

引用格式:杨久东,王文军,孙跃.高灵敏度GPS信号快速捕获新方法[J].电光与控制,2018,25(6):56-59,71. YANG J D, WANG W J, SUN Y. A new high sensitivity method for fast acquisition of GPS signals[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(6):56-59, 71.

## 高灵敏度GPS信号快速捕获新方法

杨久东, 王文军, 孙跃  
(华北理工大学矿业工程学院, 河北唐山 063210)

**摘要:**研究了弱信号条件下GPS软件接收机的C/A码的快速捕获问题。提出了一种高灵敏度快速捕获新算法,该方法首先采用平均相关技术降低C/A码的自相关损耗,基于载频误差补偿技术减小C/A码累积误差;然后利用叠加相关方法降低相干累积运算的复杂度,通过循环移位减小频率步进搜索的时间消耗。实验结果表明,该算法能够实现微弱GPS信号捕获,且运算量适中,捕获概率较高。

**关键词:** 全球定位系统; 信号捕获; 高灵敏度; 低复杂度

**中图分类号:** TN967.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.06.013

## A New High Sensitivity Method for Fast Acquisition of GPS Signals

YANG Jiu-dong, WANG Wen-jun, SUN Yue

(School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

**Abstract:** Aiming at the fast C/A code acquisition of GPS software receiver under weak signal conditions, a new fast acquisition algorithm with high sensitivity is proposed. Firstly, the autocorrelation loss and accumulative error of C/A codes are reduced respectively by using the average correlation technique and the carrier frequency error compensation technique. Then, the complexity of coherent cumulative operations is reduced by use of superposition correlation, and the time-consuming of frequency stepping search is decreased by cyclic shift. Experimental results show that the proposed algorithm can realize the acquisition of weak GPS signals, and has moderate computational complexity and high acquisition probability, which is suitable for the high-sensitivity software receiver.

**Key words:** GPS; signal acquisition; high sensitivity; low complexity

### 0 引言

全球定位系统(Global Positioning System, GPS)泛指美国于1964年投入使用的一种全球卫星定位系统,它实现了在地球任何地方都可以享用实时、可靠、精确的定位服务,而GPS接收机是其实现精确快速定位的关键。相比于硬件接收机,软件接收机将所有信号处理过程都移植到可编程的微处理器中实现,具有灵活性高、可扩展性强和升级方便等显著优势。例如,要进行算法测试或者当GPS导航电文发生变化时,软件接收机只需对内部的软件程序进行升级,而无需对系统整体进行大的改动,就可以完成这些需求<sup>[1-3]</sup>。

GPS信号捕获问题是一个在多普勒频率域和C/A码相位域的二维搜索问题<sup>[4]</sup>。早期GPS接收机通常采用滑动相关捕获算法,该算法是一种串行捕获算法,运算量很大,捕获时间较长<sup>[5]</sup>。为了提高捕获速度,基于FFT的并行快速捕获框架被提出。并行捕获算法的捕获速度得到很大提升,但这并没有解决弱信号条件下的信号捕获问题<sup>[6-8]</sup>。文献[9]提出基于分段移位平均周期图的高动态GPS信号捕获算法,实现了低信噪比下大动态范围的GPS信号捕获,但算法的复杂度较高。文献[10]设计了一种并行频域搜索捕获算法,该算法在同一时间对所有码时延进行处理,可以减少运算量,但是其对弱信号的捕获能力较差。文献[11]采用差分相干累积,并引入峰值比作为判决变量,实现了GPS信号的精密捕获。

针对弱信号条件下的GPS信号捕获问题,本文提出了一种兼顾捕获灵敏度与捕获速度的捕获算法。

收稿日期:2017-11-15

修回日期:2018-01-09

基金项目:国家自然科学基金(41574072)

作者简介:杨久东(1972—),男,河北滦南人,博士,副教授,研究方向为空间大地测量。

## 1 算法原理

进入 GPS 软件接收机的基带信号可表示为

$$x(t_n) = AD_k(t_n)C_k[(1 + \eta)(t_n - t_\tau)] \cos[(\omega_{IF} - \omega_D)t_n + \varphi_0] + v(t_n) \quad (1)$$

式中:  $A$  为信号幅度;  $t_n$  为采样后的时间序列;  $D_k(t_n)$  为间隔 20 ms 在  $\pm 1$  中随机取值的 GPS 导航电文数据;  $C_k(t_n)$  为卫星的伪随机编码, 即要捕获的 C/A 码;  $t_\tau$  为 C/A 码的起始码相位;  $\eta$  为多普勒频偏对 C/A 码相位的影响因子;  $\omega_{IF}$  为混频后输出的中频频率;  $\omega_D$  为 GPS 接收机与卫星之间相对运动产生的多普勒频偏;  $\varphi_0$  为初始相位;  $v(t_n)$  为加性高斯白噪声。

为实现信号捕获, 首先在软件接收机中生成对应卫星的 C/A 码信号。将本地信号与 GPS 软件接收机的中频信号进行相关运算, 可得

$$z(t_m) = 0.5AD_k(t_n)R(\Delta t_\tau) \text{sinc}[\Delta\omega_d t_m] e^{-j[\Delta\omega_d t_m + \varphi]} + w(t_m) \quad (2)$$

式中:  $R(\cdot)$  为 C/A 的自相关函数;  $\Delta t_\tau$  为本地生成 C/A 码与接收机 C/A 码的码相位偏差;  $\text{sinc}(\cdot)$  为辛格函数;  $\Delta\omega_d$  为本地复制信号多普勒频率与接收机信号多普勒频率之间的频率差;  $w(t_m)$  代表相关运算后的噪声。当  $\hat{t}_\tau = t_\tau$ , 且  $\hat{\omega}_d = \omega_d$  时, 信号相关  $z(t_n)$  取得最大值。因此, 遍历  $t_\tau$  和  $\omega_d$ , 将  $z(t_n)$  的最大值与门限比较即可实现 GPS 信号捕获, 同时完成码相位和多普勒频偏的粗估计。

### 1.1 提高捕获灵敏度

由式(2)可知, 提高信号捕获灵敏度, 必须要减少 C/A 码自相关  $R(\Delta t_\tau)$  的损耗。根据 C/A 码自相关函数特性可知,  $\Delta t_\tau$  越小, 码相位的估计值  $\hat{t}_\tau$  越接近接收信号码相位的真实值  $t_\tau$ 。但高采样频率在提高捕获灵敏度的同时, 也会使得捕获时间过长。为此, 采用平均相关技术降低自相关损耗。

首先对高速采样的接收信号进行分组, 然后将分组信号与本地分组信号进行相关运算完成捕获。信号分组如图 1 所示, 采样后每个码片内包含  $M$  个采样点, 将  $M$  个采样点作为一个预设码片, 提取各个预设码片的第一个采样点构成第一组信号, 依次提取各个预设码片内后续采样点, 形成  $M$  组接收信号。将本地信号进行同样分组处理后, 经过 FFT 和 IFFT 获得  $M$  组相关结果, 对  $M$  组相关结果叠加后提取峰值实现信号捕获。

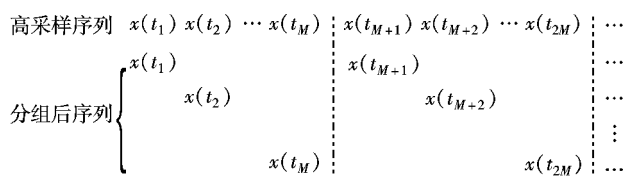


图 1 平均分组示意图

Fig. 1 Average grouping diagram

假设 C/A 码为矩形码片, 码片宽度为  $T$ , 当  $|\Delta t_\tau| \leq T_c$  时, C/A 码的自相关函数可以表示为

$$R(\Delta t_\tau) = A^2 \left(1 - \frac{|\Delta t_\tau|}{T_c}\right) \quad (3)$$

传统相关捕获算法的码搜索步长通常设为码片宽度的一半<sup>[2]</sup>, 此时码片误差  $|\Delta t_\tau| \leq T_c/4$ , C/A 码自相关函数损耗为

$$\frac{R(\Delta t_\tau)}{A^2} \leq \frac{3}{4} \quad (4)$$

当采用平均相关捕获时, 假设高精度采样后的码搜索步长是  $T_c/32$ , 此时码片误差  $|\Delta t_\tau| \leq T_c/64$ , 则 C/A 码自相关函数的损耗为

$$\frac{R(\Delta t_\tau)}{A^2} \leq \frac{63}{64} \quad (5)$$

相比传统捕获算法, 平均相关的自相关损耗大约改善了约 2.4 dB。

此外, GPS 接收信号中存在多普勒频偏, 这不但要求接收机对载频进行步进搜索捕获, 而且还会影响 C/A 码的周期。GPS 信号相关捕获过程中, 需要对多个 C/A 码周期进行叠加运算, 多普勒频偏就会使得 C/A 码叠加结果存在误差, 影响捕获性能, 必须对多普勒频偏进行补偿。

根据多普勒频偏对 C/A 码相位的关系, 对每一个搜索频点, 可以按照

$$\hat{\eta} = \frac{\hat{\omega}_D}{2\pi \times 1575.42 \times 10^6} \quad (6)$$

对本地复制的 GPS 信号进行线性插值, 矫正多普勒频偏对 C/A 码相位的影响。

频偏影响还体现在本地生成信号的频点搜索步长中, 即

$$\text{sinc}(\Delta\omega_d t_n) = \frac{\sin(\Delta\omega_d t_n)}{\Delta\omega_d t_n} \quad (7)$$

自相关峰值与载频误差呈现辛格函数关系, 频点搜索步长越小, 自相关峰值的误差就越小, 但搜索步长减小会导致计算量增加。因此, 实际应用中, 要综合考虑捕获灵敏度与捕获速度的关系。

### 1.2 缩短捕获时间

信号捕获过程中, 大量、重复且耗时的运算就是相关运算(平均分组后大量的运算仍然是相关运算), 因此减少相关运算的计算量就可以降低整个 GPS 信号捕获的计算量。

首先对需要相关运算的信号进行叠加处理, 然后再利用 FFT 完成相关运算, 即采用叠加相关方法。设  $x_p(t_n)$  为平均分组后的某一组需要进行相关运算的 GPS 接收信号, 信号时长为 1 ms,  $y(t_n)$  为本地复制的包含同向载波和正交载波的 C/A 码信号, 则此次相关

运算可以表示为

$$Z(k) = X_p(k)Y(k) \quad (8)$$

式中,  $X_p(k), Y(k)$  分别表示  $x_p(t_n), y(t_n)$  的 FFT。

设信号的相关累积长度为  $P$  (单位 ms), 则共需要进行  $P$  次相关累加, 即

$$Z_{\Delta}(k) = \sum_{p=1}^P X_p(k)Y(k) = Y(k)F_{\text{FFT}}\left[\sum_{p=1}^P x_p(t_n)\right] \quad (9)$$

式(9)表明, 只需一次相关运算和少量累加运算就可以取得多次相关运算所取得的结果, 显著降低了相关累加的计算复杂度。

此外, 降低频率搜索过程的计算复杂度, 可以进一步缩短捕获时间。因此, 采用频域循环移位代替时域频率步进补偿来降低频率搜索过程的耗时, 具体实现方法如下。

接收信号中含有多普勒频偏, 需要对接收信号进行频率步进补偿搜索, 每个步进补偿频率均需要与本地生成信号进行自相关, 频率补偿的接收信号可以表示为

$$x(t_n, q) = x(t_n) e^{-j\frac{2\pi}{T}qt_n} \quad (10)$$

式中,  $q$  为补偿的多普勒频偏。  $x(t_n, q)$  与本地生成信号自相关的 FFT 形式可以表示为

$$z(t_m, q) = \sum_{t_n=0}^{N-1} x(t_n + t_m) e^{-j\frac{2\pi}{T}q(t_n+t_m)} C(t_n) = I_{\text{FFT}}[X(k+q)C^*(k)] \quad (11)$$

式中,  $X(k+q)$  表示信号 FFT 的循环移位。式(11)表明, 对接收信号进行频率补偿等价于信号 FFT 的循环移位。只需在计算出接收信号的 FFT 后, 对 FFT 结果进行循环移位就能实现频率步进补偿搜索, 可以减少频率搜索过程的时间消耗。

## 2 算法实现与性能分析

为了进一步提高处理增益, 实现弱信号条件下的信号捕获, 相干累积、非相干累积和差分相干累积相继被应用到 GPS 信号捕获中。相干累积能够有效消除噪声, 提高捕获灵敏度, 且抑制噪声的能力正比于累积时间, 是弱信号捕获的最优选择, 但由于 GPS 信号的导航电文数据存在相位跳变, 限制了相干累积的时间。非相干累积不受导航电文数据跳变的影响, 可以进行长时间累积, 但累积中包含非线性运算(平方运算), 存在信噪比损耗, 对微弱信号捕获性能不佳。差分相干累积利用相邻相关数据的差分值取代非相干累积的平方运算, 能够降低噪声影响, 且对导航电文数据跳变不敏感, 但相邻的相关数据会存在一定的差异, 这在信噪比较低时会影响捕获性能。

基于本文提出的改进并行捕获算法, 分别采用相

干非相干累积方法<sup>[9]</sup>以及差分相干累积方法<sup>[11]</sup>进行捕获。其中, 相干非相干累积是指首先进行一段相干累积, 然后对相干累积结果进行非相干累积。具体的捕获算法实现方案如图 2 所示。

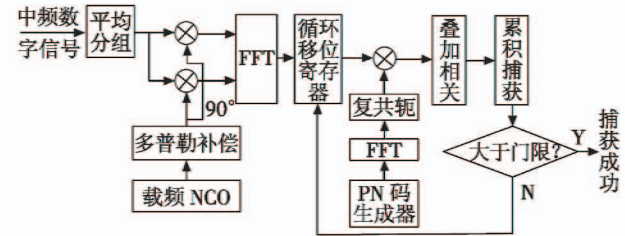


图 2 捕获方案流程图

Fig. 2 Flow chart of acquisition scheme

### 2.1 弱信号捕获仿真分析

为了验证捕获算法的灵敏度, 需要对不同信噪比下的弱信号进行捕获测试, 实际采集数据不能实现信噪比的灵活控制, 因此采用 Matlab 生成仿真的 GPS 信号作为测试信号。仿真生成 8 号 GPS 卫星信号, 数据长度为 200 ms, 导航电文数据随机取值, 信号频率为 4.092 MHz, 采样频率为 16.368 MHz, 信号初始相位为 0。信号中混入加性零均值高斯白噪声, 噪声方差  $\sigma_n^2 = 1$ , 则信号幅度可以表示为

$$A = \sqrt{2}\sigma_n 10^{R_{s,N}/20} \quad (12)$$

式中,  $R_{s,N}$  表示信噪比, 单位为 dB。GPS 高灵敏度捕获要求能够捕获到信号强度在  $-188 \sim -174$  dBW 之间的弱信号, 换算为信噪比约为  $-47 \sim -33$  dB 之间。

本文提出的改进并行捕获算法与传统并行捕获算法, 分别与相干非相干累积方法以及差分相干累积方法结合进行微弱 GPS 信号捕获测试, 各个捕获方法的检测概率与信噪比的关系如图 3 所示。

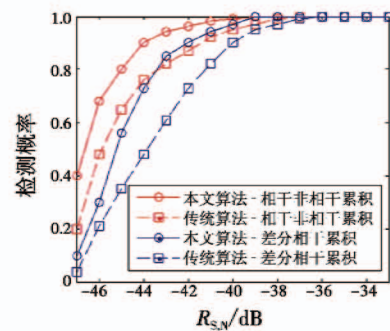


图 3 捕获算法性能比较

Fig. 3 Performance comparison of the acquisition algorithms

图 3 结果表明, 随着 GPS 信号信噪比的增加, 各类捕获方法的检测概率均逐渐增加。对比相干非相干累积方法和差分相干累积方法这两种累积方法对不同信噪比 GPS 信号的捕获测试可知, 采用改进并行算法的捕获性能均优于传统并行算法。例如, 当利用相干非

相干累积方法捕获信号时,传统并行捕获算法要达到 90% 的正确捕获概率,要求信噪比为  $-41$  dB 以上,而本文算法在信噪比约为  $-44$  dB 时即可实现 90% 的正确捕获要求,对弱信号的捕获性能优于传统并行捕获算法。改进并行算法的相干累积和差分累积捕获性能也优于传统并行捕获算法。这是因为,相比传统并行捕获方案,改进并行算法采用了平均相关技术和多普勒补偿方法。首先,平均相关技术可以在高采样频率下,以很小的码相位搜索步长实施信号捕获,虽然传统并行捕获方案也可以提高采样频率、减小码相位搜索步长,但由此带来的时间消耗问题会使得传统并行捕获方案不够实用;其次,多普勒补偿方法可以降低多普勒频偏对 C/A 码累积的影响,提高信号处理增益,捕获弱信号。

此外,对比图 3 中采用不同累积方法的改进并行捕获算法的捕获性能可知,基于相干非相干累积方法的检测性能优于差分累积方法。这是因为,差分相干累积虽然不存在平方运算,但相邻的数据相关会有一定误差,对弱信号的捕获有一定影响;相干非相干累积首先对无导航跳变的数据进行相干累积提高处理增益,然后再利用非相干累积进一步提高处理增益,能够适应信噪比较低的弱信号环境。因此,下一节的实测数据实验中采用相干非相干累积方法。

## 2.2 实测分析

利用美国 SiGe 半导体公司的 SE4120L 射频前端,混频后输出的信号频率为  $4.092$  MHz,采样频率为  $16.368$  MHz,将实际采集数据导入计算机中。捕获过程中,码相位搜索步长为  $T_c/64$ ,采用相干非相干累积,相干累积 12 次,基于 Matlab 进行算法的捕获测试。图 4 为分别采用传统并行算法和改进并行算法结合相干非相干累积,对 2017 年 8 月 18 日 15 时左右 10 号 GPS 卫星的捕获结果。

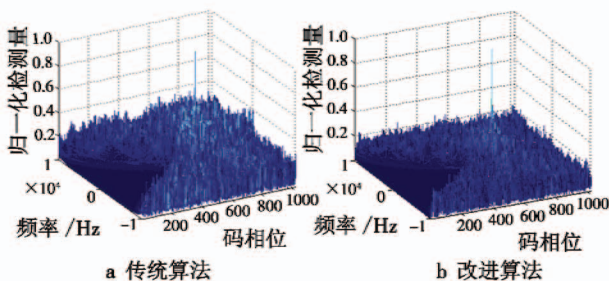


图 4 实际信号相干非相干累积捕获结果

Fig. 4 Coherent-incoherent acquisition results of practical GPS signal

结果表明,基于传统并行算法和改进并行算法的相干非相干累积均能够实现对 GPS 信号的有效捕获,但传统算法的峰值噪声比低于改进算法,难以完成对

微弱信号的捕获。更为重要的是,在衡量捕获算法的另一个重要指标捕获时间消耗上,二者的差距很大。在同一台计算机中,对传统并行算法和改进并行捕获算法的时间消耗进行对比测试,码相位搜索步长同样设为  $T_c/64$ ,采用相同的相干非相干累积方法,两种算法均运行 1000 次,测试结果如表 1 所示。

表 1 时间消耗比较

Table 1 Comparison of time consumption s

	频率搜索步进	
	1 kHz	0.5 kHz
传统算法	10.435	19.793
本文算法	0.276	0.598

时间消耗的测试结果表明,本文算法的时间消耗远远低于传统并行算法,而正是由于时间消耗问题,传统并行算法无法应用于码相位精细搜索。本文算法的叠加相关作用于相干累积阶段,能够有效降低相干累积的时间消耗,而循环移位能够有效降低频率步进搜索过程中的时间消耗,因此能够满足码相位精细搜索的时间要求。

## 3 总结

本文研究了 GPS 软件接收机的 C/A 码高灵敏度快速捕获问题,提出了一种并行快速捕获算法,该算法采用平均相关技术和载频误差补偿提高捕获灵敏度,基于叠加相关和循环移位降低相干累积与频率步进搜索的时间消耗。实验结果表明,该算法能够有效捕获微弱 GPS 信号,且运算量适中,具有一定的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] HURD W J, STATMAN J I, VILNROTTER V A. High dynamic GPS receiver using maximum likelihood estimation and frequency tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, 23(4):425-437.
- [2] 王尔申,张晴,雷虹,等. GPS 空间信号可用性评估算法[J]. 电光与控制,2017,24(2):39-42.
- [3] LEDVINA B M, PEIAKI M L, POWELL S P, et al. Bitwise parallel algorithms for efficient software correlation applied to a GPS software receiver[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(5):1469-1473.
- [4] 唐斌,董绪荣,杨保平. GPS 软件接收机基带信号处理研究[J]. 电光与控制,2007,14(1):115-119.
- [5] MAO W L, CHEN A B. New code delay compensation algorithm for weak GPS signal acquisition[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2009, 63(8):665-677.

- [18] 张琦,潘孟春,陈棣湘,等. 基于线性参数模型的三轴磁场传感器校准方法[J]. 传感技术学报, 2012, 25(2):215-219.
- [19] VALERIE R, MUHAMMAD H A, GERARD L. Complete triaxis magnetometer calibration in the magnetic domain [J]. Journal of sensors, 2010. doi:10.1155/2010/967245.
- [20] RHODE S, USEVICH K, MARKOVSKY I, et al. A recursive restricted total least-squares algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(21):5652-5662.
- [21] 吴志添,武元新,胡小平,等. 基于总体最小二乘的捷联三轴磁力仪标定与地磁场测量误差补偿[J]. 兵工学报, 2012, 33(10):1202-1209.
- [22] CRASSIDIS J L, LAI K, HARMAN R R. Real-time attitude independent three-axis magnetometer calibration [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2005, 28(1):115-120.
- [23] 孙宏伟,房建成,李艳. 椭圆拟合法在磁罗盘罗差校准中的应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12):3034-3039.
- [24] 周建军,林春生,张坚. 基于蚁群算法对三轴磁强计非正交度的修正[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(2):106-109.
- [25] WU Z T, WU Y X, HU X P, et al. Calibration of three-axis strapdown magnetometers using particle swarm optimization algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(2):281-292.
- [26] 吴志添. 面向水下地磁导航的地磁测量误差补偿方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.
- [27] 何昌礼. 解病态线性方程组的奇异值分解及其应用[M]. 北京:中国地质大学出版社, 1990.
- [28] SIMA D M, VAN HUFFEL S. Level choice in truncated total least squares [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2007, 52(2):1103-1118.
- [29] FIERRO R D, GOLUB G H, HANSEN P C, et al. Regularization by truncated total least squares [J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1997, 18(4):1223-1241.
- [30] 庞学亮,林春生,张宁. 飞机磁场模型系数的截断奇异值分解法估计[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(5):48-51.
- [31] 张滢,杨任农,李明阳,等. 基于截断总体最小二乘算法的车载三轴磁力仪标定[J]. 兵工学报, 2015, 36(3):427-432.
- [32] 朱学军,潘孟春,张琦,等. 三轴磁强计输出误差的综合补偿方法[J]. 测试技术学报, 2014, 28(6):526-531.
- [33] 庞学亮,张宁,林春生. 基于有限脉冲响应模型的飞机磁场补偿方法[J]. 震动、测试与诊断, 2009, 29(4):462-465.
- [34] 王立辉,余乐,梁冰冰,等. 截断总体最小二乘法在抑制地磁导航磁力仪随机误差方面的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(6):763-768.

(上接第59页)

- [6] STARZYK J A, ZHU Z. Averaging correlation for C/A code acquisition and tracking in frequency domain [C]// IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2001:905-908.
- [7] TANG B, LIU S S, TANG W T, et al. Design a L1 software receiver based on IF GPS signal simulator [C]//The 8th International Conference on Signal Processing, Beijing, 2006:112-115.
- [8] 陈希,张锐,帅涛. 基于FFT的GPS快速并行捕获算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(1):162-166.
- [9] 熊竹林,刘策伦,安建平,等. 低复杂度高动态低信噪比环境下的GPS信号捕获算法[J]. 通信学报, 2015, 36(3):179-184.
- [10] ABOUD A H, RAMADAN R, ALSHARABATI T. Software defined radio implementing GPS parallel frequency space search acquisition algorithm in real time environment [C]//International Conference on Information and Communication Technology Research, 2015:234-237.
- [11] 李新山,郭伟. 基于平均相关和差分相干累积的微弱GPS C/A码信号精密捕获算法[J]. 通信学报, 2015, 36(5):1-4.