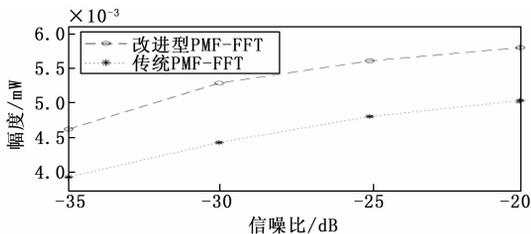


图 11 信噪比与相关幅度

从图 11 中可以看出, 随着信噪比的提升 (从 -35 dB 向 -20 dB 变化), 两种算法的性能指标均呈上升趋势, 说明信噪比改善有助于提升算法性能。对比两条曲线, 改进型 PMF-FFT 算法的曲线始终位于传统 PMF-FFT 算法的曲线之上。在信噪比为 -35 dB 时, 改进型算法的性能指标约为 4.6×10^{-3} , 传统算法约为 3.9×10^{-3} ; 到信噪比为 -20 dB 时, 改进型算法性能指标约为 5.8×10^{-3} , 传统算法约为 5.0×10^{-3} 。改进型算法相较于传统算法, 相关幅度平均提升 17.1%, 这表明在一定信噪比范围内, 改进型 PMF-FFT 算法的性能均优于传统算法, 且随着信噪比提升, 改进效果稳定存在, 体现出改进型算法在信号捕获等性能方面的优势, 尤其是在低信噪比环境下, 改进型算法能更有效地发挥作用, 具有更好的抗噪性能与捕获能力。

5 结束语

针对 Ka 频段宽带高动态信号捕获中传统算法增益不足、效率低下的问题, 在 PMF-FFT 算法的基础上, 提出了一种二级捕获算法。通过剖析 Ka 信号带宽、多普勒动态等特性, 对捕获算法的参数进行了适配性设置, 设计的二级 PMF-FFT 架构通过粗捕快速定位与精捕精准优化, 并结合改进加窗法, 减小了 FFT 扇贝损失, 得到了更高的算法增益和抗噪性能。仿真验证表明, 改进算法在给定信噪比范围内, 相关幅值较传统算法均有所提升, 改进型算法相关幅度平均提升 17.1%, 多普勒误差降至 1.25 kHz, 充分证明了其在低轨导航增强场景的适配性。但研究未涉及多径干扰下的性能优化, 且未开展硬件实现验证。未来可进一步结合深度学习构建自适应补偿模型, 提升复杂信道鲁棒性, 并基于 FPGA 完成工程化开发, 为 Ka 频段导航系统的实际部署提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 佟孟霖, 蒙艳松, 张明欢, 等. 基于低轨 Ka 频段卫星导航技术研究 [J]. 空间电子技术, 2025, 22 (2): 28 - 35.
- [2] SAGE G. Serial synchronization of pseudonoise systems [J]. IEEE Transactions on Communication Technology, 2003, 12 (4): 123 - 127.
- [3] 徐定杰, 石吉利. 动态环境下基于 FFT 实现伪码快速捕获 [J]. 中国航海, 2003 (2): 3 - 6.
- [4] 鲁郁. 北斗/GPS 双模软件接收机原理与实现技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [5] POLYDOROS A, WEBER C. A unified approach to serial search spread-spectrum code acquisition-Part I: general theory [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 32 (5): 542 - 549.
- [6] 杨勇, 黄海生, 李鑫, 等. 基-2FFT 和基-4FFT GPS 信号快速捕获算法研究 [J]. 信息技术, 2017 (12): 85 - 89.
- [7] 胡建波, 杨莘元, 卢满宏. 一种基于 FFT 的高动态扩频信号的快速捕获方法 [J]. 遥测遥控, 2004 (6): 19 - 24.
- [8] CHAI D, LIU H, TANG C, et al. Simulation and analysis of the PMF-FFT pseudocode acquisition algorithm [C] //2024 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). IEEE, 2024: 1 - 5.
- [9] BAI X, ZHAO Y, QI H, et al. High-precision acquisition algorithm based on PMF-FFT in high dynamic and low SNR environment [C] //2023 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). IEEE, 2023: 1 - 5.

[10] LU Z, CHEN Y, JIAO Y, et al. An improved PMF-FFT acquisition approach based on frequency segmentation for DSSS signals [C] //2021 IEEE 5th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2021, 5: 143 - 147.

[11] QIN Y, ZHANG Y, GUO J, et al. Acquisition technology for the Third Beidou satellite navigation signal with low signal-to-noise ratio and high dynamic [C] //2020 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS). IEEE, 2020: 397 - 402.

[12] WANG X, JIANG K, CHU R, et al. Research on acquisition method of dsss system based on PMF-FFT [C] //2023 8th International Conference on Communication, Image and Signal Processing (CCISP). IEEE, 2023: 552 - 558.

[13] 郭肃丽, 刘云飞. 一种基于 FFT 的伪码快捕方法 [J]. 无线电通信技术, 2003 (1): 11 - 13.

[14] 刘庆, 张锦, 李恣訔, 等. PMF-FFT 并行捕获扇贝损失补偿方法分析 [J]. 上海航天 (中英文), 2023, 40 (s1): 101 - 107.

[15] 黄云青, 尚勇, 白森. PMF-FFT 捕获算法部分匹配滤波器长度选取研究 [J]. 航空兵器, 2015 (5): 46 - 51.

[16] XI Y S. A method based on quinn algorithm to improve the accuracy of PMF-FFT doppler frequency estimation [C] //2021 IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). IEEE, 2021, 4: 1683 - 1687.

[17] SUN B, ZHENG Z, ZHOU Y, et al. Research on fast acquisition algorithm of spread spectrum signal based on PMF-FFT [C] //2022 7th International Conference on Communication, Image and Signal Processing (CCISP). IEEE, 2022: 291 - 296.

[18] 刁彦华, 李凯丽, 姚远, 等. 基于 PMF-FFT 的北斗 B2a 信号捕获算法研究 [J]. 通信与信息技术, 2024 (4): 89 - 96.

[19] 王家明, 孙晨, 何勇, 等. 基于 PMF-FFT 的星载扩频通信系统捕获算法 [J]. 通信技术, 2022, 55 (7): 844 - 849.

[20] 孙斌. 基于 PMF-FFT 快速捕获算法的研究与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[21] 黄海生, 张弛, 李鑫, 等. 一种二级分段 PMF-FFT 卫星信号捕获算法 [J]. 西安邮电大学学报, 2024, 29 (1): 32 - 40.

[7] 程若曦, 王凯, 焦健, 等. 基于知识库的配网网络化下系统全过程安全态势识别方法 [J]. 科技通报, 2021, 37 (9): 46 - 51.

[8] 曹生林, 柳立言, 康凯. 基于光学加密拓扑的多域光纤通信网络安全域划分系统设计 [J]. 激光杂志, 2023, 44 (8): 145 - 149.

[9] 闫志豪, 刘京菊, 郭徽, 等. 基于域名系统知识图谱的 CDN 域名识别技术 [J]. 计算机工程与应用, 2022, 58 (6): 149 - 156.

[10] 于运涛, 张大松, 姜洪朝, 等. 基于区块链的网络安全系统关键数据存储处理系统设计 [J]. 电子技术应用, 2023, 49 (4): 78 - 82.

[11] 梁晓兵, 岑炜, 付义伦, 等. 适用于电力物联网的安全接入认证装置设计 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (31): 13374 - 13380.

[12] 蒋荣萍. 基于 N-gram 算法的网络安全风险检测系统设计 [J]. 现代电子技术, 2021, 44 (1): 25 - 28.

[13] 张迪, 赵东方, 王雪丽. 强拓扑关系下的光纤传感器网络节点安全定位系统设计 [J]. 激光杂志, 2022, 43 (12): 144 - 148.

[14] 唐猛, 李海华, 谢灵运, 等. 多中继物理层网络编码系统加密设计及安全性能研究 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2021, 43 (4): 652 - 662.

[15] 马娟, 于广琛, 柯皓仁, 等. 工业互联网设备的网络安全管理与防护研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23 (2): 81 - 87.

[16] 邹峰, 陈兴蜀, 罗永刚. 网络安全交互式分析系统构建方法 [J]. 计算机工程与设计, 2021, 42 (9): 2433 - 2438.

[17] 陈翊璐, 孙军, 程晟滔, 等. 面向工控联网设备的安全管理技术 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (33): 14266 - 14272.

[18] 那晓栋, 王嘉宁, 刘墨燃, 等. 基于层次化可塑性回声状态网络的混沌时间序列预测 [J]. 控制与决策, 2023, 38 (1): 133 - 142.

[19] 王磊, 苏中, 乔俊飞, 等. 基于增量式学习的正则化回声状态网络 [J]. 控制与决策, 2022, 37 (3): 661 - 668.

[20] 刘鹏, 叶润, 闫斌, 等. 一种深度回声状态网络的输入尺度自适应算法 [J]. 计算机工程, 2022, 48 (2): 98092 - 98105.

[21] 谢霖铨, 曾孟麒, 杨火根. 高斯骨架差分进化算法与回声状态网络的结合应用 [J]. 南昌大学学报 (理科版), 2022, 46 (3): 363 - 370.

[22] 罗章铭, 唐杰, 黄逸奇, 等. 基于二进制编码的 Apriori 增量更新算法研究 [J]. 计算机技术与发展, 2022, 32 (1): 47 - 53.

[23] 贺帆, 刘漫丹, 钟超. 基于动态最小支持度的增量频繁序列挖掘 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2023, 50 (2): 1.