

引用格式:胡品端,杨久东. GPS 信号快速高精度捕获算法[J]. 电光与控制,2019,26(9):34-37,49. HU P D, YANG J D. Fast and high-precision acquisition of GPS signals[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(9):34-37, 49.

GPS 信号快速高精度捕获算法

胡品端¹, 杨久东²

(1. 三峡大学电气与新能源学院,湖北 宜昌 443002; 2. 华北理工大学,河北 唐山 063210)

摘要:针对 GPS 信号精捕获存在的捕获速度和精度间矛盾的问题,提出基于正交搜索的 GPS 信号精捕获算法。算法首先根据 GPS 信号粗捕获结果去除码相位,然后根据粗捕获结果和分辨率构造一组非正交的正弦备选函数,并采用 Gram-Schmidt 正交化方法实现频率精捕获。算法鲁棒性较强,计算简单、易于实现。实验结果表明,所提算法频率捕获性能优于目前普遍采用的补零 FFT 方法,频率捕获精度较高,收敛速度较快,很好地平衡了捕获速度与捕获精度之间的矛盾,适用于当前移动导航定位设备应用场合。

关键词: GPS 接收机; 精捕获; 正交搜索; 捕获精度; 捕获速度

中图分类号: TN967.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.09.008

Fast and High-Precision Acquisition of GPS Signals

HU Pin-duan¹, YANG Jiu-dong²

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: Aiming at the contradiction between the capture speed and the capture accuracy of fine acquisition of GPS signal, a GPS fine signal acquisition method based on orthogonal search is proposed. The code phase is firstly removed according to the coarse acquisition result of the GPS signal, and then a set of non-orthogonal sinusoidal candidate functions is constructed according to the coarse capture result of the frequency and the coarse capture resolution. Finally, Gram-Schmidt orthogonalization method is used to achieve the fine acquisition of frequency. Experimental results show that the frequency acquisition performance of the proposed method is better than that of the commonly used zero-filled FFT method, which balances the contradiction between capture speed and capture accuracy and is suitable for current mobile navigation and positioning equipment applications.

Key words: GPS receiver; fine acquisition; orthogonal search; acquisition accuracy; acquisition speed

0 引言

卫星定位是导航和跟踪的关键,目前大多数智能设备均已植入 GPS 芯片,尽管这些产品功能各异,但电池续航已成为制约用户体验的重要因素,为此,降低 GPS 芯片的信号处理算法复杂度,减少接收器反复捕获微弱 GPS 信号的次数,从而降低电池损耗^[1],设计可靠且计算效率高的 GPS 信号捕获算法对于移动导航定位设备具有十分重要的作用^[2-4]。

为提高 GPS 信号的捕获性能,学者们提出了多种信号捕获方法^[2-6],可以概括为两类:第一类方法是采

用本地信号直接关联 GPS 截获信号,包括时域相关和频域循环相关,这类方法的信号捕获时间会随着信号长度的增加而增加,运算复杂度较高;第二类方法将信号捕获划分为粗捕获和精捕获两个阶段,首先利用短信号粗略估计出可见卫星的码相位和频率,然后再高精度估计信号的频率。由于第二类方法的效率和精度均高于第一类方法,因此,目前硬件和软件 GPS 接收机中均采用第二类方法。总结已有文献中的先粗后精 GPS 信号捕获方法可知,该类方法中的粗估计方法大体相同,但精估计阶段的差异较大^[7]。文献[8]提出基于差分相关双块零填充(DBZP)和 DCT 低通重建的弱 GPS 信号精估计方法,但该算法成本较高;文献[9]设计了基于 GPU 和多核 CPU 的并行混合频域捕获算法,算法对所有码时延可以在同一时间进行并行处理,加速了 GPS 信号采集,但是其对弱信号的捕获能力较

收稿日期:2018-12-06

修回日期:2019-08-16

基金项目:国家自然科学基金(41574072)

作者简介:胡品端(1999—),女,湖北武汉人,本科,研究方向为空间大地测量。

差;文献[10]提出基于快速傅里叶变换(FFT)的精估计算法,该方法估计精度较高,且对噪声抑制能力较强,但当数据较长时计算量较大,且资源浪费较大。

为解决 GPS 精捕获过程中捕获速度和精度之间的矛盾,提出了一种基于正交搜索的 GPS 信号高精度快速精捕获算法,通过相干方法和 Gram-Schmidt 正交化方法实现 GPS 信号粗捕获和精捕获。实验结果验证了算法的有效性。

1 接收机信号捕获基本模型

GPS 接收机天线接收的 GPS 信号可以解析为

$$r(t) = \sum_{i=1}^N A_i d_i(t - \tau_i) c_i(t - \tau_i) \cdot \cos[2\pi(f_L + f_{D,i})t + \varphi(t)] + \eta_i(t) \quad (1)$$

式中: $r(t)$ 为截获的卫星信号; N 为发射信号并被接收的 GPS 卫星数; A_i 为信号幅度; $d_i(t)$ 为导航电文数据(间隔 20 ms 在 ± 1 中随机取值); τ_i 为时间延迟; $c_i(t)$ 为卫星的伪随机编码; f_L 为信号载频; $f_{D,i}$ 为第 i 颗卫星信号的多普勒频率; $\varphi(t)$ 为时变相位偏移; $\eta_i(t)$ 为零均值加性高斯白噪声; t 为接收机接收信号的时间。忽略量化误差, GPS 接收机射频前端输出的中频数字化信号为^[11]

$$r(n) = \sum_{i=1}^N A_i d_i(n - \tau_i) c_i(n - \tau_i) \cdot \cos(2\pi(f_{IF} + f_{D,i})n + \varphi(n)) + \eta_i(n) \quad (2)$$

式中: $r(n)$ 为连续信号 $r(t)$ 的数字化采样结果; f_{IF} 为中频频率。

GPS 信号捕获的任务为初步估计接收机截获的可见卫星信号的多普勒频率和码相位延迟,可以用最大似然估计描述,如图 1 所示^[12]。

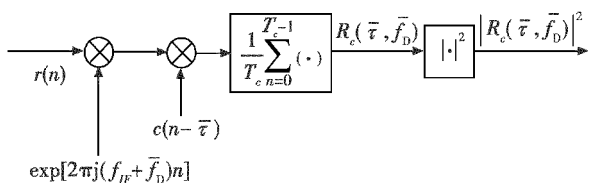


图 1 GPS 信号捕获过程

Fig. 1 GPS signal acquisition process

本地复制信号与截获信号的相关函数为

$$R_c(\bar{\tau}, \bar{f}_D) = \frac{1}{T_c} \sum_{n=0}^{T_c-1} r(n) c(n - \bar{\tau}) \cdot \exp[2\pi j(f_{IF} + \bar{f}_D)n] \quad (3)$$

式中: T_c 为信号的自相关时间,即相干累积时间; $c(n - \bar{\tau})$ 为本地复制信号的 C/A 码; $\bar{\tau}$ 和 \bar{f}_D 分别为其码相位延迟和多普勒频率。信号捕获的过程是在 $\bar{\tau}$ 和 \bar{f}_D 二维参数空间的遍历过程。当相关函数值 $|R_c(\bar{\tau}, \bar{f}_D)|$ 超过

设定门限,则捕获成功,此时 $\bar{\tau}$ 和 \bar{f}_D 即为码相位和多普勒频率的粗估计值。

忽略噪声的影响,本地复制信号和截获 GPS 信号之间的相关函数可以化简为

$$R_c(\bar{\tau}, \bar{f}_D) = \frac{A}{2} \exp[j(\pi\delta_f(T_c - 1) + \varphi_i)] \cdot \frac{\sin(\pi T_c \delta_f)}{\pi T_c \delta_f} R(\delta_\tau) \quad (4)$$

式中: $\delta_f = f_D - \bar{f}_D$ 为多普勒频率差; $\delta_\tau = \tau - \bar{\tau}$ 为码相位差。式(4)表明,多普勒频率差 δ_f 对相关函数的影响主要体现在衰减项中,随着 δ_f 的增加,相关函数的峰值存在衰减。

2 接收机信号高精度快速捕获算法

2.1 算法原理

设去除码相位后的 GPS 信号可以表示为 $y(n)$, $\{p_m(n)\}$ 为一组备选函数,其中, $p_m(n) = \cos(2\pi f_m n)$, $p_{m+1}(n) = \sin(2\pi f_m n)$, f_m 表示备选函数的数字频率, $m = 1, 2, \dots, K$, K 表示备选函数个数。借鉴函数级数思想,信号 $y(n)$ 可以表示为

$$y(n) = \sum_{m=0}^M a_m p_m(n) + \varepsilon(n) \quad (5)$$

式中: M 为逼近 $y(n)$ 设定的备选函数个数; a_m 为各个备选函数的权系数; $\varepsilon(n)$ 表示逼近误差。此时, GPS 信号频率精估计问题就转化为在备选函数集 $\{p_m(n)\}$ 中寻找与 $y(n)$ 之间最小均方误差值最小的函数,即满足式(6)的最优备选函数集,

$$E_{\text{MSE}} = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^L [y(n) - \sum_{m=0}^M a_m p_m(n)]^2 \quad (6)$$

式中, L 为信号采用点数。最优备选函数集的搜索可借助正交搜索^[13]方法实现,即基于备选函数集 $\{p_m(n)\}$ 先构造一个满足相互正交的基函数组 $\{w_m(n)\}$, $\{w_m(n)\}$ 可由 $\{p_m(n)\}$ 经 Gram-Schmidt 正交化得到。信号 $y(n)$ 可以用基函数组合的形式表示为

$$y(n) = \sum_{m=0}^M g_m w_m(n) + \varepsilon_w(n) \quad (7)$$

式中: g_m 为正交基函数的权系数; $\varepsilon_w(n)$ 为基函数组的逼近误差。非正交函数集 $\{p_m(n)\}$ 正交化为 $\{w_m(n)\}$ 计算过程为

$$\begin{cases} w_1(n) = p_1(k) = 1 \\ w_2(n) = p_2(k) - \alpha_{21} w_1(n) \\ \vdots \\ w_m(n) = p_m(k) - \sum_{r=1}^{m-1} \alpha_{mr} w_r(n) \end{cases} \quad (8)$$

式中, α_{mr} 为正交系数。均方误差和正交基权系数可以分别表示为

$$\begin{cases} E_{\text{MSE}} = \overline{y^2(n)} - \sum_{m=0}^M g_m^2 \overline{w_m^2(n)} \\ g_m = \overline{y(n)w_m(n)} / \overline{w_m^2(n)} \end{cases} \quad (9)$$

令 $Q_m = g_m^2 \overline{w_m^2(n)}$ 为均方误差减小量, 那么, Q_m 最大对应的备选函数即为信号 $y(n)$ 的最佳逼近项。正交搜索的原则即选出对均方误差影响最大的备选函数, 每选出一个备选函数后, 就在函数集中去除该函数, 继续按照 Q_m 最大原则从备选函数集中筛选, 直到满足停止条件时, 搜索结束。

搜索完成后, 基于系数 α_{mr} 和 g_m 就可计算出备选函数的权系数, 即

$$v_i = \begin{cases} -\sum_{r=m}^{i-1} \alpha_{ir} v_r & m < i \leq M \\ 1 & i = m \end{cases} \quad (10)$$

综上正交搜索过程描述为: 利用 Gram-Schmidt 正交化方法处理备选函数集 $\{p_m(n)\}$, 获得正交系数 α_{mr} 和权系数 g_m , 基于对均方误差影响最大的原则选择备选函数, 最后由 g_m 计算出非正交备选函数 $p_m(n)$ 的权系数 a_m 。但上述过程需要计算所有正交基 $w_m(n)$, 算法的时间、空间复杂度均较高, 难以满足信号捕获要求。因此, 为了降低正交搜索的时间复杂度和空间复杂度, 采用快速搜索方法。定义

$$\begin{cases} D(m, r) = \overline{p_m(n)w_r(n)} = \overline{p_m(n)p_r(n)} - \sum_{i=0}^{r-1} \alpha_{ri} D(m, i) \\ C(m) = \overline{y(n)w_m(n)} = \overline{p_m(n)y(n)} - \sum_{r=0}^{m-1} \alpha_{mr} C(r) \end{cases} \quad (11)$$

$D(m, r)$ 和 $C(m)$ 的叠加计算过程为

$$\begin{cases} D(r, r) = \overline{w_r^2(n)} = \overline{p_r^2(n)} - \sum_{i=0}^{r-1} \alpha_{ri} D(i, i) \\ D(0, 0) = 1 \\ D(m, 0) = \overline{p_m(n)} \\ D(m, m) = \overline{w_m^2(n)} = \overline{p_m^2(n)} - \sum_{i=0}^{m-1} \alpha_{mi} D(i, i) \\ C(0) = \overline{y(n)} \\ C(m) = \overline{p_m(n)y(n)} - \sum_{r=0}^{m-1} \alpha_{mr} C(r) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} C(0) = \overline{y(n)} \\ C(m) = \overline{p_m(n)y(n)} - \sum_{r=0}^{m-1} \alpha_{mr} C(r) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $m = 1, 2, \dots, M; r = 1, 2, \dots, m$ 。此时, α_{mr} , g_m 和 Q_m 可以重新表示为

$$\begin{cases} \alpha_{mr} = \frac{\overline{p_m(n)w_r(n)}}{\overline{w_r^2(n)}} = \frac{D(m, r)}{D(r, r)} \\ g_m = \frac{\overline{y(n)w_m(n)}}{\overline{w_m^2(n)}} = \frac{C(m)}{D(m, m)} \\ Q_m = g_m^2 \overline{w_m^2(n)} = g_m^2 D(m, m) \end{cases} \quad (14)$$

这说明, 在正交基函数 $w_m(n)$ 未知的情况下, 也可得出使得最小均方误差最小的备选函数组合, 使用这种快速正交搜索算法能够快速检测出信号 $y(n)$ 的频率成分。

2.2 算法实现步骤

进入 GPS 接收机的卫星信号首先与本地复制信号进行相关完成粗捕获。在粗捕获过程中, 可以根据相关峰值解算出码相位和多普勒频率的粗估计值, 然后, 利用粗捕获的码相位估计值, 去除截获 GPS 信号的 C/A 码。码相位的粗估计值存在估计误差, C/A 去除也存在误差。但是, 此误差对本文提出的频率精估计的影响较小, 具体推导过程见文献[10], 最后, 基于本文提出的正交搜索方法实现 GPS 信号的频率精估计。

假设粗捕获的多普勒频率估计值为 \hat{f}_D , 则备选函数 $\{p_m(n)\}$ 的频率范围为 $[\hat{f}_D - \Delta f, \hat{f}_D + \Delta f]$, Δf 为粗捕获步进, 则正交搜索频率精估计的步骤为:

- 1) 令 $i = 1$, 并根据粗估计值 \hat{f}_D 和估计精度 Δf 生成备选函数集 $\{p_m(n)\}$;
- 2) 计算正交基函数的权系数 g_m 和每一个基函数对应的均方误差减小量 Q_m ;
- 3) 选择 Q_m 最大的备选函数作为估计结果, 该备选函数频率值即为 GPS 信号频率的精估计值。

3 实验验证分析

为验证所提算法的性能, 模拟生成 GPS 中频信号, 频率为 4 MHz, 采样频率为 16 MHz, 数据长度为 100 ms。假设经过粗捕获阶段, 信号的码相位已经去除, 频率粗捕获的中频带宽为 14 kHz, 频率步进为 500 Hz。仿真了不同条件下所提算法和补零 FFT 方法(参数为 $2 \times n$ 和 $5 \times n$) 的频率精捕获精度, 对比分析了两种方法的频率精捕获性能。

图 2 给出了不同窗长下 3 种方法对 18 号卫星的频率精捕获性能, 其中, 信噪比为 -10 dB。

图 2 表明, 各窗长下, 本文算法性能均优于补零 FFT 方法。图 2 还表明, 通过增加补零长度或者窗长都能够提升频率精捕获精度, 验证了前述理论分析的正确性。但增加补零长度或者窗长均会提高算法的计算复杂度, 而本文算法很好地平衡了复杂度与捕获精度间的矛盾。

图 3 给出了 3 种方法对不同卫星的频率精捕获误差, 其中, 窗长为 5 ms, 信噪比为 -10 dB。

图 3 实验结果表明, 本文算法对于各个卫星的频

率精捕获误差均小于其他两种方法。14号卫星精捕获误差仅为补零FFT(5×n)的16%,显著提升了GPS信号精捕获精度。

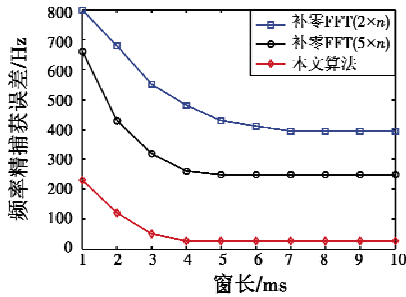


图2 不同窗长下频率精捕获性能仿真结果

Fig.2 Simulation results under different window lengths

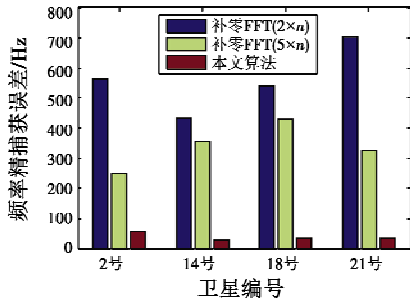


图3 不同卫星频率精捕获误差仿真结果

Fig.3 Simulation results for different satellites

为进一步验证频率精捕获性能,采用加拿大 SiGe 公司的 SE4110L 射频前端截获实际 GPS 信号。射频 GPS 信号首先被降频至基带,采样频率 5 MHz,信号幅值量化时采用 4 bit 量化。通过粗捕获算法共捕获了 4 颗卫星信号,然后采用 3 种方法进行频率精捕获。由于是实际捕获的信号,无法准确获知多普勒频率,因此采用频率锁定指示器(FLI)去评估精估计性能。当频率被完美跟踪时,FLI 取最大值 1,而跟踪回路的频率误差越小,说明频率跟踪性能越好,即 GPS 接收机能可靠地提取导航数据,获取准确定位结果。因此,采用 FLI 提供的频率跟踪性能和锁频环(FLL)的收敛过程来评价,如图4、图5所示。

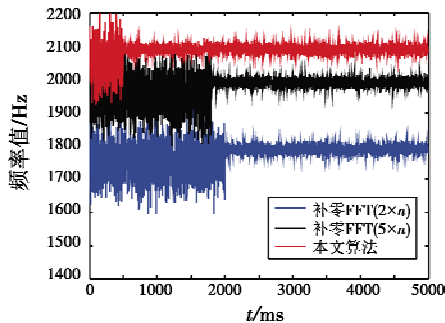


图4 3种方法的FLL收敛过程

Fig.4 FLL convergence process of three methods

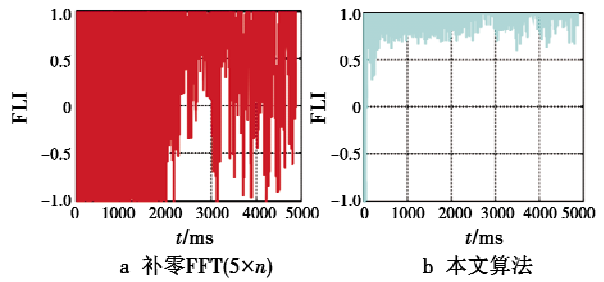


图5 对14号卫星信号处理的FLI

Fig.5 FLI of signals for Satellite No. 14

由图4、图5可以看出,本文算法的FLL收敛过程明显快于补零FFT(5×n)方法,能够使FLL更快地收敛到正确的多普勒频率,更早地由FLL模式切换到锁相环(PLL),从而可以显著降低GPS接收机的资源消耗。

4 结论

研究了GPS信号精捕获问题,提出一种基于正交搜索的快速高精度捕获方法,该方法在粗捕获后,利用正交搜索实现GPS信号的频率精捕获,有效地平衡了捕获速度与捕获精度之间的矛盾。仿真和实验结果均表明,相比目前使用的补零FFT方法,该方法的频率捕获精度更高,并且能够加速FLL的收敛,显著降低了导航定位设备的资源消耗。

参考文献

- [1] TAMAZIN M, NOURELDIN A, KORENBERG M J, et al. Robust fine acquisition algorithm for GPS receiver with limited resources[J]. GPS Solutions, 2016, 20(1):77-88.
- [2] HAO C, LI Z, ZHENG D. Fast acquisition method of GPS signal based on FFT cyclic correlation [J]. International Journal of Communications Network & System Sciences, 2017, 10(8):246-254.
- [3] 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.
- [4] 赵琳,高帅和,丁继成.基于FFT的高动态GPS信号捕获方法优化[J].系统工程与电子技术,2011,33(1):151-156.
- [5] 李源明,李晶,张朋,等.应用延迟累加的微弱GPS信号捕获算法[J].测绘学报,2016,45(1):44-49.
- [6] 曹晓亮,郭承军,张鑫鑫,等.基于合成相关函数的BOC(n,n)型信号捕获算法[J].电光与控制,2017,24(3):51-54.
- [7] SHIM D S, JEON J S. An unambiguous delay-and-multiply acquisition scheme for GPS L1C signals [J]. Sensors, 2018, 18(6):23-38.

叶斯网络,可以得到观测者的疲劳概率曲线。两组实验的结果如图8所示。由图8可知,视觉疲劳概率进一步增大。为了直观地了解所测结果,计算图中平均绝对误差为0.085,0.252,由此可知,通过动态贝叶斯网络模型计算得到的疲劳概率更加直观与准确。

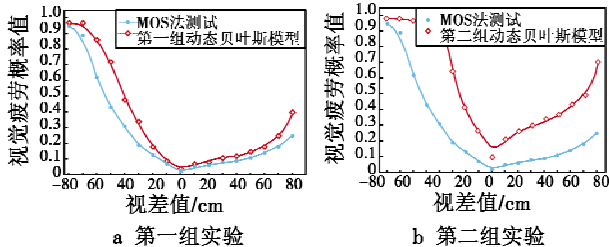


图8 MOS方案与两组实验下3D视觉疲劳测试结果对比

Fig.8 Comparison of MOS scheme with 3D visual fatigue test results under the first and the second dynamic Bayesian model

5 结语

本文提出了动态贝叶斯网络的3D立体视觉疲劳评估的基本测试模型,使用立体视觉与非立体视觉特征的各类背景节点、接触式与非接触式生理特征去推断观测者的疲劳状态,提供了广泛的特征类别。此外,在搭建的贝叶斯网络中,加入的节点数据能够更加快速、准确地评估出立体视觉的真实疲劳状态。最后,本文算法避免了动态因素对实验精度的影响,将相邻时间片 $t-1$ 与 t 之间的影响考虑在内,使评估在时间上具有连续性。实验证明,动态贝叶斯网络计算的视觉疲劳更符合实际情况。

参考文献

- [1] 靳冰凌,张震,张子耀.基于视觉的驾驶员疲劳特征提取方法[J].计算机技术与发展,2018,28(11):193-197.
- [2] 王静.基于功能磁共振的立体视觉功能区定位及观看3D

电视视觉疲劳研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.

- [3] 沈丽丽,孙伟鹏.立体深度运动引发的立体视觉疲劳的脑电评估[J].工程科学学报,2017,39(9):1421-1427.
- [4] 李静,王阿妮,王君乐.三维显示技术引起的视觉疲劳研究综述[J].激光与光电子学进展,2015,52(3):74-83.
- [5] 王嘉辉,程义,李焜阳,等.3D显示方式与视差对视觉疲劳的影响研究[J].中山大学学报:自然科学版,2013,52(5):1-5.
- [6] 施笑畏,王帅.基于眼球运动参数视觉疲劳评价[J].科技信息,2012(21):172-173.
- [7] 映维网.伊利诺伊大学为VR研发3D显示屏,解决视觉疲劳问题[J].工业设计,2017(7):11.
- [8] KIM D, CHOI S, PARK S, et al. Stereoscopic visual fatigue measurement based on fusional response curve and eye-blinks[C]//The 17th International Conference on Digital Signal Processing, IEEE, 2011:1-6.
- [9] ZHAN Z H, ZHANG L, HU M, et al. Online learners' reading ability detection based on eye-tracking sensors[J]. Sensors, 2016, 16(9):1457.
- [10] LIU F, DENG D, LI P. Dynamic context-aware event recognition based on Markov logic networks[J]. Sensors, 2017, 17(3):491.
- [11] ZHANG Z, LUO D Y, RASIM Y, et al. A vehicle active safety model; vehicle speed control based on driver vigilance detection using wearable EEG and sparse representation[J]. Sensors, 2016, 16(2):242.
- [12] 李陆军,丁建江,郑玉军,等.基于动态贝叶斯网络的导弹发射症候识别方法[J].电光与控制,2016,23(11):9-12.
- [13] KIM J G, CHO J D. Simplified relative model to measure visual fatigue in a stereoscopy[C]//IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2011:2830-2831.

(上接第37页)

- [8] WANG J N, LIAN B W, XUE Z. Weak GPS signal acquisition method based on DBZP[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(2):236-243.
- [9] KAKOOEI M, TABATABAEI A. A fast parallel GPS acquisition algorithm based on hybrid GPU and multi-core CPU[J]. Wireless Personal Communications, 2019, 104(4):1355-1366.
- [10] WANG K D, JIANG R, LI Y, et al. A new algorithm for fine acquisition of GPS carrier frequency[J]. GPS Solu-

tions, 2014, 18(4):581-592.

- [11] MAO W L. Robust set-membership filtering techniques on GPS sensor jamming mitigation[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(6):1810-1818.
- [12] 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.
- [13] MCGAUGHEY D R, DAGENAIS V, PECKNOLD S P. Improved torpedo range estimation using the fast orthogonal search[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2010, 35(3):595-602.