

基于小波处理的高灵敏度 GPS 信号捕获方法

李燕敏, 易清明*, 石敏

(暨南大学 电子工程系, 广州 510632)

(* 通信作者电子邮箱 robin051456@163.com)

摘要:针对传统全球定位系统(GPS)弱信号高灵敏度捕获算法运算效率低的问题,提出了一种经过小波滤波预处理的同步数据块累加捕获方法。通过对采样的中频信号进行小波滤波预处理,根据有用信号与噪声在小波变换时所具有的不同特性来提高信噪比,同时降低基带处理的数据量;采用经过频率补偿后的同步数据块累加方法,减小多普勒频移搜索空间,提高运算效率,并能显著提高信噪比。仿真结果表明,与传统的高灵敏度捕获方法相比,该方法在捕获同样指标的微弱信号时,可以有效缩短捕获时间,改善微弱信号的捕获性能。

关键词:全球定位系统;弱信号;小波变换;频率补偿;数据块累加;高灵敏度

中图分类号: TP391;P228.4 **文献标志码:** A

High-sensitive GPS signal acquisition method based on wavelet filtering

LI Yanmin, YI Qingming*, SHI Min

(Department of Electronic Engineering, Jinan University, Guangzhou Guangdong 510632, China)

Abstract: With regard to the low operation efficiency of Global Positioning System (GPS) weak signal high-sensitive acquisition algorithm, a new acquisition method applying wavelet transform and synchronized data blocks accumulation was proposed. The sampled Intermediate Frequency (IF) signal was processed using discrete wavelet transform and Signal-to-Noise Ratio (SNR) was improved by the different characteristics of useful signal and noise during wavelet transform. Meanwhile the quantity of baseband data was decreased. Frequency compensation and synchronized data blocks accumulation method were adopted to reduce the Doppler search range and improve SNR effectively. The simulation results show that compared with traditional high-sensitive acquisition method, the proposed method can obviously reduce the acquisition time and improve the performance of weak signal acquisition.

Key words: Global Positioning System (GPS); weak signal; wavelet transform; frequency compensation; data blocks accumulation; high-sensitive

0 引言

全球定位系统(Global Positioning System, GPS)为用户提供全天候、24小时的导航定位服务,已经得到了广泛的应用^[1]。但在室内、城市峡谷、森林、隧道等复杂环境下,GPS信号严重衰减可达20 dB甚至更多,信号功率将远远低于一般接收机的接受灵敏度。高灵敏度卫星导航接收技术^[2]是指通过改进算法来提高接收机的处理增益,使其能够捕获复杂环境下的微弱信号。

目前在国外的研究机构中,加拿大卡尔加里大学的PLAN(Position, Location And Navigation)研究组,美国的斯坦福大学、空军研究实验室等对微弱GPS信号的高灵敏度捕获方面进行了大量的研究^[3-5],在该领域处于世界领先地位。在GPS高灵敏度捕获方面常用的方法有相干—非相干累加算法、差分相干累加算法以及采样平均算法。相干—非相干累加算法^[6]通过延长伪码相关累积时间,从而获得高的处理增益,但需考虑导航数据位跳变所带来的累加长度限制以及非相干累加时的平方损耗问题^[7-8];差分相干累加算法^[9]利用不相干样点相乘的结果进行累加,计算量较大,在长时间积分时存在相关功率的损失^[10];采样平均的方法将相邻数据点

叠加后平均处理,在降低数据率的同时也造成信号质量的大幅降低^[11]。

小波分析是近年来研究比较热门的一种信号处理方法。小波变换的逼近分量保留原有信号绝大部分的能量,通过小波滤波对中频信号进行处理,利用逼近信号进行码相位和多普勒频移的估计,可以有效降低基带信号处理的数据量,提高信号信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)。由文献[11-12]可知,目前有学者将小波滤波与基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的并行捕获法结合在一起实现GPS弱信号的快速捕获,但鲜有学者将其运用于其他GPS高灵敏度捕获方法中。基于频率补偿的同步数据块累加方法^[13-15]是近年来研究GPS弱信号高灵敏度捕获的一种新方法,其优势在于能够显著提高信号信噪比,而且相对于其他传统的GPS弱信号捕获方法,可以节省较大的运算量。因此本文提出经过小波滤波预处理的同步数据块累加方法,以克服传统高灵敏度捕获方法性能上的不足,实现GPS微弱信号的快速准确捕获。

1 常规高灵敏度捕获算法

卫星接收机中接收到的信号经过放大、下变频、A/D采

收稿日期:2013-04-16;修回日期:2013-06-17。 基金项目:广东省教育部产学研结合项目(2012B091000133);广东高校产学研结合示范基地及科技成果转化重大项目(cgzhd1103);广东省工程技术研究中心项目(2012gczxA003)。

作者简介:李燕敏(1986-),男,河北邢台人,硕士研究生,主要研究方向:卫星导航信号处理、IC设计; 易清明(1965-),女,湖南岳阳人,教授,博士,主要研究方向:信号处理、ASIC设计; 石敏(1977-),女,湖北襄樊人,副教授,博士,主要研究方向:图像处理、IC设计。

样量化,变成中频信号,其输出模型为

$$y_n = Ad(t_n - t_s)c(t_n - t_s) \cos[\omega_{IF}t_n - (\omega_D t_n + \varphi_0)] + v_k \quad (1)$$

其中: y_n 是在 t_n 时刻的中频采样输出; A 是信号的幅度; $d(t)$ 是导航数据流; $c(t)$ 是信号中的C/A伪随机码序列; t_n 是采样时刻; t_s 是伪码起始时刻,可以表示伪码初始相位; ω_{IF} 是归一化中频,其值由射频电路和多普勒频移 ω_D 决定;角度 φ_0 是初始载波相位; v_k 是均值为零的高斯白噪声。

GPS信号的捕获是通过采样中频信号进行分析,从而估计出伪码初始相位 t_s 和载波多普勒频移 ω_D 。

将采样信号与本地复现信号进行相关计算:

$$I = \sum_{n=0}^{N-1} y_n C(t_n - t_s') \cos[(\omega_{IF} - \omega_D')t_n] + v_{n,I} \quad (2)$$

$$Q = \sum_{n=0}^{N-1} y_n C(t_n - t_s') \sin[(\omega_{IF} - \omega_D')t_n] + v_{n,Q} \quad (3)$$

其中: ω_D' 和 t_s' 为载波多普勒频移和伪码初始相位的估计值, N 为1ms的中频采样数目。

若相干累加时间为 L ms,则相干累加结果的数学表达式如下:

$$\begin{cases} Z_{ci} = \sum_{m=1}^L I_m \\ Z_{cq} = \sum_{m=1}^L Q_m \end{cases} \quad (4)$$

$$Z_c = Z_{ci}^2 + Z_{cq}^2 \quad (5)$$

若相干累加时间为 L ms,非相干累加次数为 K 次,则相干—非相干累加捕获算法的判决量为

$$P(\omega_D', t_s') = \sum_{j=1}^k Z_{cij}^2 + Z_{cqi}^2 \quad (6)$$

相干累加处理增益^[16]:

$$G_c = 10 \lg L$$

非相干累加处理增益^[16]:

$$G_s = G_c - D(k)$$

其中 $D(k)$ 为非相干累加的平方损耗。

由信号与系统理论^[15-16]可知,相干—非相干累加算法可以表示为如图1所示的基于FFT的并行码捕获方法。

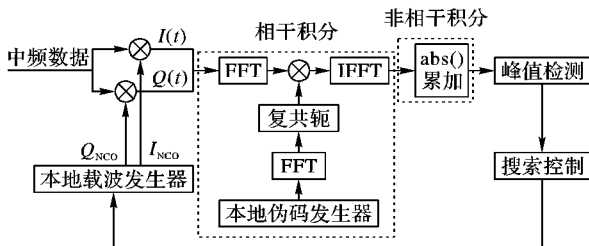


图1 基于FFT的相干—非相干累加算法

差分相干累加捕获算法的判决量为

$$P_D(\omega_D', t_s') = \sum_{m=2}^M Z_m * Z_{m-1}^* \quad (7)$$

其中: Z_m 表示第 m 个相干累加结果, M 为差分相干累加的次数。

2 小波滤波预处理的同步数据块累加方法

2.1 小波变换

对任意连续信号 $f(t)$ 进行小波变换^[11]可表示为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (8)$$

其中: a 为伸缩因子,对应于频率信息; b 为平移因子,对应于时空信息, $\psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 表示小波序列 $\psi \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 的复共轭。

从信号处理的观点来看,小波滤波器相当于恒 Q 值高通滤波(对应于细节部分 $D_{j,k}$)和低通滤波(对应于逼近部分 $H_{j,k}$),其中 $D_{j,k}$ 和 $H_{j,k}$ 分别表示为

$$\begin{cases} D_{j,k} = \sum_n D_{j-1,n} g_{n-2k} \\ H_{j,k} = \sum_n H_{j-1,n} h_{n-2k} \end{cases} \quad (9)$$

其中 $k = 0, 1, \dots, N-1, N$ 为离散采样点数。

逼近部分(对应低频)具有原接收信号中有用信号的绝大部分能量,而细节部分(对应高频)具有原接收信号中少许有用信号的能量和约一半白噪声的能量。

2.2 利用逼近信号的捕获原理

忽略噪声影响时,式(1)的中频信号可以表示为:

$$y_{ns} = Ad(t_n - t_s)c(t_n - t_s) \cos[\omega_{IF}t_n - (\omega_D t_n + \varphi_0)] \quad (10)$$

对 y_{ns} 进行小波变换可得:

$$\begin{aligned} y'_{ns} &= \sum_n y_{ns} h_{n-2k} = \\ & \sum_n Ad(t_n - t_s) h_{n-2k} c(t_n - t_s) \cos[\omega_{IF}t_n - (\omega_D t_n + \varphi_0)] = \\ & \sum_n Ad(t_n - t_s) c'(t_n - t_s) \cos[\omega_{IF}t_n - (\omega_D t_n + \varphi_0)] \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $c'(t_n - t_s)$ 为 $c(t_n - t_s)$ 的逼近部分。

由于每进行一级小波滤波,逼近部分的数据量减少一倍^[17],因此当本地产生的C/A码与接收到的C/A码完全对齐时,利用接收信号的逼近信号可以快速估计出伪码相位和多普勒频移的信息。

2.3 基于频率补偿的同步数据块累加方法

基于频率补偿的同步数据块累加方法是将输入信号进行频率补偿得到每个伪码周期内起始相位一致的载波信号,然后根据C/A码周期对新信号进行 L 个分段累加,这样信号强度增大 L 倍,信号功率增大 L^2 倍,而累加后的噪声仍为高斯白噪声,功率只增大 L 倍,因此经过频率补偿后再进行 L 块累加时可以将信噪比增大 $10 \lg L$ dB。而原始信号之所以不能直接累加是因为每个数据块的起始载波相位不同步,累加后不能保证信号被有效增强。

设输入信号已变换为复信号

$$s(n) = D(nt_s)C(nt_s)e^{j2\pi f_a n t_s} + v(nt_s) \quad (12)$$

其中: $D(nt_s)$ 为导航数据比特; $C(nt_s)$ 为C/A码; f_a 是实际的载波频率,受多普勒频移的影响,其值在 $[f_c - 10, f_c + 10]$ kHz内, f_c 为中心频率; t_s 为采样间隔; $v(nt_s)$ 为高斯白噪声。

本地产生一个频率为 Δf_a 的频率补偿信号

$$p(n) = e^{j2\pi \Delta f_a n t_s}; n = 0, 1, \dots, LN - 1 \quad (13)$$

将输入信号与频率补偿信号相乘,得到载波调整以后的信号 $y(n)$

$$\begin{aligned} y(n) &= s(n) * p(n) = \\ & D(nt_s)C(nt_s)e^{j2\pi(f_a + \Delta f_a)n t_s} + v(nt_s)e^{j2\pi \Delta f_a n t_s} \end{aligned} \quad (14)$$

考虑 $y(n)$ 中的信号分量,为了方便描述,用 $S\{y(n)\}$ 表示该项,即

$$S\{y(n)\} = D(nt_s)C(nt_s)e^{j2\pi(f_a + \Delta f_a)n t_s} \quad (15)$$

对 $y(n)$ 进行 L 个1ms的数据块累加

$$Y(n) = \sum_{i=0}^{L-1} y(n+iN) = S\{y(n)\} \sum_{i=0}^{L-1} e^{j2\pi(f_a+\Delta f_a)iNt_s} + \sum_{i=0}^{L-1} v(nt_s+iNt_s)e^{j2\pi\Delta f_a(n+iN)t_s} = S\{y(n)\} G(L, f_a') + \sum_{i=0}^{L-1} v'(nt_s+iNt_s) \quad (16)$$

式中: $f_a' = f_a + \Delta f_a$; $G(L, f_a') = \sum_{i=0}^{L-1} e^{j2\pi(f_a+\Delta f_a)iNt_s} = \sum_{i=0}^{L-1} e^{j2\pi f_a' iNt_s}$ 。

由上式可知当 $f_a' Nt_s$ 为整数时, $G(L, f_a') = L$ 。因为 $Nt_s = 1 \text{ ms}$, 所以 $f_a' Nt_s$ 为整数的条件可以等效于 $\text{mod}(f_a', 1 \text{ kHz}) = 0$, 因此满足这个条件时上式可以表示为

$$Y(n) = S\{y(n)\} \cdot L + \sum_{i=0}^{L-1} v'(nt_s+iNt_s) \quad (17)$$

由于 C/A 码的幅值为 (+1, -1), 因此将 $Y(n)$ 平方后, 信号分量变成连续波, 其他两项的频谱仍是平坦的噪声样谱, 当 L 足够大时, 对平方信号进行频谱分析找到尖峰位置即可确定载波多普勒频移。

由取模运算的性质^[15]可知, 采用频率补偿的同步数据块累加方法可以有效减小多普勒频移的搜索范围, 使其由原来的 20 kHz 减小为 1 kHz, 实现微弱信号的快速捕获。

2.4 小波滤波处理后再同步数据块累加的具体步骤

步骤 1 对射频前端的中频信号进行离散小波滤波预处理, 采用 db5 小波对数据进行 3 级滤波处理, 下抽样提取逼近信号。

步骤 2 取 40 Hz 为搜索步长, 产生 25 个频率补偿序列, 每个序列的长度取 LN , N 为 1 ms 内逼近信号的点数, L 为累加的数据块个数。

步骤 3 将第一个频率补偿序列和逼近信号进行逐点相乘得到一个长度为 LN 的新序列 $y(n)$, 将新序列进行分块累加运算, 从而得到一个长度为单位数据块的新序列 $Y(n)$, 并对新序列的每一个数据样点进行平方运算, 得到平方序列。

步骤 4 对平方序列做 FFT 运算, 寻找是否出现超过门限值的尖峰, 若出现超过门限值的尖峰, 则多普勒频率可以通过尖峰所对应的频率值除以 2 再减去对应的频率补偿值求得; 若没有出现超过门限的尖峰, 则进行下一个频率补偿值搜索, 直到出现峰值为止。

步骤 5 计算出出现尖峰的序列 $y(n)$ 的全部伪码相位相关值, 遍历全部 32 个伪随机噪声 (Pseudo Random Noise, PRN) 码的计算, 相关结果会显示信号的 PRN、伪码相位和载波多普勒频移的信息。

3 仿真验证与分析

首先分析中频数据经过小波滤波预处理后对捕获性能的改善程度, 仿真的中频信号的中心频率为 4.092 MHz, 采样频率为 6.144 MHz, 载噪比为 32 dB/Hz, 利用 db5 小波对中频数据进行 3 级滤波处理, 图 2 与图 3 描述了原始中频数据直接进行相干—非相干累加与经过小波滤波预处理后相干—非相干累加的捕获结果, 相干积分时间为 10 ms, 非相干累加段数为 10 段, 检测概率 $P_d = 0.9$, 虚警概率 $P_f = 10^{-6}$ 。

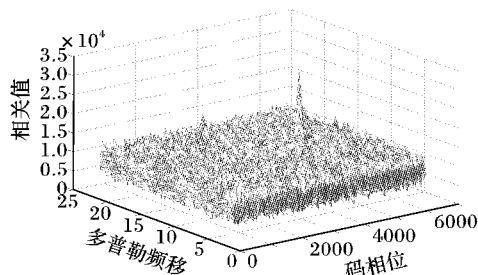


图 2 原始中频数据相干—非相干累加结果

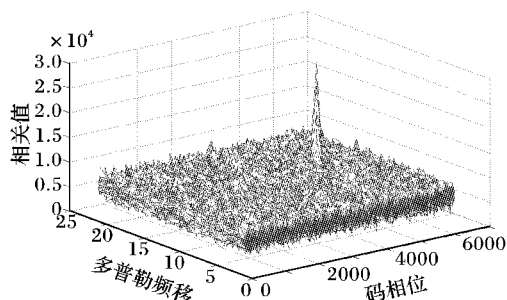


图 3 小波滤波处理后相干—非相干累加结果

图 2 与图 3 的捕获结果表明, 两种方法均能捕获到载噪比为 32 dB/Hz 的弱信号, 但原始中频数据直接进行相干—非相干累加的捕获峰值比经过小波滤波处理后捕获的峰值略低。分析信噪比关系可知, 经小波滤波处理后进行捕获时信噪比改善约 3 dB, 这是由于有用信号和噪声经过小波变换时所具有的不同特性导致, 当变换尺度逐步增加时, 信号的平均功率逐渐增大, 而噪声的功率逐渐减小。

除改变中频信号的载噪比外, 其他参数仍按上述实验的设定值, 仿真信号产生四颗可见星, 载噪比分别为 23 dB/Hz、25 dB/Hz、27 dB/Hz、29 dB/Hz, 对本文提出的经过小波滤波预处理的同步数据块累加方法和基于 FFT 的相干—非相干累加方法的捕获性能进行比较, 同步数据块累加个数 $L = 20$, 表 1 是两种方法分别完成 100 次 4 颗卫星信号成功捕获时的平均时间。

表 1 两种方法捕获时间的比较

捕获方法	程序运行时间/s
相干—非相干累加捕获方法	66.45
本文方法	30.30

结果说明, 在捕获满足高灵敏度要求的微弱 GPS 信号时, 本文方法可以有效节省捕获时间, 主要原因是中频信号通过小波滤波预处理后, 利用其逼近信号进行多普勒频移和伪码相位的估计时, 有效降低了基带处理信号的数据量; 而通过频率补偿达到相位同步后, 有效减小了多普勒频移的搜索空间, 从而提高了捕获速度。

4 结语

本文首先对常规高灵敏度捕获算法进行分析, 然后提出一种经过小波滤波预处理的同步数据块累加捕获方法。利用小波滤波对中频数据进行预处理, 增强信号信噪比, 降低运算数据量; 采用基于频率补偿的同步数据块累加方法, 在提高信号信噪比的同时, 减少多普勒频移搜索范围与 FFT 的运算次数, 有效改善捕获效率。仿真结果表明, 在捕获相同指标的微弱 GPS 信号时, 本文方法较常规的高灵敏度捕获方法可以节

拟机部署算法以及基于门限的虚拟机主动迁移策略。算法在部署虚拟机时以最优服务器能耗效率(服务器资源利用率)为指标,使系统整体部署方案在系统能耗方面得到优化。通过启发式搜索求解使服务器能耗效率最优的虚拟机部署方案;同时通过增加服务器利用率最低门限,控制虚拟机主动迁移频率。仿真实验表明,新算法在系统能耗、虚拟机迁移频率、服务器状态切换频率以及服务质量等多项性能指标上均有显著提高。

在将来的研究中,将更多地关注动态配置方案中的服务器过载预测算法的研究。例如,在文献[3]的方案中,只对服务器的负载进行监测,并依据历史数据预测下个周期服务器的负载情况,从而判断是否存在过载风险;但是服务器上部署的虚拟机是动态调整的,因此根据服务器的历史负载数据来预测过载风险是不准确的。如何改进预测算法,提高预测准确率是将来研究的重点。

参考文献:

- [1] 叶可江, 吴朝晖, 姜晓红, 等. 虚拟化云计算平台的能耗管理[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1262 - 1285.
- [2] KURP P. Green computing [J]. Communications of the ACM, 2008, 51(10): 11 - 13.
- [3] BELOGLAZOV A, BUYYA R. Optimal online deterministic algorithms and adaptive heuristics for energy and performance efficient dynamic consolidation of virtual machines in cloud data centers [J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2012, 24(13): 1397 - 1420.
- [4] BARROSO L A, HOLZLE U. The case for energy-proportional computing [J]. IEEE Computer, 2007, 40(12): 33 - 37.
- [5] CLARK C, FRASER K, HAND S. Live migration of virtual machines [C]// Proceedings of the 2nd Symposium on Networked Systems Design and Implementation. Berkeley: USENIX Association, 2005: 273 - 286.
- [6] NORMAN B, ANDRZEJ K, BEATY K. Dynamic placement of virtual machines for managing SLA violations [C]// Proceedings of the 10th IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management. Piscataway: IEEE, 2007: 119 - 128.
- [7] KUSIC D, KEPHART J O, HANSON J E, *et al.* Power and performance management of virtualized computing environments via look-ahead control [J]. Cluster Computing, 2009, 12(1): 1 - 15.
- [8] VERMA A, AHUJA P, NEOGI A. pMapper: Power and migration cost aware application placement in virtualized systems [C]// Proceedings of the 9th ACM/IFIP/USENIX International Conference on Middleware. New York: Springer-Verlag, 2008: 243 - 264.
- [9] CALCAVECCIA N M, BIRAN O, HADAD E. VM placement strategies for cloud scenarios [C]// Proceedings of the 5th International Conference on Cloud Computing. Piscataway: IEEE, 2012: 852 - 859.
- [10] SONG A B, FAN W, WANG W, *et al.* Multi-objective virtual machine selection for migrating in virtualized data centers [C]// Proceedings of Pervasive Computing and the Networked World, LNCS 7719. Berlin: Springer, 2013: 426 - 438.
- [11] BELOGLAZOV A, ABAWAJY J, BUYYA R. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for cloud computing [J]. Future Generation Computer Systems, 2011, 28(5): 755 - 768.
- [12] VERMA A, DASGUPTA G, NAYAK T K, *et al.* Server workload analysis for power minimization using consolidation [C]// Proceedings of the 2009 USENIX Annual Technical Conference. Berkeley: USENIX Association, 2009: 28 - 28.
- [13] CALHEIROS R N, RANJAN R, BELOGLAZOV A, *et al.* CloudSim: a toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms [J]. Software: Practice and Experience, 2011, 41(1): 23 - 50.
- [14] PARK K S, PAI V S. CoMon: a mostly-scalable monitoring system for PlanetLab [J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2006, 40(1): 65 - 74.

(上接第 2771 页)

省约一半的时间,这对于研究复杂环境下要求拥有快速处理能力的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)接收机具有良好的借鉴意义。

参考文献:

- [1] KOVAR P, KACMARIK P, VEJRAZKA F. Interoperable GPS, GLONASS and Galileo software receiver [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2011, 26(4): 24 - 30.
- [2] 马永奎, 张一, 张中兆, 等. 改进的高动态高灵敏度 GPS 信号捕获算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 265 - 269.
- [3] 武玲娟, 崔莹莹, 路卫军, 等. 高灵敏度 GPS 接收机载波跟踪环路的设计优化与实现 [J]. 北京大学学报, 2011, 47(5): 783 - 788.
- [4] GERNOT C. Development of combined GPS L1 / L2 C acquisition and tracking methods for weak signals environments [D]. Calgary, Canada: University of Calgary, 2009.
- [5] 陈景霞, 李建文. 新的全球定位系统弱信号高灵敏捕获算法 [J]. 计算机应用, 2012, 32(11): 3262 - 3267.
- [6] BORIO D, O'DRISCOLL C, LACHAPPELLE G. Coherent, noncoherent and differentially coherent combining techniques for acquisition of new composite GNSS signals [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3): 1227 - 1240.
- [7] 黎山, 易清明, 陈庆, 等. 适用于 GPS 软件接收机的弱信号捕获方法 [J]. 计算机应用, 2012, 32(3): 816 - 818.
- [8] 祝雪芬, 陈熙源, 涂刚毅, 等. GNSS 软件接收机新型高灵敏度捕获算法及实现 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2055 - 2058.
- [9] SHANMUGAM S K, NIELSEN J, LACHAPPELLE G, *et al.* Differential signal processing schemes for enhanced GPS acquisition [C]// Proceedings of 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Bonn, German: Institute of Navigation, 2005: 212 - 221.
- [10] 莫建文, 欧阳缙, 肖海林, 等. 基于 DBZP 差分相干的 GPS 信号捕获算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(6): 1085 - 1089.
- [11] 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.
- [12] 刘杨, 金天. 小波降噪在微弱 GPS 信号捕获中的应用 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(4): 842 - 846.
- [13] 郝燕玲, 祖秉法, 黄平. “北斗二号”B2 频段信号直接多普勒频移估计 [J]. 华中科技大学学报, 2010, 38(6): 15 - 18.
- [14] LU Y. Software radio implementation of multi-frequency global navigation satellite system receiver [D]. Riverside: University of California, 2006.
- [15] 鲁豫. GPS 全球定位接收机——原理与软件实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [16] TSUI J B-Y. Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach [M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2004: 113 - 117, 192 - 227.
- [17] VETTERLI M, HERLEY C. Wavelets and filter banks: theory and design [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(9): 2207 - 2232.