

DOI:10.11918/202208112

# 用于星间通信的高灵敏度快捕算法

郭晓旭<sup>1</sup>, 徐兆斌<sup>1,2</sup>, 成恒飞<sup>1</sup>, 杨嘉<sup>1</sup>, 金仲和<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学 微小卫星研究中心, 杭州 310027; 2. 浙江省微纳卫星研究重点实验室(浙江大学), 杭州 310027)

**摘要:**为实现微小卫星快速协同工作,满足星间通信链路对扩频信号捕获算法提出的高灵敏度与快速捕获的要求,对常用捕获算法的原理进行分析,针对传统信号捕获方法存在的捕获灵敏度低、捕获时间长、信噪比要求高等缺陷,提出一种适用于星间链路的FFT快速捕获算法,该算法在传统FFT码相位捕获法的基础上通过多路并行架构、特殊同步序列、降速率抽取、非相干累加等优化策略对传统算法的捕获灵敏度及捕获速度进行改善。基于对改进算法的可行性进行检验,首先通过理论公式推导了算法的极限灵敏度、抗干扰能力与理论捕获时间,其次,在MATLAB软件中设置典型任务环境对算法的各项性能进行仿真,最终通过搭建硬件测试平台对算法进行性能实测。仿真及硬件测试表明:该算法相对于传统捕获算法性能有明显提升,改进算法的极限捕获灵敏度可达 $-130$  dBm,捕获时间小于 $100$  ms,符合卫星通信环境设计需求,并已在自主研发的天平二号卫星的星间通信机中验证了其可行性;改进算法还可通过调节算法的并行路数、非相干累加次数等算法要素兼容不同应用环境需要。

**关键词:** 卫星编队组网; 星间通信; 扩频通信; 伪码捕获; 高灵敏度

**中图分类号:** TN927 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2023)08-0043-08

## High sensitivity fast acquisition algorithm for inter-satellite communication

GUO Xiaoxu<sup>1</sup>, XU Zhaobin<sup>1,2</sup>, CHENG Hengfei<sup>1</sup>, YANG Jia<sup>1</sup>, JIN Zhonghe<sup>1,2</sup>

(1. Micro-satellite Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Key Laboratory of Micro-satellite Research of Zhejiang Province (Zhejiang University), Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** In an effort to achieve the rapid cooperation of Either micro-satellites or microsattellites and meet the requirements of high sensitivity and fast acquisition of spread spectrum signal proposed by inter-satellite communication link, the principle of common acquisition algorithms was analyzed. In view of the shortcomings of traditional signal acquisition algorithms such as low acquisition sensitivity, long acquisition time and high signal-to-noise ratio requirements, a fast FFT acquisition algorithm for inter-satellite link was proposed. Based on the traditional FFT code phase acquisition method, the algorithm improves the acquisition sensitivity and acquisition speed of the traditional algorithm through multiple parallel architecture, special synchronization sequence, rate reduction decimation, incoherent accumulation and other optimization strategies. In order to test the feasibility of the algorithm, firstly, the limit sensitivity, anti-interference ability and theoretical capture time of the algorithm were derived through theoretical formula. Secondly, the typical task environment was set in MATLAB software to simulate the performance of the algorithm. Finally, the performance of the algorithm was measured by building a hardware test platform. Simulation and hardware tests show that the performance of this algorithm is significantly improved compared with the traditional acquisition algorithm. The ultimate acquisition sensitivity of the improved algorithm is  $-130$  dBm, and the acquisition time is less than  $100$  ms, which meets the design requirements of satellite communication environment. Its feasibility has been verified in the inter-satellite communication machine of the self-developed tianping-2 satellite. The improved algorithm can also be compatible with different needs of applications in various environments by adjusting the number of parallel paths, non-coherent accumulation times and other elements of the algorithm.

**Keywords:** satellite formation networking; inter-satellite communication; spread spectrum communication; PN code acquisition; high sensitivity

收稿日期: 2022-08-30; 录用日期: 2022-11-10; 网络首发日期: 2023-07-10

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/23.1235.T.20230707.1424.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62073289); 国家自然科学基金(U21A20443)

作者简介: 郭晓旭(1997—), 男, 博士研究生; 金仲和(1970—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 徐兆斌, zjuxzb@zju.edu.cn

近年来,随着航天器编队飞行技术特别是卫星编队组网技术逐渐热门<sup>[1]</sup>,微小卫星编队因其研发周期短、研发成本低、小体积、轻质量、快速度等特点,被广泛应用于光学干涉测量、定位及导航、微波合成孔径雷达等领域<sup>[2]</sup>。微小卫星编队技术是通过多颗小卫星的协同来实现传统卫星的功能拓展,如图 1 所示给出了卫星协同工作示意,小卫星之间通过建立星间链路进行相互通信或相对测量等操作,进而实现较为复杂的功能<sup>[3]</sup>。

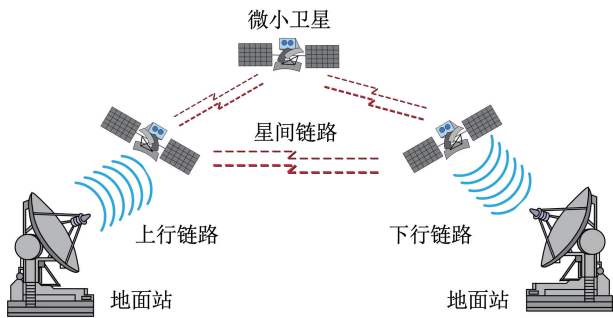


图 1 多卫星协同示意

Fig. 1 Schematic diagram of multi-satellite cooperation

在常用的信息传输方式中,扩频通信因其隐蔽性、抗衰落能力、抗干扰性能等方面的优势,被广泛应用于星间通信、全球定位、无线传感等系统中<sup>[4]</sup>。扩频通信中代表性的直接序列扩展频谱(Direct sequence spread spectrum, DSSS)系统,其原理是发射端利用高速率伪码序列对数据进行频谱展宽,而接收端则通过伪码捕获、解扩等操作完成信号中的伪码剥离,因此,伪码序列的捕获是建立扩频通信链路的先决条件。并且,由于微小卫星终端的发射功率小、信号突发性强、信号传输距离远等因素,星间扩频通信对信号处理算法有着高灵敏度、快速捕获的针对性需求。

本文针对搭载于天平二号卫星的星间通信机,面向星间链路的应用环境与任务指标,在提高星间通信效率与可靠性的设计需求下,以传统的快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)码相位捕获法为基础,对于传统算法存在的灵敏度与捕获速度不足等缺点,提出多路并行架构、特殊同步序列、非相干累加机制等改进策略,并对改进后的 FFT 快速捕获法进行了性能分析、仿真与硬件平台测试。

## 1 传统捕获算法

扩频系统捕获原理基于扩频码良好的自相关性,利用本地伪码与接收信号的相关峰值判定两者是否对齐,当两者码片相位基本对齐时,才可实现信号的伪码剥离。然而,在实际星间通信系统中,除了收发端的码片相位差,还存在着因收发端的相对运

动、时钟晶振偏差产生的载波多普勒频偏<sup>[5]</sup>,多普勒频偏会使接受信号与本地伪码的相关值衰减,因此,信号捕获的关键就是对多普勒频偏和伪码相位的估计<sup>[6]</sup>。

目前说来,常用的伪码捕获方法有串行滑动相关法、匹配滤波法和 FFT 码相位捕获法等。串行捕获法对多普勒频偏和伪码相位进行二维串行搜索,故其结构较为简单,但捕获速度慢<sup>[7]</sup>;匹配滤波法通过设置与伪码长度相同阶数的滤波器来完成伪码相位的搜索,所以该算法捕获速度快但资源消耗巨大<sup>[8]</sup>;FFT 码相位捕获法则是将信号在频域进行处理,其结构如图 2 所示,通过信号与伪码的 FFT 及 IFFT 操作可以直接获取两者的码片相位差,故其码片搜索速度较快<sup>[9]</sup>。

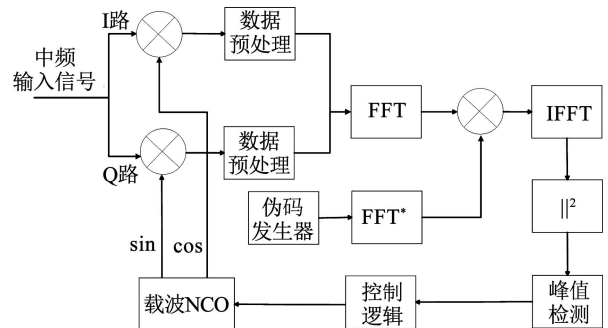


图 2 FFT 码相位捕获法

Fig. 2 FFT code phase acquisition algorithm

由上述比较可得,FFT 码相位捕获法在资源消耗与搜索速度方面较为适中,然而,面对星间通信需求,传统的 FFT 码相位捕获法亦存在许多局限性:该方法对多普勒频偏进行串行搜索,所以捕获时间较长,并且算法容易受到数据比特跳变的影响,因而接收灵敏度不足。因此,针对天平二号卫星星间链路任务需求,需要对传统的 FFT 码相位捕获法进行优化,即首先要提高捕获算法的极限灵敏度以适应星间弱信号,其次要加快算法的捕获速度以提高通信效率。

## 2 改进的 FFT 码相位捕获法

为了使算法适应星间链路通信需求,本文对传统的码相位算法架构改进如图 3 所示,其主要优化策略为:

1) 采用特殊的同步引导序列以避免信号数据跳变从而提高捕获算法的灵敏度,同时在接收端实现了通信数据的符号速率自适应估计。

2) 采用多路并行架构,在每个频率搜索区间内设置多路频差一定的本地数字控制振荡器(Numerically controlled oscillator, NCO),对多路信号

分别进行下变频和后续算法处理, 该架构有效提高了多普勒频偏搜索速度。

3) 当本地伪码和接收信号的快速傅里叶变换结果乘积进行快速傅里叶逆变换 (Inverse fast Fourier transform, IFFT) 时, 对数据进行降速率抽取—非干累加操作, 降速率抽取操作可以降低运算复杂度、提高运算速度, 非相干累加操作则能提高信号的信噪比, 加强算法对于弱信号的捕获性能。

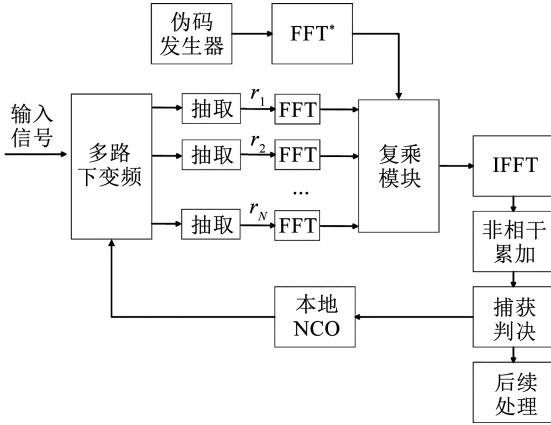


图 3 改进的捕获算法结构

Fig. 3 Structure of improved acquisition algorithm

### 2.1 特殊同步序列设计

图 4 给出了改进算法在通信帧前添加的同步序列结构, 系统对数据帧添加的同步引导序列包括全 1 序列, 和  $\pm 1$  交替序列。

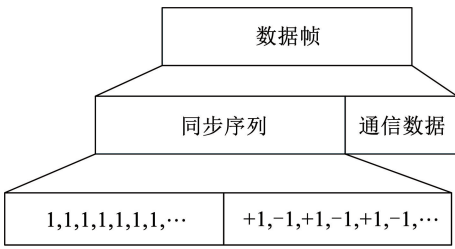


图 4 同步序列结构

Fig. 4 Structure of synchronization sequence

同步序列中全 1 序列的添加可避免数据跳变对直接扩频信号捕获造成的影响, 由于捕获机制的原理实际是将本地伪码与接收信号进行相关, 相关公式为

$$R_{\text{corr}}(\tau) = \sum_{n=-N}^{+N} r_{\text{local}}(n) r_{\text{sig}}(n - \tau) \times g(n - \tau) \quad (1)$$

式中:  $N = N_{\text{FFT}}/2$ ,  $N_{\text{FFT}}$  为 FFT 点数,  $r_{\text{local}}(n)$  为本地伪码序列。在 DSSS 系统中, 接收信号由伪码序列  $r_{\text{sig}}(n)$  与通信序列  $g(n)$  两部分构成, 根据在相关期间内通信序列  $g(n)$  是否发生跳转式(1)可进一步表示为

$$R_{\text{corr}}(\tau) = \begin{cases} k \sum_{n=-N}^{+N} r_{\text{local}}(n) r_{\text{sig}}(n - \tau), & g(n) \text{ 无跳转} \\ k \sum_{n=-N}^i r_{\text{local}}(n) r_{\text{sig}}(n - \tau) - \\ k \sum_{n=i+1}^N r_{\text{local}}(n) r_{\text{sig}}(n - \tau), & g(n) \text{ 有跳转} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $k$  为双极性序列的数值, 即  $k = \pm 1$ 。式(2)对比可见, 当通信序列  $g(n)$  在相关期间  $i$  处发生跳转时, 最终的相关峰值相对于通信序列未跳转情况下的相关峰值有明显衰减。因此, 在同步序列中添加全 1 序列可以保证捕获相关时的峰值更加明显, 从而能有效提高算法的极限捕获灵敏度。

同步序列中除了包含全 1 序列外, 还使用了与信息码元长度对应的  $\pm 1$  交替的序列实现对不同符号速率信号的区分。当数据到达接收端时, 接收端在全 1 同步序列时间内完成对信号的捕获, 在信号捕获完成以后对信号进行符号速率估计, 算法对解扩信号进行采样并进行符号判断, 统计过零点数量, 进而根据过零点数量估计数据的符号速率。故该同步序列的添加不仅提高了算法的极限灵敏度, 更同时在接收端完成了对数据码元速率的自适应估计, 节省了常规的测控机制来通知卫星通信码元速率所需时间, 极大提高了卫星通信效率与灵活性。

### 2.2 多路并行架构

为了优化算法的捕获速度, 方案采用多路并行架构以实现算法对于多普勒频偏以及伪码相位的二维搜索。图 5 给出了高灵敏度快速捕获算法的多路并行架构示意, 其算法可简述如下。

**Step1** 信号经过  $N$  路 NCO 进行下变频, 下变频后得到多路信号  $x_1(m), x_2(m), \dots, x_N(m)$ , 多路信号之间的频率差为  $f_1$ 。

**Step2** 将多路信号分别进行快速傅里叶变换, 即  $X(k) = \text{FFT}[x(m)] = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) e^{-2\pi jkm/N}$ , 同时对本地伪码亦进行快速傅里叶变换, 即  $C(k) = \text{FFT}[c(m)] = \sum_{m=0}^{N-1} c(m) e^{-2\pi jkm/N}$ 。

**Step3** 将本地伪码傅里叶变换结果取共轭并与信号傅里叶变换结果对应相乘, 即  $R(k) = X(k) \cdot C^*(k)$ , 将乘积结果进行傅里叶逆变换  $r(m) = \text{IFFT}[R(k)]$ 。

**Step4** 将多路乘积结果  $r_i(m)$  非相干累加  $N_i$  次以提高信号的信噪比, 并将多路的累加结果分别进行峰值搜索, 取多路 IFFT 结果中峰值最大的一路

$r_{\max}(m)$ 。

**Step5** 将  $r_{\max}(m)$  路的峰值与设定的捕获门限比较:

If  $\text{Max}\{r_{\max}(m)\} > \text{THERESHOLD\_SET}$

将信号进行后续处理;

Else

调整 NCO 的中心频率,并返回 Step1;

End

该多路并行架构在实际应用中可通过设计多路并行数  $N$ , 默认频率搜索区间的中心频率  $f_c$ , 多路之间的固定频差  $f_1$ , 多普勒搜索区间间隔  $f_\Delta$  来面对不同的应用环境与扩频信号要求, 相对于传统 FFT 码相位捕获法, 其捕获速度提升了  $N$  倍。

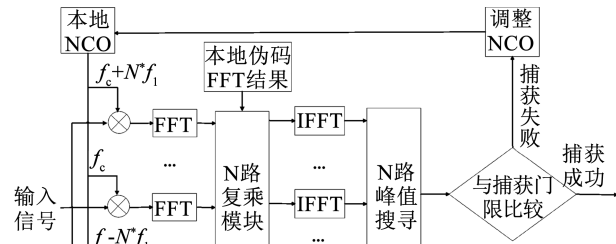


图 5 多路并行捕获架构

Fig. 5 Architecture of multiple parallel acquisition

### 2.3 降速率抽取—非相干累加机制

由于 FFT 码相位捕获算法需要对数据进行傅里叶变换, 而  $N$  点的 FFT 需要进行  $\frac{N}{2} \cdot \log_2 N$  次复乘运算与  $N \cdot \log_2 N$  次加法运算<sup>[10]</sup>, 并且 FFT 算法硬件实现时的资源消耗与数据的处理时钟有关, 当 FFT 输入数据点数越多或采样时钟更高时, FFT 算法所需的芯片处理能力与功耗也越高。针对微小卫星低功耗、低复杂度的要求, 改进算法中对于高采样时钟的数据进行抽取处理, 使其采样率降低从而减少 FFT 运算复杂度, 同时该操作可以提升算法在硬件中实现时的运算速度, 进而可以减少算法的捕获时间, 算法中的抽取比例可根据实际应用需求更改。

然而, 对于卫星通信的弱信号来说, 抽取操作会带来相关值能量的降低, 进而影响 FFT 算法中频谱峰值的正确搜寻, 因此改进的算法中采用非相干累加的方式来提高信号的相关能量。非相干累加对算法 IFFT 后输出的信号相关值进行多次累加以降低数据抖动, 从而提高相关精度, 非相干积分的信噪比增益可以表示为<sup>[11]</sup>

$$G_i(N_i) = G_c(N_i) - L(N_i) \quad (3)$$

式中:  $G_c(N_i)$  为非相干积分增益,  $L(N_i)$  为非相干积分损耗, 而且:

$$G_c(N_i) = 10\lg(N_i) \quad (4)$$

$$L(N_i) = 10\lg \left[ \frac{1 + \sqrt{1 + 9.2 \times N_i / D_c(1)}}{1 + \sqrt{1 + 9.2 / D_c(1)}} \right] \quad (5)$$

$$D_c(1) = (\text{erf}^{-1}(1 - 2P_{fa}) - \text{erf}^{-1}(1 - 2P_d))^2 \quad (6)$$

式中:  $N_i$  为非相干积分次数,  $P_{fa}$  为捕获检测的虚警概率,  $P_d$  为检测概率。当非相干累加次数增加时, 单次搜索时间也会增加, 最终也会使得捕获时间变长, 因此在进行算法设计中需要根据任务需求合理选择非相干累加次数。

## 3 算法性能分析

### 3.1 极限灵敏度理论推导

卫星的接收端信号经过与数控振荡器控制本地载波进行下变频、滤波、降采样等操作后得到 I、Q 两路信号:

$$x_1(n) = \frac{\sqrt{2P}}{2} d(n) c(n - \gamma) \cos(\varphi) + \frac{n_1(n)}{2} \quad (7)$$

$$x_Q(n) = \frac{\sqrt{2P}}{2} d(n) c(n - \gamma) \sin(\varphi) + \frac{n_Q(n)}{2} \quad (8)$$

式中:  $P$  为信号功率,  $d(n)$  为基带信息数据,  $c(n - \gamma)$  为接收伪码,  $\gamma$  为接受伪码序列与本地伪码序列的相位差,  $n_1(n)$ 、 $n_Q(n)$  表示均值为 0, 方差为  $\sigma^2$  的相互独立的窄带高斯白噪声。为降低计算复杂度, 采用 FFT 来计算相关值, 将同相信号  $x_1(n)$  和正交信号  $x_Q(n)$  两项作为复序列进行 FFT, 同时对接收端本地伪码序列  $c(n)$  进行 FFT 并取其共轭, 将两者 FFT 结果相乘并最终进行 IFFT, 该过程的相关值可表示为

$$y(m) = \text{IFFT}[X(k) \cdot C^*(k)] = y_1(m) + jy_Q(m) \quad (9)$$

式中:  $X(k) = \text{FFT}[x_1(n) + jx_Q(n)]$  为接收信号的傅里叶变换值,  $C^*(k) = \text{FFT}[c(n)]^*$  为本地伪码傅里叶变换值的共轭, 且相关结果的实部与虚部分别为:

$$y_1(m) = \frac{\sqrt{2P}}{2} \cos \varphi \sum_{n=0}^{N-1} c(n) c(n - \gamma + m) + \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} n_1(n) c(n + m) \quad (10)$$

$$y_Q(m) = \frac{\sqrt{2P}}{2} \sin \varphi \sum_{n=0}^{N-1} c(n) c(n - \gamma + m) + \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} n_Q(n) c(n + m) \quad (11)$$

式中:  $y_1(m)$ 、 $y_Q(m)$  为相互独立的高斯随机变量, 相关值包络  $r(m)$  在服从莱斯分布  $H_1$  与服从瑞利分布  $H_0$  时的概率密度函数分别为:

$$f(r|H_1) = \frac{r}{\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{r^2 + \frac{P \times N^2}{2}}{2\sigma_n^2}\right) I_0\left(\frac{N\sqrt{2P}}{2\sigma_n^2} r\right) \quad (12)$$

$$f(r|H_0) = \frac{r}{\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (13)$$

式中: $I_0(\cdot)$ 为修正的零阶第一类贝塞尔函数, $\sigma_n^2$ 为非相干累加归一化以后的信号噪声方差。

因此误判概率 $P_{FA}$ 可以表示为

$$P_{FA} = \int_{T_h}^{\infty} \frac{r}{\sigma_n^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma_n^2}} dr = \int_{\frac{T_h^2}{2\sigma_n^2}}^{\infty} e^{-y} dy = e^{-\frac{T_h^2}{2\sigma_n^2}} \quad (14)$$

式中 $T_h$ 为门限, $y = \frac{r^2}{2\sigma_n^2}$ 。虚警概率 $P_{fa}$ 可表示为<sup>[12]</sup>

$$P_{fa} = 1 - (1 - P_{FA})^{N_{FFT}} \quad (15)$$

式中: $N_{FFT}$ 为FFT运算点数,且检测概率 $P_d$ 可表示为<sup>[12]</sup>

$$P_d = \int_{T_h}^{\infty} \frac{r}{\sigma_n^2} e^{-\frac{r^2 + v^2}{2\sigma_n^2}} I_0\left(\frac{rv}{\sigma_n^2}\right) dr = \int_{T_h}^{\infty} \frac{r}{\sigma_n^2} e^{-\left(\frac{r^2}{2\sigma_n^2} + R_{SN}\right)} I_0\left(\frac{r\sqrt{2R_{SN}}}{\sigma_n}\right) dr \quad (16)$$

式中: $v = \sqrt{\frac{P \times N^2}{2}}$ 为检测时的信号幅值, $R_{SN}$ 为信噪比,且

$$R_{SN} = \frac{v^2}{2\sigma_n^2} \quad (17)$$

由于高斯噪声方差 $\sigma_n^2$ 可通过统计方法测算出,故可视作常数,将 $T_h^2/2\sigma_n^2$ 视为门限参数,虚警概率 $P_{fa}$ 与检测概率 $P_d$ 均与 $T_h^2/2\sigma_n^2$ 直接相关。 $T_h^2/2\sigma_n^2$ 增加时,虚警概率 $P_{fa}$ 不断减小,经式(14)、(15)计算,门限参数大于17时,满足虚警概率 $P_{fa} > 10^{-4}$ 的要求。

然而,门限的增大同时会导致检测概率 $P_d$ 下降,由于 $P_d$ 接近于1,使用 $1 - P_d$ 表示漏检概率。同理,经式(16)计算可得在门限参数为18,检测门限信噪比为16 dB时,满足设计上常用的虚警概率小于 $10^{-4}$ 要求和漏检概率小于0.01的要求。输入载噪比 $R_{CN}$ 与检测门限信噪比 $R_{SN}$ 的关系为<sup>[13]</sup>

$$R_{CN} = R_{SN} - G_i - G_c - L_{rc} - L_s + 10\lg(f_{pn}) \quad (18)$$

式中: $G_i$ 为非相干增益, $G_c$ 为相干积分增益, $L_{rc}$ 为伪码相位损耗, $L_s$ 为扫频损耗, $f_{pn}$ 为伪码速率,针对天平二号的典型应用环境通过式(18)计算可得在门限信噪比条件下输入载噪比 $R_{CN} = 37.54$  dB-Hz。灵敏度 $P_{as}$ 和载噪比 $R_{CN}$ 的换算关系为<sup>[14]</sup>

$$P_{as} = -174 + N_R + R_{CN} \quad (19)$$

式中: $P_{as}$ 为捕获灵敏度, $N_R$ 为接收机噪声系数。将 $R_{CN} = 37.54$  dB-Hz代入式(19)可以获得在天平二号的典型应用环境下该算法的理论极限捕获灵敏度

约为-133.46 dBm。

### 3.2 抗干扰能力分析

抗干扰容限<sup>[15]</sup> $M_j$ 是衡量接收机处于多大功率干扰下依然能够正常工作的能力,计算式为

$$M_j = G_p - [L + R_{SN}] \quad (20)$$

式中: $L$ 为接收机内部损耗, $G_p$ 为接收机增益, $R_{SN}$ 为接收机最小输出信噪比,取满足虚警概率与检测概率要求下的门限信噪比16 dB。

因此在改进的捕获算法下,接收机的抗干扰容限可计算为

$$M_j = G_p - [L + R_{SN}] = [G_c + G_i] - [ |L_s| + |L_{rc}| + R_{SN} ] \approx 25.33 \text{ dB} \quad (21)$$

式(21)表明,当接收机前端的干信比高于25.33 dB时,就超过了接收机所承受的最大干扰范围使得接收机无法正常进行工作。

### 3.3 理论捕获时间计算

一般来说,在直接序列扩频通信中,伪码并行-频偏串行搜索的最大捕获时间可以表示为<sup>[16]</sup>

$$\bar{T}_{acq} = \frac{(2 - P_d)(1 + KP_{fa})}{P_d} \cdot m \cdot \tau_D \quad (22)$$

式中: $K$ 为发生虚警时额外增加的搜索次数, $m$ 为最差情况下捕获所需的扫频次数, $\tau_D$ 为一次搜索需要的时间,若考虑到算法中FFT实际的运算时间,则

$$\tau_D = N_i \cdot \text{Max}\{T_{coh}, T_{delay}\} \quad (23)$$

式中: $N_i$ 为非相干次数, $T_{coh}$ 为相干积分时间, $T_{delay}$ 为FFT运算时间,可近似认为检测概率 $P_d \approx 1$ ,虚警概率 $P_{fa} \approx 0$ ,由此式(17)可近似表示为

$$\bar{T}_{acq} = m \times N_i \times \text{Max}\{T_{coh}, T_{delay}\} \quad (24)$$

当采用多路并行架构时,通过合理设计多路并行数 $N$ 与多路固定频差 $f_i$ 可使载波多普勒频偏落在多路并行搜索范围内,此时则不需要多次扫频,故 $m = 1$ 。当算法在芯片硬件中实现时,芯片条件不同,FFT运算时间 $T_{delay}$ 也会不同,在目前主流芯片的计算能力下, $T_{delay}$ 可以控制与 $T_{coh}$ 相同数量级,相关时间 $T_{coh}$ 在参数设计下为亚毫秒量级,所以最终的捕获时间可控制在毫秒级。

## 4 性能仿真与实测

### 4.1 算法性能仿真

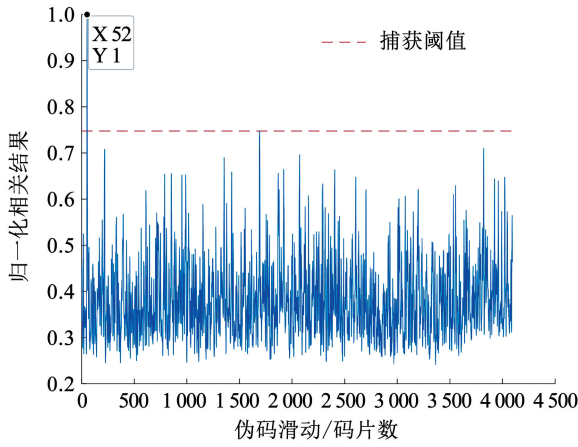
表1给出了针对天平二号任务需求所设置的仿真环境参数,兼容算法的资源消耗与捕获性能考虑,设置算法的并行路数 $N = 3$ ,非相干累加次数 $N_i = 256$ 。

在该仿真环境下,接收机在受到不同强度干扰时的相关情况如图6所示。

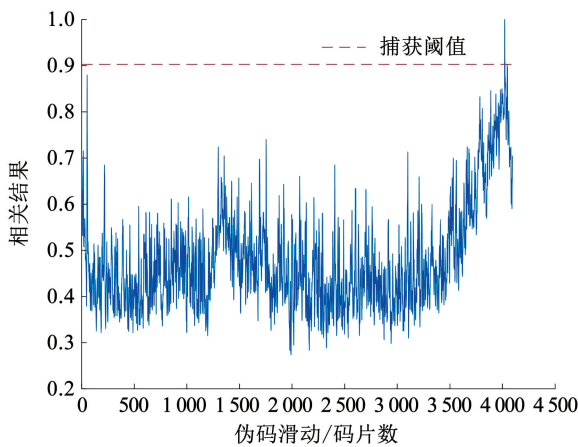
表 1 仿真参数设置

Tab. 1 Simulation parameter settings

参数	基带信息速率/(kbps)	伪码类型	伪码速率/(Mcps)	信号码片延迟/(chips)	信号频偏/Hz
取值	1~8	Gold	3.069	52	330



(a) 21 dB多址干扰与21 dB单音干扰下的相关情况



(b) 22 dB多址干扰与22 dB单音干扰下的相关情况

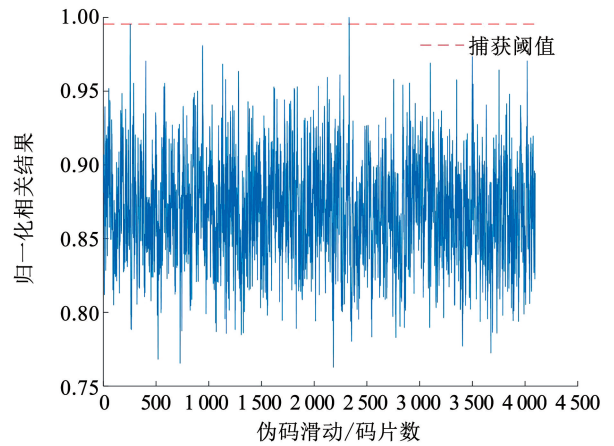
图 6 干扰下算法相关情况

Fig. 6 Correlation value of algorithm under interference

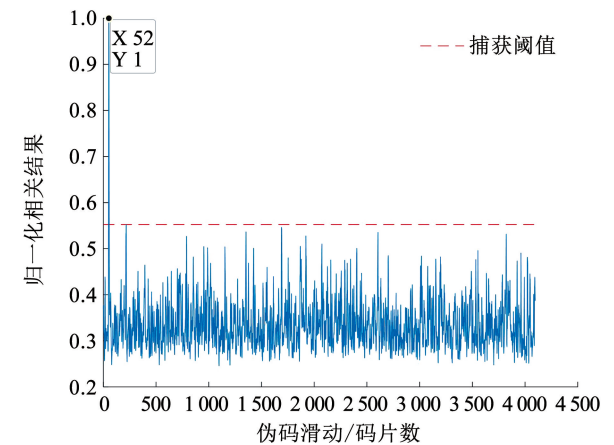
观察图 6 可以发现,信号受 21 dB 单音干扰与 21 dB 多址干扰的情况时,仍有明显的相关峰出现,即可以实现成功捕获;而当信号受 22 dB 单音干扰与 22 dB 多址干扰时,信号出现误判,即此时已经超过了算法的抗干扰容限。

图 7 给出了当设置接收信号的功率电平为 -130 dBm 时传统的 FFT 码相位捕获法与改进捕获算法的对比,从图中可以看出,在该灵敏度下,传统的 FFT 码相位捕获法未检测出明显相关峰,即捕获没有成功;但改进的算法相关结果中有着比较明显的峰值,可以实现成功捕获。

最后将算法的捕获时间进行 FPGA 的硬件级仿真,如图 8 所示,最终信号在 53 ms 左右完成了对信号的捕获,相关峰值明显,最终解扩的信号波形分明。



(a) 相位捕获法相关情况



(b) 改进的FFT快速捕获法相关情况

图 7 算法对比

Fig. 7 Algorithm comparison

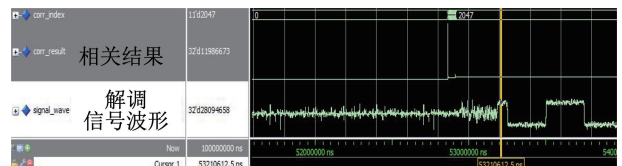


图 8 硬件仿真结果

Fig. 8 Hardware simulation result

### 4.2 硬件平台测试

天平二号 B 星与 C 星主要用于地面雷达设备标校和 RCS 测量,两颗卫星通过星间链路建立通信以实现协同工作,图 9 给出了基于天平二号卫星任务需求设计的 S 波段星间通信机架构,改进的捕获算法则利用硬件描述语言在 FPGA 芯片中进行实现。

搭载于天平二号卫星的星间通信机可分为射频模拟链路与数字信号处理两部分,当卫星其他协议层发来通信数据流时,FPGA 芯片对通信数据进行扩频、调制等操作以后经过数模转换器(Digital to analog converter, DAC)转换为基带模拟信号,基带模拟信号经过上混频、滤波等操作后,通过功率放大及天线发射后到达星间信道;当星间信号到达接收端

卫星通信机时,接收信号首先经过低噪声放大器和镜像滤波器,并下混频为中频模拟信号,中频信号经滤波器后滤除带外噪声,并通过自动增益控制(Automatic gain control, AGC)模块以控制信号电平

基本恒定,最终经过模数转换器(Analog to digital converter, ADC)后信号送入 FPGA 芯片进行后续捕获检测等操作。

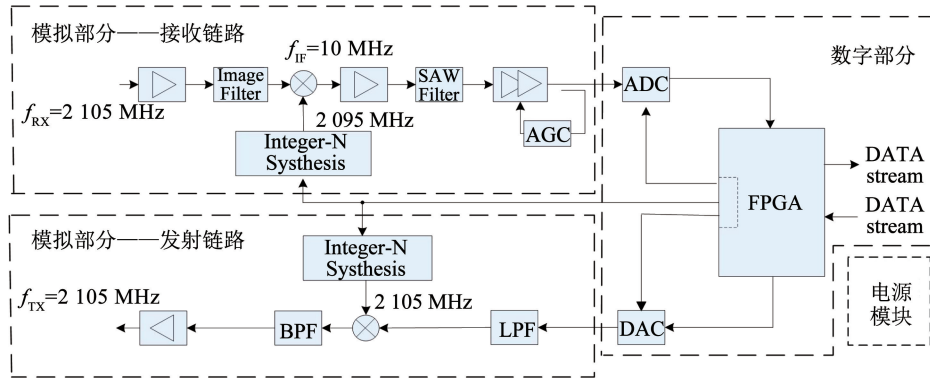


图 9 星间通信机结构图

Fig. 9 Structure diagram of inter-satellite communicator

为了对算法进行实际验证,搭建星间通信测试平台如图 10 所示,平台由发射端通信机、接收端通信机、可调式衰减器、射频功率计、地面站模拟设备和 PC 组成,其中可调式衰减器模拟星间信道衰落,地面站模拟设备增加信号干扰,射频功率计标定信号电平情况。

## 5 结 论

1) 本文从常用的捕获扩频算法原理出发,分析各种方法在星间链路系统中的适用性。针对传统算法捕获速度慢、捕获灵敏度不足等缺陷,以传统的 FFT 码相位捕获法为基础,面向天平二号卫星的应用环境,设计改进了一种可用于星间通信的高灵敏度快速捕获算法。

2) 改进的 FFT 快速捕获法相对于传统算法,采取了如下改进策略:提出了多路并行结构,将捕获速度提升至  $N$  倍;利用降速率抽取—非相干累加机制来减小运算复杂度,提高相关能量;设计了特殊同步引导序列以提高系统的捕获性能与通信效率。并且,该算法能够通过选择设计非相干累加次数  $N_i$ , FFT 并行支路数  $N$ , FFT 并行支路固定频差  $f_1$ , 多普勒频率搜索间隔  $f_{\Delta}$  等参数来兼容不同应用环境的需求,算法灵活性较高。

3) 经过理论公式推导、仿真软件验证及硬件平台测试等步骤,改进后算法的各项性能得到了检验。结果表明,该算法能够在 100 ms 内对电平  $-130$  dBm 以上的扩频信号实现快速捕获,且抗干扰性能出色,对于长距离星间链路通信具有较强的实用性。

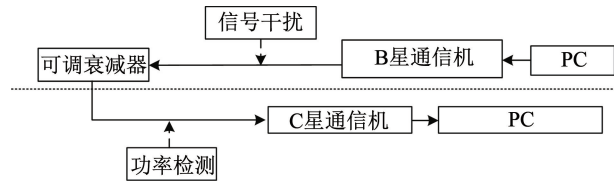


图 10 硬件测试平台结构

Fig. 10 Hardware test platform structure

在图 10 所示的硬件平台下,使用 PC 与串口实时观测数据传输情况,并利用 ISE 软件中的 Chipscope 功能观测算法捕获情况,表 2 给出了在不同接收信号电平下多组测试所得平均数据,据表中数据可见在通信误码率  $BER < 10^{-6}$  的任务指标下,算法极限灵敏度约为  $-130$  dBm,多次测得平均捕获时间均小于 100 ms。

表 2 算法测试数据

Tab. 2 Algorithm test data

接收信号电平/ dBm	信号捕获情况	平均捕获 时间/ms	平均误码率
-133	不可捕获		
-132	信号捕获情况不稳定		
-131	可稳定捕获	77.2	$3.634 \times 10^{-6}$
-130	可稳定捕获	65.7	$8.971 \times 10^{-7}$
-129	可稳定捕获	66.3	$6.085 \times 10^{-7}$

## 参考文献

[1] 陈晓宇, 戴光明, 王茂才, 等. 一种确定性星座对地覆盖计算方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(4): 55  
CHEN Xiaoyu, DAI Guangming, WANG Maocai, et al. Deterministic method for coverage of constellation to ground region [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(4): 55. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201509008

[2] 孟泽民, 徐兆斌, 金小军, 等. 微小卫星星间测距在轨零值标定方法及应用[J]. 宇航学报, 2016, 37(10): 1239

- MENG Zemin, XU Zhaobin, JIN Xiaojun, et al. On-orbit delay calibration of inter-satellite ranging system and its application for micro-satellite[J]. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(10): 1239. DOI:10.3873/j.issn.1000-1328.2016.10.012
- [3] 张仲楷, 崔高峰, 和梦敏, 等. 毫米波星间通信测距一体化技术研究[J]. *电讯技术*, 2023, 63(1): 24
- ZHANG Zhongkai, CUI Gaofeng, HE Mengmin, et al. Research on integrated technology of millimeter wave inter-satellite communication and ranging[J]. *Telecommunication Engineering*, 2023, 63(1): 24. DOI: 10.20079/j.issn.1001-893x.211026002
- [4] 冯永新, 任锦君, 刘芳. 双块零扩展截断相关的长码信号快速捕获算法[J]. *兵工学报*, 2019, 40(3): 539
- FENG Yongxin, REN Jinjun, LIU Fang. A fast acquisition algorithm with DBZP truncation correlation for the long code signal[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(3): 539. DOI:10.3969/j.issn.1000-1093.2019.03.012
- [5] 朱军, 李秋瑾, 李凯, 等. 卫星组网系统下的多普勒频移估计与补偿[J]. *北京邮电大学学报*, 2020, 43(3): 66
- ZHU Jun, LI Qiujin, LI Kai, et al. Doppler shift estimation and compensation under satellite networking system [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2020, 43(3): 66. DOI: 10.13190/j.jbupt.2019-178
- [6] 王爱珍, 栾美松, 胡姣, 等. 高码率扩频系统的快速捕获算法研究[J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(8): 1727
- WANG Aizhen, LUAN Meisong, HU Jiao, et al. Research on fast acquisition algorithm for high bit rate spread spectrum system[J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(8): 1727. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0109
- [7] 赵琳, 罗治斌, 丁继成, 等. GNSS 接收机导航滤波器辅助捕获技术[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(3): 165
- ZHAO Lin, LUO Zhibin, DING Jicheng, et al. Signal acquisition technique aided by navigation filter in GNSS receiver[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(3): 165. DOI: 10.11918/201810175
- [8] LI Ruitao, LI Songlin, LIU Gang. Research and implementation of GPS pseudo-code fast acquisition based on matched filter and FFT [C]//2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC). Xiamen, China: IEEE, 2020: 1. DOI: 10.1109/GNCC42960.2018.9019015.
- [9] RAO H, LIANG X F, SHEN M, et al. Fast acquisition scheme of the spread spectrum signals for satellite communications[J]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2020, 65(4): 449. DOI:10.1134/S1064226920040063
- [10] 卢迪, 郑世超. 混频前端抽取 FFT 伪码并行捕获算法[J]. *弹箭与制导学报*, 2017, 37(5): 131
- LU Di, ZHENG Shichao. FFT pseudo-code parallel acquisition algorithm for extracting at mixing front-end [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2017, 37(5): 131. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2017.05.031
- [11] 田拓, 张凤国, 陈奇东, 等. 一种改进的基于 FFT 的 GPS 弱信号捕获算法[J]. *全球定位系统*, 2016, 41(6): 30
- TIAN Tuo, ZHANG Fengguo, CHEN Qidong, et al. An improved weak GPS signal acquisition algorithm based on FFT [J]. *GNSS World of China*, 2016, 41(6): 30. DOI:10.13442/j.gnss.1008-9268.2016.06.007
- [12] SHEN Yuyao, WANG Yongqing, CHEN Jingyao, et al. High sensitivity acquisition algorithm for DSSS signal with data modulation[J]. *China Communications*, 2015, 12(4): 76. DOI: 10.1109/CC.2015.7114072.
- [13] 邬志影, 常青, 尚梦云. 基于 FFT 的二维并行长码捕获算法[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015, 13(5): 757
- WU Zhiying, CHANG Qing, SHANG Mengyun. Two-dimensional parallel long code acquisition algorithm based on FFT[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(5): 757. DOI: 10.11805/TKYDA201505.0757
- [14] 莫杭斌. 微纳卫星星间链路可靠通联设计与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2020
- MO Hangbin. Design and implementation of reliable communication in inter-satellite link of micro-nano satellites[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. DOI:10.27461/d.cnki.gzjdx.2020.001369
- [15] 瞿智, 杨俊, 陈建云. 伪码测距抗干扰容限分析[J]. *宇航学报*, 2014, 35(12): 1450
- QU Zhi, YANG Jun, CHEN Jianyun. Analysis of anti-jamming margin of pseudo-random code ranging[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(12): 1450. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2014.12.015
- [16] TA T H, DOVIS F, MARGARIA D, et al. Comparative study on joint data/pilot strategies for high sensitivity Galileo E1 open service signal acquisition [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(6): 764. DOI:10.1049/iet-rsn.2009.0256

(编辑 张红)