

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.08.011

一种基于天基测控的扩频安控终端算法设计

李召飞

(中国西南电子技术研究所 第三事业部, 成都 610036)

摘要:扩频安控终端采用扩频体制和传统的捕获同步算法安控处理时延长,无法满足实时性要求。因此,高可靠性、快速响应同步算法的构建是扩频安控终端的关键技术。扩频安控终端同步算法首先采用基于惯性导航+卫星导航信息辅助的部分匹配滤波与分段平均 FFT 谱估计结合的二维捕获算法,将惯性导航+卫星导航上报的运动状态信息转化为多普勒频偏与多普勒频偏变化率的估计值,有效缩小多普勒频偏范围,缩短了捕获时间,分段平均 FFT 谱估计降低了功率谱估计方差。载波跟踪环采用二阶锁频环辅助三阶锁相环,实现高机动、大范围跟踪。在此基础上,载波跟踪环、伪码跟踪环增加了防假锁判决机制,可快速跳出假锁状态。工程应用表明:采用所提基于惯性导航+卫星导航信息辅助的部分匹配滤波与分段平均 FFT 谱估计结合的二维捕获算法和二阶锁频环辅助三阶锁相环的载波跟踪算法,扩频安控终端的安控处理时延 ≤ 500 ms,满足实时性要求。

关键词:天基测控;扩频安控终端;安控处理时延;关键技术;实时性

中图分类号:TN914.53

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2024)08-112-11

An algorithm design of the spread spectrum security terminal based on space-based TT & C system

LI Zhaofei

(Third Division, Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, P. R. China)

Abstract: In space-based TT&C receivers using spread spectrum system, the traditional acquisition synchronization algorithms for spread spectrum security terminal have extended security control processing times and failed to meet real-time requirements. Developing a high-reliability and fast-response synchronization algorithm is crucial. A two-dimensional acquisition algorithm is employed and it integrates partial-matched filtering, which bases on inertial and satellite navigation information, with piecewise average FFT spectrum estimation. By translating the motion status information reported by inertial and satellite navigation into Doppler frequency offset and Doppler frequency offset change rate estimation values, the Doppler frequency offset range is effectively reduced, the acquisition time is shortened, and piecewise average FFT spectrum estimation decreases the variance of power spectrum estimation. Furthermore, a second-order frequency-locked loop assisted by a third-order phase-locked loop is used in the carrier tracking loop to enhance maneuverability and tracking range. An anti-false lock decision mechanism in both the carrier and pseudo code tracking loops ensures quick escape from false lock states. Engineering applications demonstrate that this proposed algorithm results in a safety control

收稿日期:2023-10-22

基金项目:十三五装备预先研究项目(41418060203)。

Supported by Thirteenth Five Year Plan Equipment Pre-research Project(41418060203).

作者简介:李召飞(1983—),女,硕士研究生,主要从事航天外测、测控类信号与信息处理方向研究,(E-mail) lizhaofei2006@163.com。

processing delay of no more than 500 ms for the spread spectrum safety control terminal, thus meeting real-time requirements.

Keywords: space-based TT&C system; spread spectrum security terminal; security processing delay; key technology; real-time

目前,中国航天器的安全控制功能主要基于陆海基安控站与航天器上加载的安控接收机协同工作。采用专用频段、专用体制,存在作用距离受限、专用频段使用时限过长、安全性下降、抗电磁干扰差、测量弧段受限等问题。航天器向着高机动、高可靠、大范围、全覆盖的特点发展,传统陆海基测控模式,难以适应航天器测控的发展需求。

天基测控模式^[1-3]的出现,可以为目前传统测控中存在的测量弧段受限问题提供解决方案,这对降低测控费用,拓展测控系统的应用有重要意义。传统的安控接收机从接收陆海基安控站发送的射频信号到输出安控指令,安控处理时延要求 ≤ 500 ms。在天基测控模式下,扩频安控终端(作用等同于安控接收机,在天基测控模式下通常称为扩频安控终端)采用扩频体制^[4-6],捕获同步过程更复杂,传统捕获同步算法的同步时间约2~5 s,无法满足安全控制功能中安控处理时延 ≤ 500 ms的实时性要求。同时,航天器加载的扩频安控终端要求小型化、低功耗,且软件资源受限,传统捕获同步算法的资源占用量也无法满足扩频安控终端的资源使用要求。

综上所述,在确保高可靠性指标要求条件下,如何选择最节省资源的软件处理算法,优化链路的同步时间,是基于天基测控扩频安控终端的关键技术。为此,笔者从算法层面进行设计,研究扩频安控终端在低功耗、低资源消耗、高可靠性要求下,如何利用FPGA(field programmable gate array)算法达到扩频安控终端的实时性要求。

1 算法搭建

扩频安控终端接收信号满足中继卫星信号传输规范,可表示为

$$V(t) = APN(t)D(t)\sin(2\pi f_0 t + \theta), \quad (1)$$

式中: A 为信号振幅; $PN(t)$ 为伪码(又称PN码); $D(t)$ 为调制信息; f_0 为载波中心频率; θ 为载波初始相位,信息采用卷积编码。

扩频安控终端算法需要完成4个功能:1)载波、伪码的捕获^[7];2)载波、伪码的跟踪;3)位同步以及维特比译码;4)安控译码。根据以上功能,算法由快速捕获^[8]、载波跟踪环、伪码跟踪环、位同步环、Viterbi译码、帧同步、安控译码组成,原理如图1所示,其中,位同步和维特比译码与其他扩频算法中的处理方式相同。

扩频安控终端接收射频信号,经射频前端处理后转变为数字中频信号,中频信号在FPGA内经第1级AGC后,送入快速捕获算法单元,完成伪码和载波捕获,输出伪码全“1”和载波多普勒值。载波多普勒值送入本地NCO,产生2路正交的本地载波

$$\begin{cases} l_i(t) = \sin(2\pi f_0 t + \theta_0), \\ l_q(t) = \cos(2\pi f_0 t + \theta_0), \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_0 为本地载波中心频率; θ_0 为本地载波初始相位。

中频信号与本地载波信号经过乘法器及I.D滤波器后,可得

$$\begin{cases} Z_i(t) = k_d D_i(t) PN(t) \cos(\phi), \\ Z_q(t) = k_d D_q(t) PN(t) \sin(\phi), \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_d 为鉴相增益; ϕ 为本地载波与接收信号的相位差,载波同步后 $\phi \approx 0$ 。

快速捕获算法单元的伪码全“1”信号送入伪码跟踪环,由伪码跟踪环输出本地PN码,本地PN码与解调后信号 $Z_i(t)$ 和 $Z_q(t)$ 做异或处理,完成接收信号的解扩,可得

$$\begin{cases} U_i(t) = k_d D_i(t) \cos(\phi) \approx k_d D_i(t), \\ U_q(t) = k_d D_q(t) \sin(\phi) \approx 0. \end{cases} \quad (4)$$

$U_i(t)$ 经过位同步处理后,在FPGA内部完成维特比译码,译码后数据送入安控译码算法进行安控指令判决,输出安控指令信号。

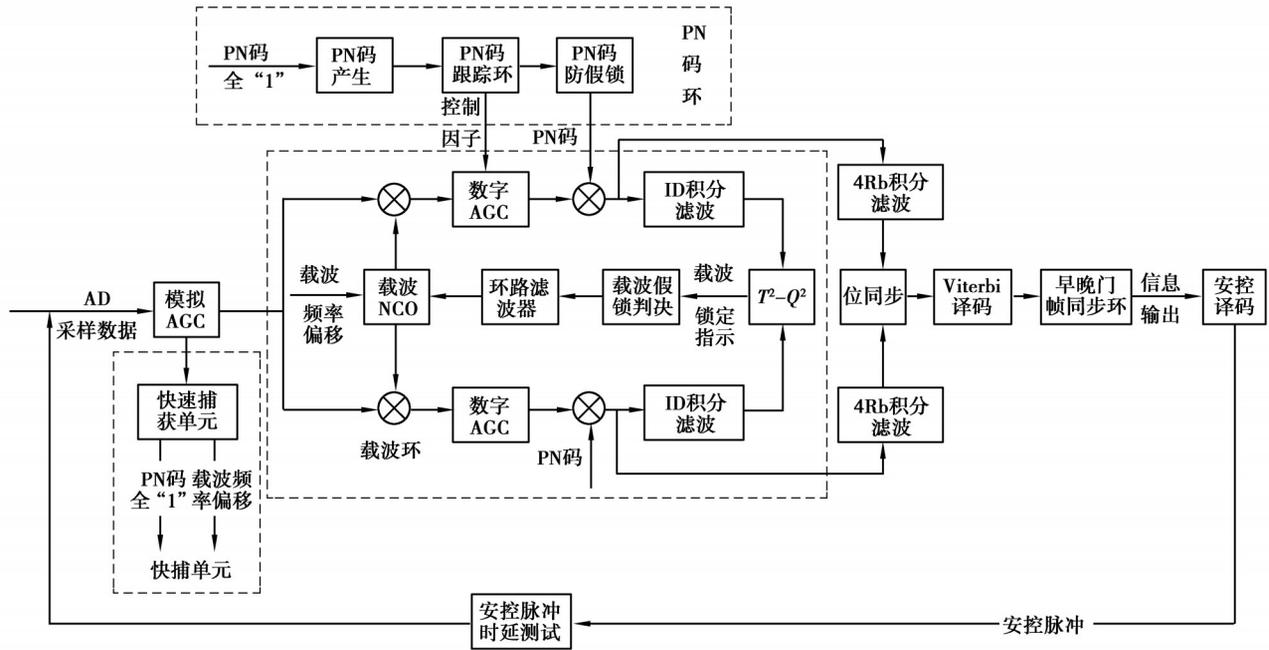


图 1 扩频安控终端算法原理框图
Fig. 1 Block diagram of terminal algorithm

1.1 快速捕获单元

信号捕获采用了基于惯性导航+卫星导航信息辅助^[9-10]的快速捕获技术,实现过程如下:利用惯性导航和卫星导航系统,获得测控目标与中继卫星之间的相对速度、相对加速度等运动状态信息^[11],然后将获得的运动状态信息转化为多普勒频偏和多普勒频偏变化率的估计值作为引导值。为了同时完成伪码和载波的捕获,使用部分匹配滤波与分段平均 FFT 谱估计结合的二维捕获技术。该技术在最大多普勒频偏 $\leq \pm 600$ kHz 的情况下,保证载波捕获精度 $\leq \pm 200$ Hz,伪码“全 1”误差不超过 ± 1 个码片,部分匹配滤波算法的流程如图 2 所示。

把 L 个均值为 μ 、方差为 σ^2 的独立随机变量 x_1, x_2, \dots, x_L 看作新的随机变量 $x = (x_1 + x_2 + \dots + x_L) / L$, 那么 x 的均值还是 μ , 而方差变成了 σ^2 / L , 相比原来缩小了 L 倍。平均法按照以上原理把采样数据 $x_N(n)$ 分成 L 段, 每段长度都是 T , 即 $N = LT$, 然后对第 i 段数据乘以矩形窗, 得到

$$x_N^m = x_N[n + (m - 1)T] d_1[n + (m - 1)T], \tag{5}$$

式中: $0 \leq n \leq T - 1, 1 \leq m \leq L; d_1(n)$ 是长度为 T 的矩形窗。

分别计算每段的功率谱, 可得

$$P^m(\omega) = \frac{1}{T} \left| \sum_{n=0}^{T-1} x_N^m(n) e^{-j\omega n} \right|^2. \tag{6}$$

将 $P^m(\omega)$ 相加, 然后取平均, 可以得到平均功率谱 $\bar{P}(\omega)$

$$\bar{P}(\omega) = \frac{1}{L} \sum_{m=1}^L P^m(\omega) = \frac{1}{LT} \sum_{m=1}^L \left| \sum_{n=0}^{T-1} x_N^m(n) e^{-j\omega n} \right|^2. \tag{7}$$

假设 $x_N(n)$ 是白噪声序列, 那么由式 (7) 可以得到平均功率谱的方差值。

$$\text{var}[\bar{P}(\omega)] = \frac{\sigma^4}{L} \left| \frac{\sin^2(\omega N / L)}{\left(\frac{N}{L}\right)^2 \sin^2(\omega)} + 1 \right|. \tag{8}$$

图 3 展示了分段平均 FFT 谱估计和直接 FFT 谱估计的方差值对比, 由图可以看出分段平均 FFT 谱估计的方差较直接 FFT 谱估计有改善, 由式 (8) 可知改善值取决于分段值的大小。

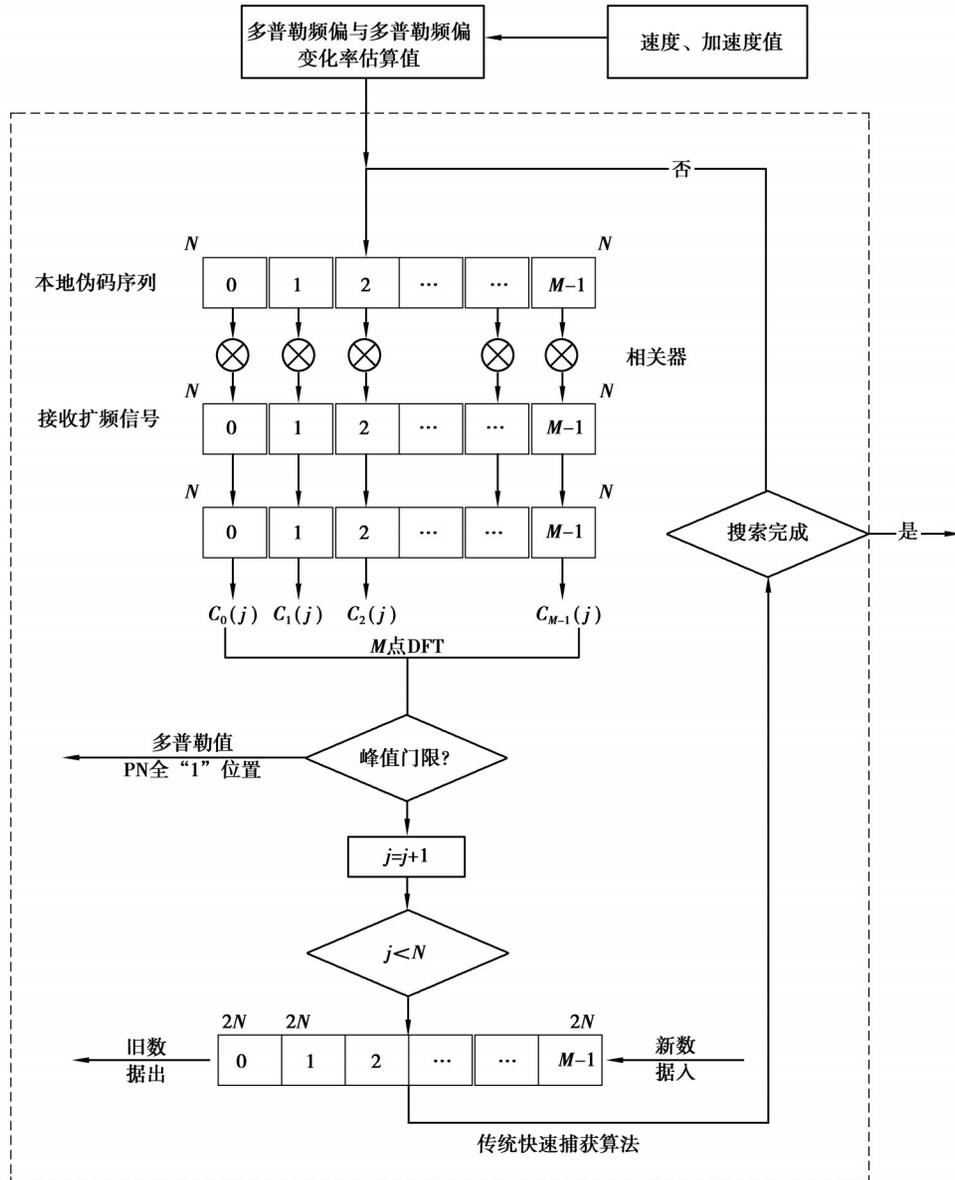
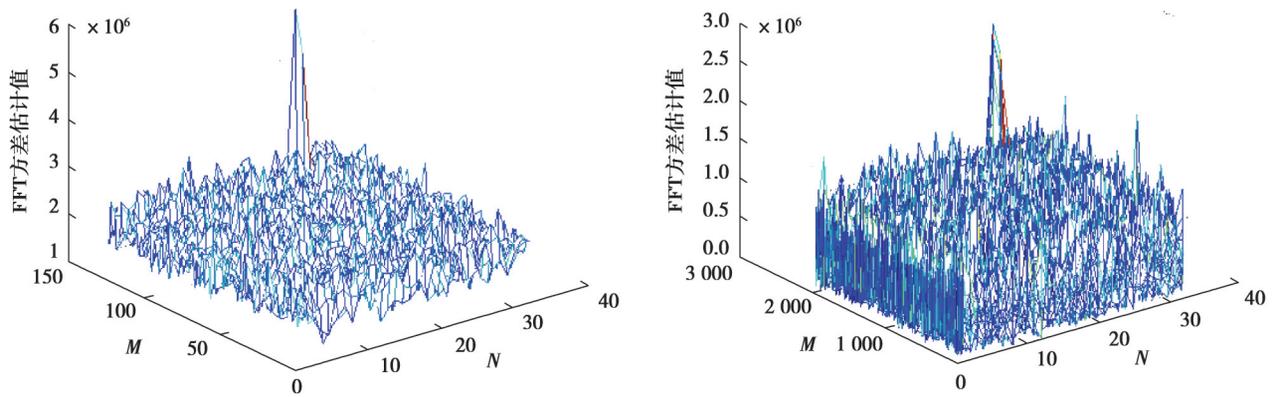


图 2 快速捕获算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the fast capture algorithm



(a) $N=32, M=2\ 048, T=128$ 分段平均FFT方差估计

(b) $N=32, M=2\ 048$ 直接FFT方差估计

图 3 分段平均与直接FFT谱估计方差对比图

Fig. 3 Comparison of variance between piecewise mean and direct FFT spectrum estimation

改进型算法与传统快速捕获算法^[12]的对比表参见表1,改进型算法有以下优势:1)有效缩小了多普勒频偏范围,将最大多普勒频偏由 ± 600 kHz压缩为 ± 10 kHz;2)极大减少了软件存储资源,算法在一片FPGA(XC7K325T)即可实现,无需额外的外挂存储器;3)平均FFT较直接FFT谱估计可显著减少功率谱估计的方差;4)提高了捕获精度,缩短了捕获时间。

表1 改进型与传统快速捕获算法对比表

Table 1 Comparison table of improved and traditional fast capture algorithm

| 快速捕获算法 | 多普勒频偏范围/kHz | 存储资源 | 捕获概率>90% 捕获时间/ms | 捕获精度/kHz |
|--------|-------------|----------------------------|---------------------|-----------|
| 传统型 | ± 600 | 64 k×364 bit 4 k×32 bit | 210 | ± 2.0 |
| 改进型 | ± 10 | 64 k×64 bit 4 k×32 bit | 70 | ± 0.2 |

1.2 载波跟踪环

载波跟踪环使用快捕单元捕获的载波多普勒作为初始值,使用二阶锁频环辅助三阶锁相环^[13-14]完成载波跟踪。三阶锁相环用较窄的噪声带宽(< 50 Hz)可以准确跟踪频率斜升、频率阶跃和相位阶跃激励,也能在低信噪比得到精确的载波相位值,但它的缺点是对动态应力不够鲁棒且有条件稳定。二阶锁频环采用较宽的噪声带宽,能更好适应用户的高动态应力和射频、电磁等干扰,且不受数据比特跳变影响,缺点是输出的载波相位值不太精确。快速捕获单元给出的接收信号载波频率估计值与实际值的偏差 $< \pm 200$ Hz时,载波跟踪环先以二阶锁频环锁定信号频率,再逐步转换为锁频环辅助的锁相环,最后完全变成三阶锁相环。载波跟踪环的实现如图4所示,载波相位跟踪误差的仿真如图5所示,本地NCO再生的sin支路频谱如图6所示。

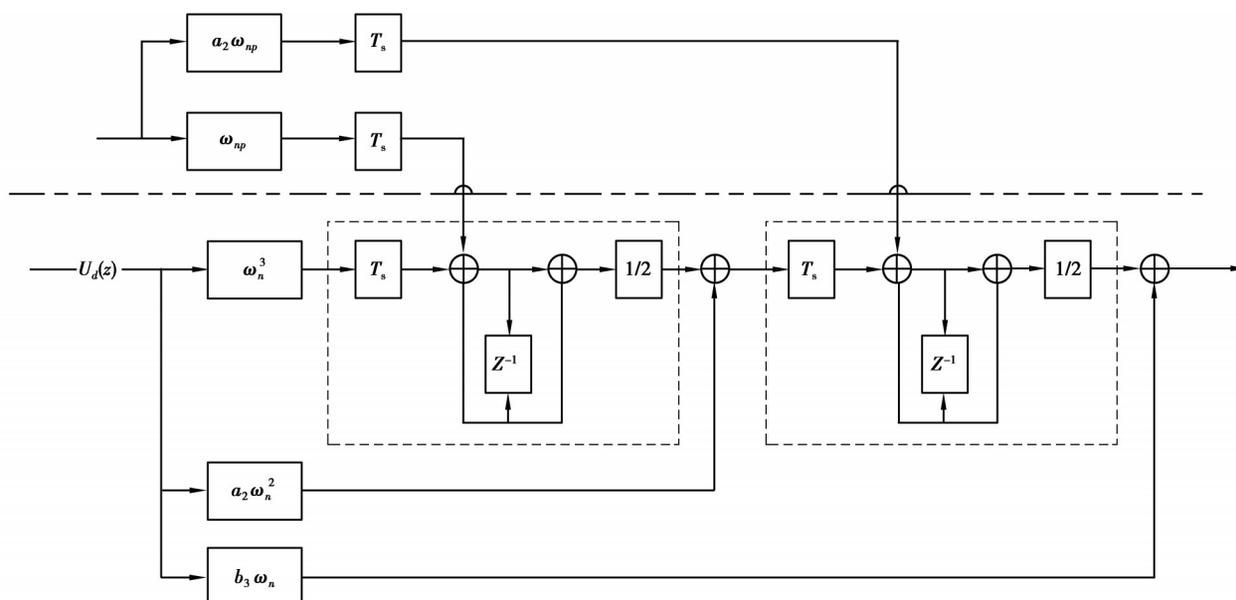


图4 载波跟踪环实现框图

Fig. 4 Block diagram of the carrier tracking loop

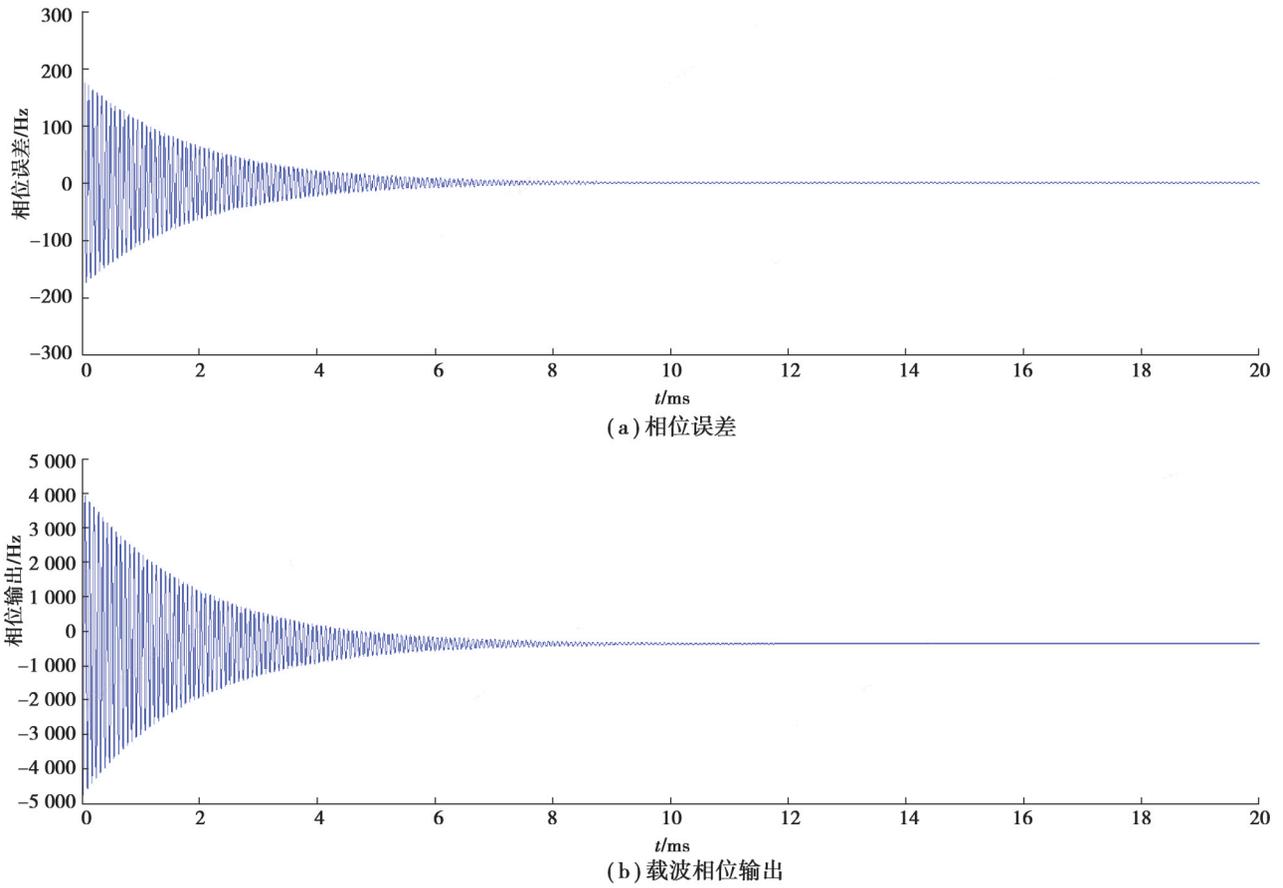


图 5 载波跟踪环的载波相位跟踪误差

Fig. 5 Carrier phase tracking error of the carrier loop

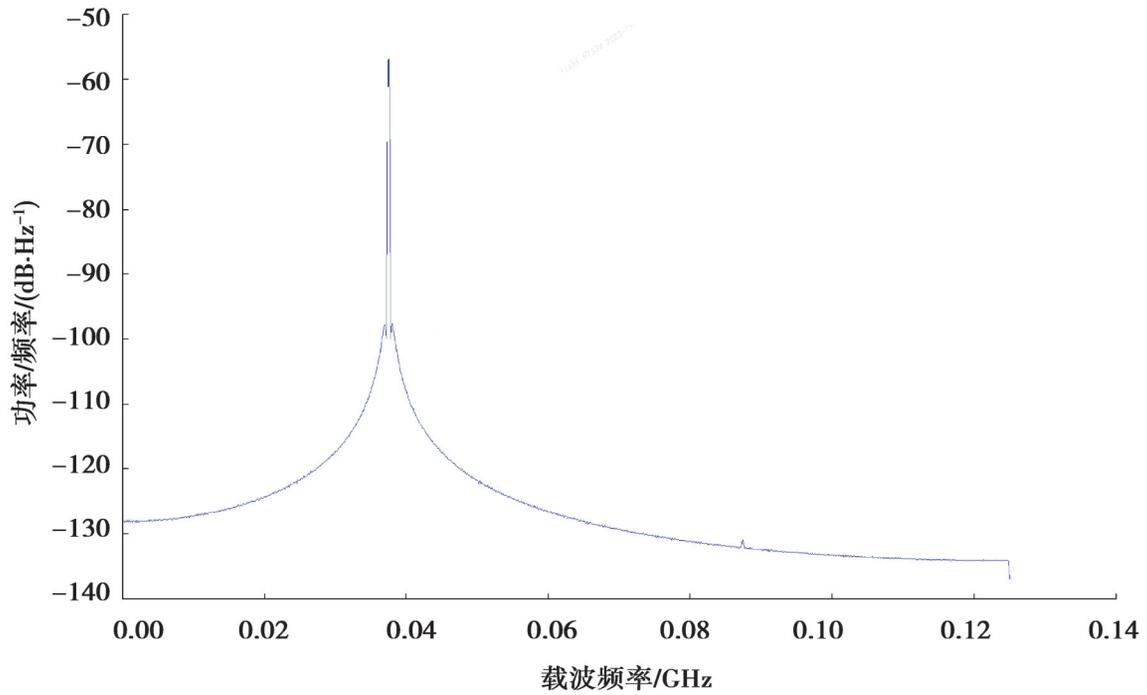


图 6 载波跟踪环本地 NCO 的 sin 支路频谱

Fig. 6 Spectrum of the sin branch of the carrier loop local NCO

锁频环采用叉积鉴频,鉴频器的计算公式

$$\begin{cases} \omega_e(n) = \frac{P_{\text{cross}} \cdot \text{sign}(P_{\text{dot}})}{t(n) - t(n-1)}, \\ P_{\text{dot}} = I_p(n-1)I_p(n) + Q_p(n-1)Q_p(n), \\ P_{\text{cross}} = I_p(n-1)Q_p(n) - Q_p(n-1)I_p(n), \end{cases} \quad (9)$$

式中： P_{dot} 表示点积； P_{cross} 表示叉积； $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。

锁频环采用式(9)的鉴频器后，牵引范围为 $\frac{-1}{4T_{\text{coh}}} \sim \frac{+1}{4T_{\text{coh}}}$ ， T_{coh} 为载波跟踪环中的相干积分时间。连续时间域三阶锁相环的环路滤波器传递函数为式(10)，离散数字域三阶锁相环的环路滤波器传递函数为式(11)。

$$F(S) = \frac{1}{k} \left(b_3 \omega_n + \frac{a_3 \omega_n^2}{S} + \frac{\omega_n^2}{S^2} \right), \quad (10)$$

$$\text{He}(Z) = \frac{(1 - z^{-1})^3}{(1 - Z^{-1})^3 + T_s b_0 Z^{-1} + T_s b_1 Z^{-2} + T_s b_2 Z^{-2}}, \quad (11)$$

式中：工程应用中滤波器最优参数取值 $a_3=1.1, b_3=2.4$ ；环路噪声带宽 B_l 根据接收信号电平和用户动态应力合理选值。

1.3 防假锁判决机制

快捕单元捕获的伪码“全1”，误差 $\leq \pm 1$ 个码片。算法中采用了4路伪码相关器^[15]进行伪码跟踪，并取峰值最大的1路伪码完成算法中的解扩处理，这种处理方式缩短了伪码同步时间。4路伪码跟踪环同时进行单 Δ 环跟踪^[16]，每路伪码间隔是1/2码片。多路伪码相关器把伪码跟踪时间减少到单路伪码相关器同步时间的1/4，同时，为防假锁判决机制提供了判据，具体实现方式见图7，伪码防假锁机制的流程见图8。

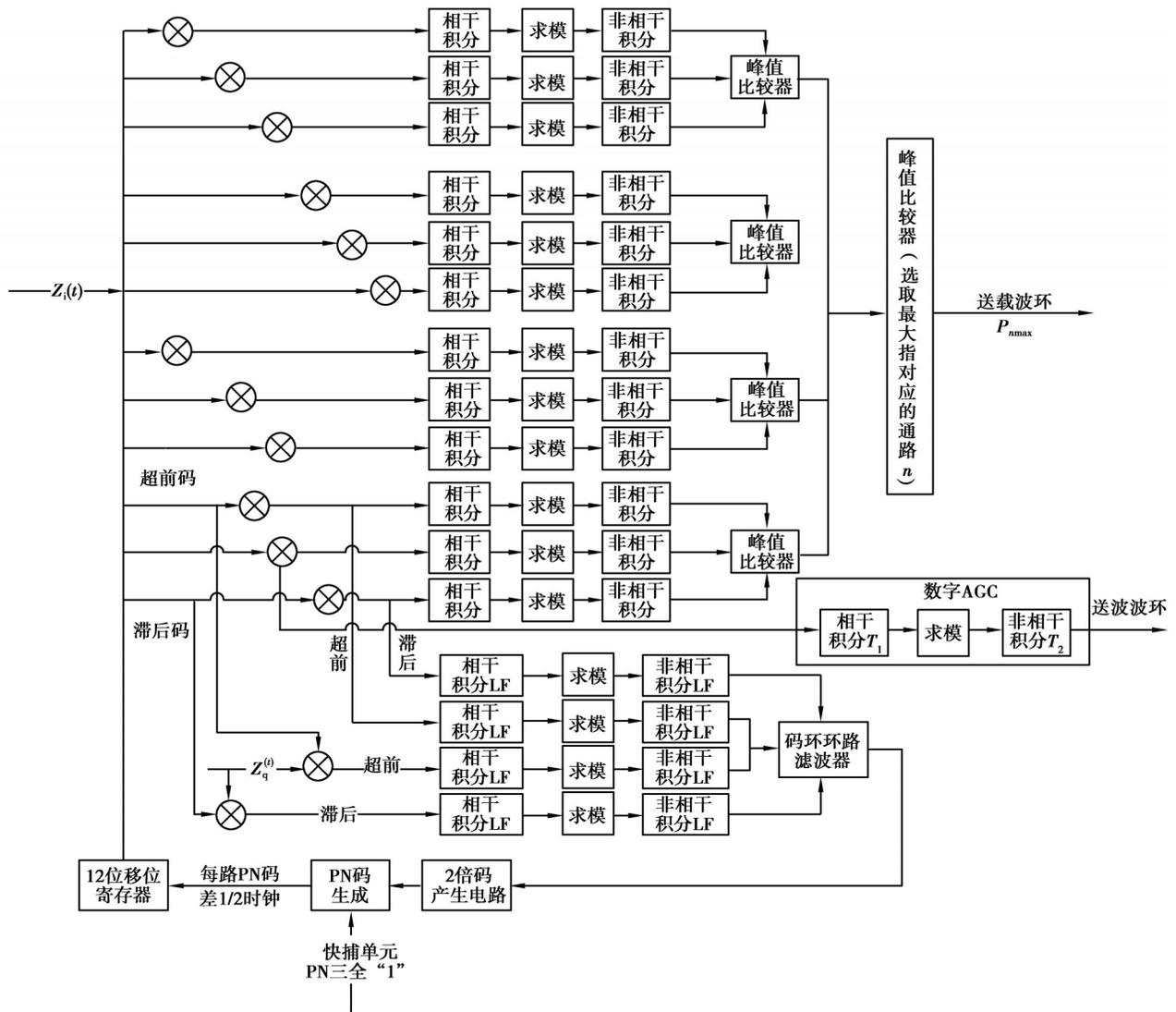


图7 伪码跟踪环实现框图

Fig. 7 Block diagram of the PN tracking loop

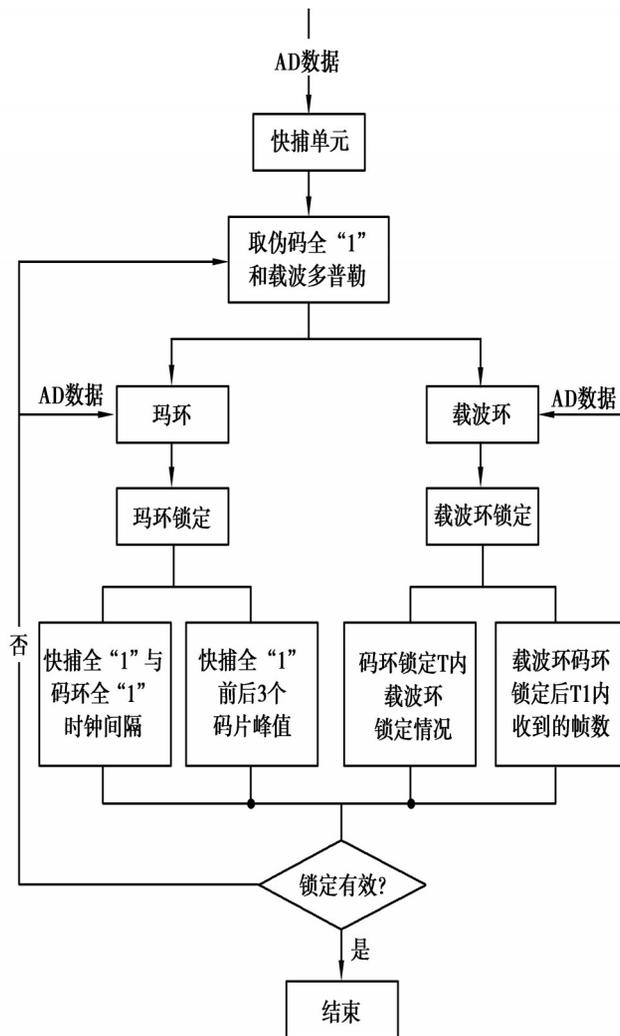


图 8 防假锁流程图

Fig. 8 Flowchart of error locking judge

为防止高信噪比下伪码跟踪环和载波跟踪环^[17-18]产生假锁现象,算法设计时增加了防假锁判决机制,可以实现假锁后快速识别并迅速重新锁定,缩短算法的同步时间。高信噪比的假锁分为伪码跟踪环假锁和载波跟踪环假锁 2 种,防假锁判决算法在伪码跟踪环和载波跟踪环刚开始锁定时启用,等环路稳定工作后停用。

伪码跟踪环的防假锁鉴定包含 2 种情况:1)计算快捕单元的伪码全“1”和伪码跟踪环全“1”之间的时间间隔是否 $\leq \pm 2$ 个码钟,如果 > 2 个码钟则视为为假锁;2)将快捕单元的伪码全“1”、超前、滞后 1/2 和 1 个码片的 4 路 PN 码的相关峰值和当前相关峰值比较,如果有任意 1 路峰值高于当前相关峰值,视为伪码跟踪环假锁。

载波跟踪环的防假锁鉴定包含 2 种情况:1)伪码跟踪环锁定后 T_1 时间内载波跟踪环未锁定,视为载波跟踪环工作异常;2)伪码跟踪环、载波跟踪环伪码跟踪环都锁定的情况下在 T_2 时间内收到的帧头计数值小于设定的门限时,视为载波跟踪环假锁。

2 算法的工程验证

在某型号小型化扩频安控终端运行扩频安控终端算法,验证了安控处理时延 ≤ 500 ms,满足传统安全控制功能的实时性要求。小型化扩频安控终端的主要技术指标如下:接收灵敏度 -152 dBW;多普勒 $\leq \pm 600$ kHz;多普勒变化率 $\leq \pm 120$ kHz/s;安控处理时延 ≤ 500 ms,算法中各单元的时间分配设计见表 2。

表2 各单元时间分配

| 快捕单元 | 伪码跟踪环 | 载波跟踪环 | 位同步 Viterbi 译码 | 安控译码 | 总时间 |
|------|-------|-------|----------------|------|-----|
| 70 | 40 | 32 | 30 | 60 | 302 |

系统匹配试验成功完成后,小型化扩频安控终端在沙河地面站进行了中继卫星对接试验,如图9和图10所示。在不同信噪比下测试安控处理时延性能,结果如表3所示。从实验结果看,不同信噪比下的时延值都<500 ms,实时性满足传统安控体制的要求。



图9 测试场景图

Fig. 9 Test scenario diagram



图10 中继卫星沙河地面站对接试验

Fig. 10 Relay satellite Shahe ground station docking test

表3 实验数据统计

Table 3 Statistical analysis of experimental data

| 序号 | $\frac{c}{N_0} = 45/(\text{dB}\cdot\text{Hz})$ | $\frac{c}{N_0} = 55/(\text{dB}\cdot\text{Hz})$ | $\frac{c}{N_0} = 65/(\text{dB}\cdot\text{Hz})$ |
|----|--|--|--|
| | 输出延时/ms | 输出延时/ms | 输出延时/ms |
| 1 | 253 | 287 | 233 |
| 2 | 285 | 296 | 265 |
| 3 | 248 | 244 | 228 |
| 4 | 312 | 271 | 245 |
| 5 | 290 | 340 | 270 |
| 6 | 389 | 382 | 294 |
| 7 | 221 | 256 | 313 |
| 8 | 329 | 298 | 320 |
| 9 | 346 | 219 | 221 |
| 10 | 224 | 271 | 245 |
| 11 | 326 | 308 | 298 |
| 12 | 375 | 277 | 484 |

目前,国内中继终端产品有TDRSS接收机、S频段中继终端、Ka频段中继终端,以上产品的安控处理时延统计如表4所示。其中,除Ka频段中继终端使用了传统快速捕获算法外,其余产品均采用扣钟滑动相关法。且所有产品的伪码跟踪环都是用单路伪码相关器,未使用防假锁判决机制。与这些产品相比,本文提出的扩频安控终端的软件算法有明显优势,安控处理时延缩短到500 ms以内,完全满足传统安控体制的实时性要求。

表 4 国内中继终端数据统计
Table 4 Domestic relay terminal data statistics

| 产品名称 | 时延值/ms | $\frac{c}{N_0}/(\text{dB}\cdot\text{Hz})$ |
|-----------|------------|---|
| TDRSS 接收机 | 5 000 | ≥ 45 |
| S 频段中继终端 | 5 000 | ≥ 45 |
| Ka 频段中继 | 1 200 | ≥ 45 |
| 本算法 | ≤ 500 | ≥ 45 |

3 结 论

采用天基测控模式可以解决陆海基测控系统的作用距离受限、安全性下降等问题,但必须满足实时性高的要求,而天基测控模式采用扩频体制,捕获同步时间长,无法采用传统的同步算法。笔者从高可靠性、低资源消耗、快速响应同步算法的构建入手,提出基于天基测控模式扩频安控终端的软件算法设计:1)采用基于惯性导航+卫星导航信息辅助的部分匹配滤波与分段平均 FFT 谱估计结合的二维捕获算法完成载波和伪码同步,该捕获算法缩短了同步时间、提高捕获精准度、减少资源消耗;2)采用二阶锁频环辅助三阶锁相环的载波跟踪环,实现高机动、大范围跟踪;3)对载波跟踪环、伪码跟踪环增加了防假锁判决机制,可快速跳出假锁状态,结合传统安全控制 500 ms 的实时性要求,对算法中的功能模块进行合理的时间分配。算法工程验证表明:使用该算法后,扩频安控终端的安控处理时延 ≤ 500 ms,实时性满足传统安全控制功能要求。算法在 1 片 XC7K325T 运行,满足航天器加载产品低功耗、低资源消耗、高可靠性要求。

参考文献

- [1] 李琪, 宁金枝, 杜海龙, 等. 一种遥测外测安控一体化火箭天基测控系统设计[J]. 航天器工程, 2021, 30(6): 82-88.
Li Q, Ning J Z, Du H L, et al. A design of space-based integrated system of telemetry track and command for launch vehicles[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(6): 82-88. (in Chinese)
- [2] Wang Y, Luo J R, Gu X Q, et al. Research on the reconfiguration method of space-based exploration satellite constellations for moving target tracking at sea[J]. Applied Sciences, 2023, 13(18): 10103.
- [3] 李于衡, 孙海忠, 王旭康. 近地卫星天基测控现状研究[J]. 无线电工程, 2020, 50(1): 1-9.
Li Y H, Sun H Z, Wang X K. On the space-based TT & C service for LEO satellites[J]. Radio Engineering, 2020, 50(1): 1-9. (in Chinese)
- [4] Ma L G, Zhang X H, Li Z, et al. Overview of commonly used spread spectrum techniques[J]. Academic Journal of Engineering and Technology Science, 2023, 6(12): 83-92.
- [5] Choi H, Moon H. Blind estimation of spreading sequence and data bits in direct-sequence spread spectrum communication systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 148066-148074.
- [6] Shi Z K, Zhang Y S, Qian Z Y, et al. Compressive narrowband interference detection and parameter estimation in direct sequence spread spectrum communication[J]. IET Signal Processing, 2022, 16(1): 14-25.
- [7] Shen B, Wang J X. Chip rate and pseudo-noise sequence estimation for direct sequence spread spectrum signals[J]. IET Signal Processing, 2017, 11(6): 727-733.
- [8] 翟高伟, 梁晨光, 赵锦瑾, 等. 基于天链卫星的箭载 Ka 频段中继用户终端设计与实现[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(4): 7-14.
Zhai G W, Liang C G, Zhao J J, et al. The design and implementation of general Ka-band terminal based on RDRSS[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(4): 7-14. (in Chinese)
- [9] Brack A. Reliable GPS+BDS RTK positioning with partial ambiguity resolution[J]. GPS Solutions, 2017, 21(3): 1083-1092.
- [10] Zhou H L, Wang J, Widener M, et al. Examining the relationship between active transport and exposure to streetscape

- diversity during travel: a study using GPS data and street view imagery[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2024, 110: 102105.
- [11] 顾保国, 陈阳. 一种基于数据融合的目标跟踪方法[J]. *重庆大学学报*, 2022, 45(11): 127-134.
Gu B G, Chen Y. A target tracking method based on data fusion[J]. *Journal of Chongqing University*, 2022, 45(11): 127-134. (in Chinese)
- [12] 金磊, 曾富华, 王娜. 信息辅助快速捕获的抗欺骗干扰技术[J]. *指挥与控制学报*, 2020, 6(1): 81-86.
Jin L, Zeng F H, Wang N. Anti-deception jamming technology of information-aided fast acquisition[J]. *Journal of Command and Control*, 2020, 6(1): 81-86. (in Chinese)
- [13] 张凯, 冯月婷, 李林瞳, 等. 高灵敏度载波捕获与跟踪算法设计[J]. *通信技术*, 2020, 53(6): 1352-1358.
Zhang K, Feng Y T, Li L T, et al. Design of carrier acquisition and tracking algorithm with high sensitivity[J]. *Communications Technology*, 2020, 53(6): 1352-1358. (in Chinese)
- [14] Yang R, Huang J H, Zhan X Q, et al. Decentralized FLL-assisted PLL design for robust GNSS carrier tracking[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(10): 3379-3383.
- [15] Lin J C. Noncoherent sequential PN code acquisition using sliding correlation for chip-asynchronous direct-sequence spread-spectrum communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(4): 664-676.
- [16] 董国英, 芮正雄, 葛志闪, 等. 一种高动态微弱扩频信号捕获方法[J]. *制导与引信*, 2021, 42(3): 39-42, 49.
Dong G Y, Rui Z X, Ge Z S, et al. Acquisition method of weak spread spectrum signal under high dynamic condition[J]. *Guidance & Fuze*, 2021, 42(3): 39-42, 49. (in Chinese)
- [17] Vilà-Valls J, Navarro M, Closas P, et al. Synchronization challenges in deep space communications[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2019, 34(1): 16-27.
- [18] 朱国富. 扩频体制低轨卫星通信信号捕获与跟踪系统设计[J]. *电讯技术*, 2022, 62(5): 576-584.
Zhu G F. Design of a spread spectrum LEO satellite signal acquisition and tracking system[J]. *Telecommunication Engineering*, 2022, 62(5): 576-584. (in Chinese)

(编辑 侯 湘)