

引用本文: 戚沪朋, 边东明, 张更新. 一种用于快速捕获低轨物联网信号的 PMF-FFT 改进算法[J]. 光通信技术, 2023, 47(6): 48–52.

一种用于快速捕获低轨物联网信号的 PMF-FFT 改进算法

戚沪朋, 边东明, 张更新

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘要: 为了在高动态、低信噪比的条件下实现对低轨物联网信号的快速捕获, 提出了一种用于快速捕获低轨物联网信号的部分匹配滤波-快速傅里叶变换(PMF-FFT)改进算法。首先, 利用星历信息预估多普勒频偏, 缩小频域搜索范围; 然后, 通过补零、加窗方法克服 PMF-FFT 算法的扇贝损失; 最后, 采用频域差分非相干累积提高低信噪比下的输出增益。仿真分析表明, 所提改进算法在信噪比为 $-25\sim-15$ dB 时能提高低轨物联网信号的检测概率, 搜索范围由 $15\sim 35$ kHz 缩小为 $24.8\sim 25.2$ kHz。

关键词: 低轨卫星物联网; 多普勒频移估计; 扇贝损失; 部分匹配滤波-快速傅里叶变换

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)06-0048-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.06.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Improved PMF-FFT algorithm for fast acquisition of low-orbit internet of things signals

QI Hupeng, BIAN Dongming, ZHANG Gengxin

(School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to achieve rapid capture of low-rail IoT signals under the conditions of high dynamic and low signal-to-noise ratio, a partial matching filter-fast Fourier transform (PMF-FFT) improvement algorithm for rapid capture of low-rail IoT signals is proposed. First of all, the ephemeris information is used to predict the Doppler frequency bias and narrow the frequency domain search range; then, the scallop loss of PMF-FFT algorithm is overcome by zero padding and windowing. Finally, the frequency domain differential incohere accumulation is used to improve the output gain under low signal-to-noise ratio. The simulation analysis shows that the proposed algorithm can improve the detection probability of low-orbit iot signal when the signal-to-noise ratio is $-25\sim-15$ dB, and the search range is reduced from $15\sim 35$ kHz to $24.8\sim 25.2$ kHz.

Key words: low-orbit satellite internet of things, Doppler frequency shift estimation, scallop loss, partial matching filter-fast Fourier transform

0 引言

卫星物联网被视为对地面物联网系统的补充和延伸, 由于其不受地理环境限制, 能够有效解决地面网络在部署时面临的环境受限问题, 并在全球范围内提供稳定的通信服务^[1]。在卫星通信过程中, 接收机在

解调前必须完成同步, 消除频偏影响, 其中对伪码的捕获是同步的关键环节之一。故在高动态、低信噪比环境下实现伪码捕获, 提高接收机的检测性能成为卫星通信研究的一大重点。常见的伪码捕获算法有串行捕获、并行频率捕获、并行码相位捕获以及部分匹配滤波-傅里叶变换(PMF-FFT)算法等^[2]。其中, PMF-FFT 算法能够在宽频偏下准确估计多普勒频移并实现信号快速捕获而得到广泛应用^[3]。该算法存在的扇贝损失和频域衰减的问题可以通过补零法和窗函数法解决^[4-6], 并且通过频域差分非相干累积处理后, 在低信噪比情况下算法的捕获性能也有所提高^[7]。但是, 上述改进都未能缩小频域搜索范围和减少捕获时间。文献[8]提出一种两阶段伪码捕获的算法, 通过先粗略估

收稿日期: 2023-06-03。

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目(U21A20450)资助。

作者简介: 戚沪朋(1996—), 男, 硕士研究生, 现就读于南京邮电大学通信与信息工程学院通信与信息专业, 主要从事卫星频谱感知与物联网接入的研究工作, 针对具体的低轨物联网信号快速捕获算法进行改进研究, 并在硬件上实现验证。



计频偏的大致范围,再在估计范围内准确估计频偏。这种算法虽可以减少搜索次数和捕获时间,但在粗略估计中不容易确定搜索的步长。因此,本文提出一种用于快速捕获低轨物联网信号的 PMF-FFT 改进算法,根据星历信息采用球面几何方法精准地估计多普勒频移^[9-10],从而缩小频域搜索范围,结合补零加窗和频域差分等方法,提高伪码捕获概率并缩短捕获时间。

1 PMF-FFT 改进算法

PMF-FFT 改进算法主要包含以下几项内容:首先,利用星历辅助预测多普勒偏移,缩小频域的搜索范围,从而减少信号捕获时间;其次,采用加窗法和补零法,减小 PMF-FFT 算法的扇贝损失,从而提高系统输出增益;最后,采用频域差分非相干累积技术,减小噪声干扰,从而在低信噪比情况下提高信号检测概率。

1.1 星历辅助捕获

低轨卫星发射的信号频率固定,但由于卫星和接收机之间存在相对运动,会产生多普勒效应,导致频率发生偏移。一般来说,卫星运动引起的载波多普勒频移大约在 ± 5 kHz 范围内,对于低轨的高动态环境,其多普勒频率变化范围将扩大至 ± 10 kHz,甚至 ± 15 kHz。由于频域搜索范围取决于多普勒频移的范围,这导致接收机对低轨物联网信号的捕获非常耗时,使用传统的捕获算法效率很低。如果利用卫星星历信息先对多普勒频移进行预估,然后将预估结果传递给信号搜索控制部分,以预估的载波频率为中心,在估计误差范围内进行信号搜索,能够极大地缩小搜索范围,提高捕获效率。

星历辅助捕获的主要任务是估计多普勒频移,星历为接收机提供位置和速度等辅助信息,以便在信号捕获之前从接收信号中减去接收器的动态影响,缩小频域搜索范围,提高捕获效率。因此,对具有高动态的低轨物联网信号,可以采用星历辅助捕获的 PMF-FFT 改进算法,具体步骤如下:

1) 根据星历估计多普勒频偏预估值 f_d^* 和多普勒估计误差值 Δf ;

2) 确定频域搜索范围为 $[f_d^* - \Delta f, f_d^* + \Delta f]$,将搜索范围中 K 点 FFT 输出模值中的最大值与预设门限值进行比较,判断捕获是否成功。

3) 若捕获失败,扩大捕获搜索范围,依次向两边扩大 Δf 进行搜索,直至捕获成功。

设接收机收到的数字中频信号为

$$S_{\text{IF}}(m) = PNe^{j[2\pi(f_c + f_d)m/\ell + \phi_0]} \quad (1)$$

其中, f_c 为载波中心频率, f_s 为信号采样率, f_d 为多普勒频移, ϕ_0 为相位偏移, P 为相关器的个数, N 为匹配滤波器相关长度, K 为 FFT 变换的点数; $m=0, 1, 2, \dots, M-1$, M 为数据点数。在假定伪码已经同步的前提下,系统的幅频响应为

$$|S(w_d, k)| = \frac{1}{NP} \frac{\sin(w_d N)}{\sin w_d} \frac{\sin(w_d NP - \pi \frac{P}{K} k)}{\sin(w_d N - \pi \frac{k}{K})} \quad (2)$$

其中, $k=0, 1, 2, \dots, K-1$; w_d 为多普勒频移, $w_d = \pi f_d / f_s$ 。

根据式(2)可知,随着多普勒频移 w_d 的增加,归一化增益的峰值会减小,即积累损失增加。此外,相邻的 2 个峰值之间输出幅度会发生衰减,并出现波谷,这种现象称为扇贝损失。例如,第 k 个峰值和第 $k+1$ 个峰值间的波谷值为

$$S(k, k+1) \approx \frac{\sin \frac{\pi}{2K} (2k+1)}{\frac{\pi}{2K} (2k+1)} \frac{\sin \frac{\pi P}{2K}}{\frac{\pi P}{2K}} \quad (3)$$

其中, $\sin \left[\frac{\pi}{2K} (2k+1) \right] / \frac{\pi}{2K} (2k+1)$ 表示积累损失引起的幅度, $\sin \frac{\pi P}{2K} / \frac{\pi P}{2K}$ 表示扇贝损失引起的幅度衰减。采用最大扇贝损失衡量扇贝损失的程度可表示为 $L_{\text{max}} = 1 - \sin \frac{\pi P}{2K} / \frac{\pi P}{2K}$ 。分析归一化增益和扇贝损失可知,系统的幅频响应是由相关器个数 P 、匹配滤波器相关长度 N 和 FFT 点数 K 共同决定。在实际情况中若确定多普勒频率范围和积累损失范围,即可确定具体的相关积累长度 N 、相关器个数 P 以及 FFT 点数 K 的值^[12]。

上述方法实现的关键在于确定多普勒频偏预估值 f_d^* 和多普勒估计误差值 Δf , 而多普勒估计误差值 Δf 的大小取决于对多普勒频偏预估值 f_d^* 估计的准确性。目前,一般使用基于两行轨道根数(LTE)的 SGP4/SDP4 模型来估计中低轨卫星多普勒频移,该模型具有较高的估计精度,其估计误差小于 50 Hz,平均误差约为 20 Hz^[6]。而本文采用的几何估计方法复杂度小、计算简单易于实现,且实验测量与基于 SGP4/SDP4 模型的估计值相近,即使在轨道高度较低和偏心率较大的情况下估计误差小于 200 Hz。因此,本文认为采用星历辅助捕获的几何方法估计的多普勒频偏预估值 f_d^* 较为准确, Δf 一般取值 200 Hz。

戚沪朋,边东明,张更新:一种用于快速捕获低轨物联网信号的 PMF-FFT 改进算法

1.2 扇贝损失改进

对于归一化增益,波谷值越小,扇贝损失越大。若扇贝损失过大,则会导致频率落在相邻的 2 个峰值之间的信号无法被检出。对于扇贝损失,常见的解决方法有补零法和加窗法。补零法是在有限序列的尾部补零至 2 的整数次方,这样通过增加 FFT 运算的点数,在频谱上可以显示出部分被遮挡的频率分量。图 1 是补零至数据长度 N_{FFT} 为 32、64、128 位时的归一化增益曲线,可以看出,随着补零位数增加,红色、蓝色波谷值明显增大,即补零法可以明显改善由栅栏效应引起的扇贝损失,同时补零操作也能提高频率分辨率。通过增加不同的窗函数对信号进行截断,可以减少频谱泄露导致的扇贝损失。图 2 显示了 2 种算法归一化增益的对比情况,可以看出加窗后的 PMF-FFT 改进算法能够提高归一化增益,有效改善系统的扇贝损失。

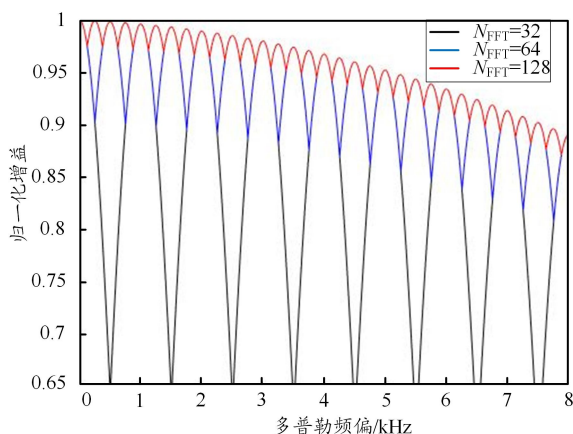


图 1 补零改进后 PFT-FFT 算法归一化增益曲线

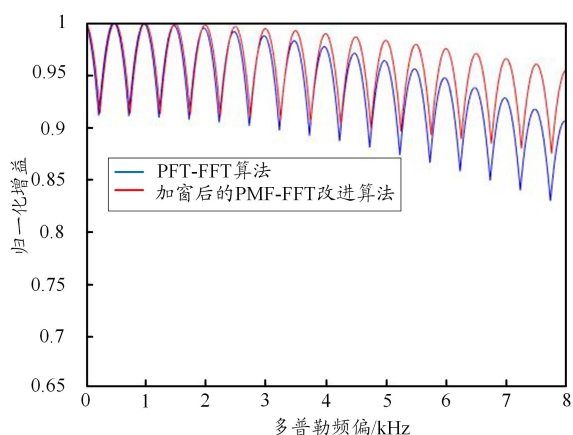


图 2 2 种算法归一化增益对比曲线

1.3 频域差分非相干累积

低信噪比的低轨物联网信号在累积过程能够提高算法的信噪比增益,从而提高捕获系统的检测概率。PMF 是一个相干累积过程,而非相干累积是将相

干累积的结果去模值后相加。若将归一化频率响应记为 $I(k)+jQ(k)$, $I(k)$ 、 $Q(k)$ 分别为复信号同相、正交分量,则非相干累积结果可表示为

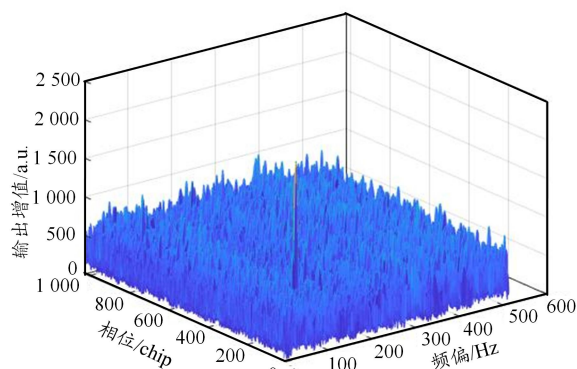
$$G(k) = \sum_{i=1}^n \sqrt{I_i^2(k) + Q_i^2(k)} \quad (4)$$

其中, n 为累积次数。

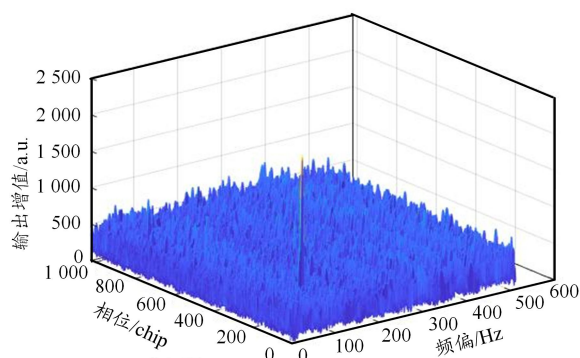
时域非相干累积过程中,时域信号中的高斯白噪声信号自相关函数不为 0,会产生平方损耗从而影响输出增益的提高。为解决这一问题,本文采用频域非相干累积 PMF-FFT 算法,在频域上将 FFT 输出结果与后一周期结果进行共轭相乘后,再作 n 次累积,得到的非相干累积结果为

$$G'(k) = \sum_{i=1}^n \sqrt{I_i(k) + jQ_i(k) I_{i+1}(k) + jQ_{i+1}(k)} \quad (5)$$

频域差分过程中由于高斯白噪声在信号时间差不为 0 的情况下不具有互相关特性,故不会产生平方损耗。2 种非相干累积捕获增益对比结果如图 3 所示。可以看出,2 种累积方法的输出增益都出现明显的峰值,但频域非相干累积输出增益小于时域非相干累积。这



(a) 时域非相干累积



(b) 频域非相干累积

图 3 2 种非相干累积捕获增益对比结果

是由于频域非相干累积能有效抑制噪声,故更适用于低信噪比的环境中。

1.4 改进算法的信号捕获原理

低轨物联网信号捕获原理框图如图 4 所示,由 PMF 模块、数据存储模块、数据处理模块、FFT 模块、门限判决模块、状态机模块构成。其中,PMF 模块先将周期性产生的伪码序列存储到只读存储器(ROM)中,然后对接收到的信号与这些伪码进行匹配相关运算;数据处理模块一方面对相关运算结果进行补零操作,另一方面对 FFT 运算结果进行频域差分运算;FFT 模块通过调用 Vivado 软件的 IP 核,对补零后相关运算输出进行 FFT 补偿运算;门限判决模块产生预设的门限值,该门限值是 FFT 序号 k 的函数;状态机模块用于衔接各个子模块工作,构成统一有机的捕获系统。

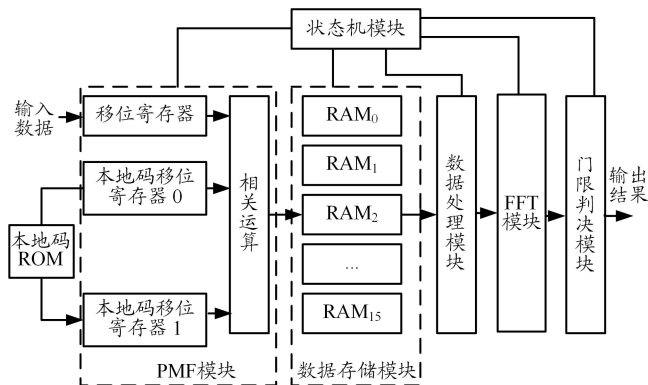


图 4 信号捕获原理框图

PMF 模块是捕获算法的核心,其设计直接关系到整个系统的捕获性能。本文采用串并匹配滤波器结合乒乓操作的技术,旨在大幅减少现场可编程门阵列(FPGA)的资源消耗,并提高系统的捕获性能。PMF 模块将长度为 U 的本地码分成 p 段,每段长 $W=U/p$ 。ROM 将接收到的数据串行输入到 W 位的移位寄存器中,然后与本地码进行 W 位的部分相关运算。将系统时钟频率设置为接收数据的采样频率,在每个时钟周期后,输入数据被存入移位寄存器中的下一个位置;在 W 个时钟周期内,随着时钟周期的推移,本地码和输入数据进行相关运算; W 个时钟周期后,载入本地码的下一段 W 个码数据,即切换本地码移位寄存器。部分相关结果存放位置和顺序如图 5 所示,即第一个部分相关结果存放在第一个寄存器的 $\text{mem}(1,1)$ 处,第二个结果存放在 $\text{mem}(2,1)$ 处,第 W 个结果存放在 $\text{mem}(W,1)$ 处;第 $W+1$ 个结果存放在 $\text{mem}(1,2)$ 处,第 $W+2$ 个存放在 $\text{mem}(2,2)$ 处,依次类推。在 FFT 运算前进行数据补零,按寄存器的顺序将寄存器中的数据串

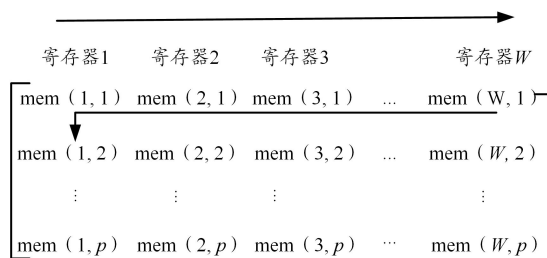


图 5 部分相关运算结果存放位置和顺序

行送入 FFT 核中进行 FFT 运算。

本文采用 Xilinx 公司的 Fast Fourier Transform 实现 FFT IP 核的调用。与 Quartus 中 FFT IP 核相比,虽然 Vivado 的 FFT IP 核配置复杂,但其功能强大。Vivado 的 FFT IP 核支持多通道输入和实时更改 FFT 的点数,其 FFT 结构包括流水线 Streaming、基 4 Burst、基 2 Burst 和轻量级基 2 Burst,计算速度和消耗的资源依次减少。权衡存储资源和吞吐量,本文设计采用基 2 Burst 的 FFT 结构,设置 FFT 核采用的参数,即设置目标器件系列、变换长度、数据精度、旋转精度等。当参数定制好以后,Vivado 将自动生成 FFT 模块。

2 仿真测试结果

本文采用 Matlab 和 Vivado 仿真测试软件对所提 PMF-FFT 改进算法进行仿真测试。仿真参数为:输入信号为模拟的低轨搜救信号,扩频码长为 1 023,采样速率为 153.6 kb/s,PMF 长度为 16,FFT 运算点数为 512 个,设置的码偏移为 100 码片,频偏为 25 000 Hz。PMF-FFT 算法、文献[7]改进的 PMF-FFT 算法以及本文改进算法在不同信噪比条件下的检测概率如图 6 所示。可以看出,当信噪比高于 -15 dB 时,3 种捕获算法检测概率均接近 100%;当信噪比在 -25~-15 dB 时,本文改进算法检测概率明显高于上述的 2 种算法,说明本文捕获算法能够适应低轨低信噪比的环境。

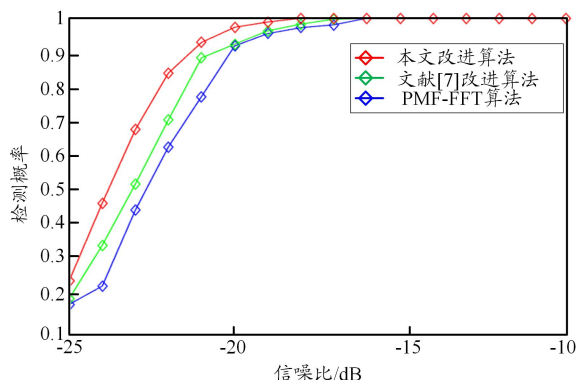


图 6 信噪比对不同算法检测概率的影响

戚沪朋,边东明,张更新:一种用于快速捕获低轨物联网信号的 PMF-FFT 改进算法

捕获时间主要取决于频域搜索的时间,由于采用了星历辅助预估多普勒频移,搜索范围由 15~35 kHz 缩小为 24.8~25.2 kHz。若将搜索步长设置为 18.75 Hz 的频率分辨率,频域搜索次数最多需要 22 次,信号捕获时间大幅缩短,能够快速捕获,适用于本文低轨物联网信号突发环境。

在仿真测试过程中,接收机对接收到的中频信号进行采样、下变频、滤波和数字自动增益控制和捕获处理,捕获结果分别如图 7 和图 8 所示。从图 7 可以看出,捕获峰值第一次出现在 176 300 ns 处,即捕获时间为 0.176 3 ms,多次测试捕获时间在 0.176~178 ms 内,这与 FPGA 中捕获时间理论值应在 2 个伪码周期 (0.328 ms) 相符。从图 8 可以看出,捕获峰值第一次出现在第五个时隙,频率分辨率为 18.75 Hz,频偏估计值为 $24\ 900 + 18.75 \times 5 = 24\ 993.75$ Hz (24 900 Hz 为频偏搜索中心值),与频偏设置值 25 000 Hz 误差为 6.25 Hz,小于频率分辨率。因此,本文所提 PMF-FFT 改进算法能正确估计频偏。

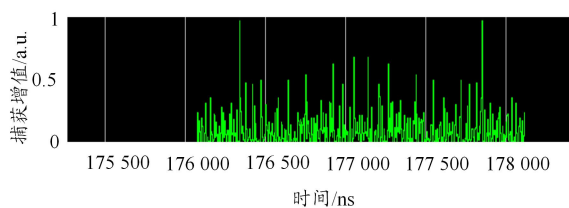


图 7 FPGA 捕获时间测试结果

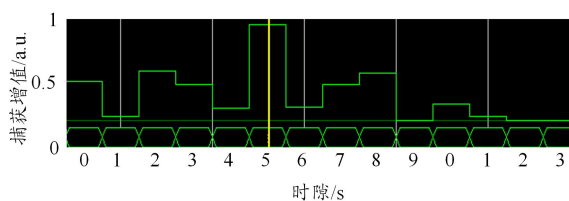


图 8 FPGA 捕获频偏测试结果

3 结束语

本文根据星历信息,采用球面几何方法,精准估计多普勒频移,有效缩小了低轨物联网信号在频域上的搜索范围,减少了搜索次数。同时,通过对传统 PMF-FFT 算法进行补零和频域差分改进,能快速捕获低轨物联网信号,并成功在 FPGA 环境中实现对低轨搜救信号的捕获。仿真和测试结果证明了本文所提 PMF-FFT 改进算法具有工程实现性,能够降低捕获时间,并且在较低信噪比的情况下提高了检测概率。

参考文献:

- [1] 沈俊,高卫斌,张更新.低轨卫星物联网的发展背景、业务特点和技术挑战[J].电信科学,2019,35(5):113-119.
- [2] 周亮.卫星弱信号捕获技术研究[D].成都:电子科技大学,2016.
- [3] 黄颖.直接序列扩频同步技术研究及系统的 FPGA 实现[D].杭州:浙江大学,2006.
- [4] 邱文旗,曾庆化,刘建业,等.基于补零 PMF-FFT 的北斗快速精频捕获算法研究 [C]//中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心.第十一届中国卫星导航年会论文集—S03 导航信号与信号处理.成都:[出版单位不详],2020:71-75.
- [5] 倪媛媛,胡永辉.基于改进的 PMF-FFT 扩频信号快速捕获算法研究[J].电子测量技术,2013,36(8):33-36,40.
- [6] BAI Z Y, LI B, CUI W. A two-stage fast pseudo-code acquisition algorithm based on PMF-FFT [C]//IEEE. Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference. Hong Kong: IEEE, 2020: 982-984.
- [7] 盛志超,秦瑾,周勃,等.基于频域差分的“北斗”三号信号快速捕获算法[J].电讯技术,2020,60(8):928-935.
- [8] 王驰昊,魏敬法,寇建辉. PMF-FFT 伪码捕获实现与性能分析[C]//中国卫星导航系统管理办公室,科学技术部高新技术发展及产业化司,国防科工局系统工程一司,等.第四届中国卫星导航学术年会论文集 -S7 北斗/GNSS 用户终端技术.武汉:[出版单位不详],2013:161-164.
- [9] 王爱华,王星原,陈丽婷.低轨卫星多普勒频移特性几何估计算法[J].北京理工大学学报,2016,36(12):1294-1297.
- [10] 王梧贵,郑肇健.低轨非同步卫星的多普勒频移分析[J].电信报,2022(6):40-43.