

## 适用于 GPS 软件接收机的弱信号捕获方法

黎 山, 易清明\*, 陈 庆, 石 敏

(暨南大学 电子工程系, 广州 510632)

(\* 通信作者电子邮箱 ezer@163.com)

**摘 要:**为了解决全球定位系统(GPS)软件接收机中弱信号捕获存在灵敏度和运算效率低的问题,提出了一种基于快速傅里叶变换(FFT)改进的差分相干累积算法。通过对去载波后的中频信号进行块累加处理,解决了相干积分时间的限制;根据 FFT 频移特性,采用多普勒圆周移位搜索替代频率补偿搜索,减少了 FFT 运算量;同时采用了不同的下变频,降低了频域分量间的损耗;对相干积分结果进行了差分相干累积,相对于传统的非相干累积,提高了信噪比。实验结果表明,该算法在 -39 dB 的低信噪比环境下仍能捕获到所有微弱信号,具有较高的灵敏度和运算效率。

**关键词:**全球定位系统;弱信号;捕获;快速傅里叶变换;差分相干累积;软件接收机

**中图分类号:** TP393; P228.4; TP391 **文献标志码:** A

### Weak signal acquisition method for GPS software receiver

LI Shan, YI Qing-ming\*, CHEN Qing, SHI Min

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

**Abstract:** For high sensitivity and operation efficiency in weak signal acquisition of Global Positioning System (GPS) software receiver, a differential coherent accumulated acquisition algorithm based on Fast Fourier Transform (FFT) was proposed. The limitation of coherent integration time was overcome by block accumulation of demodulated GPS intermediate frequency data. Based on FFT frequency shift characteristics, a Doppler circular frequency search was used to achieve low computation instead of frequency compensation search. The loss in frequency was resolved by different down conversions. Compared to the original incoherent accumulation, Signal-to-Noise Ratio (SNR) was improved by differential coherent accumulation of coherent results. The weak signal in a -39 dB poor SNR environment was successfully acquired in experiments. High sensitivity and operation efficiency of the proposed algorithm were confirmed by the experimental results.

**Key words:** Global Positioning System (GPS); weak signal; acquisition; Fast Fourier Transform (FFT); differential coherent accumulation; software receiver

## 0 引言

近年来,全球定位系统(Global Positioning System, GPS)软件接收机是卫星导航领域的一个非常重要的课题和发展方向<sup>[1]</sup>。与硬件接收机不同,软件接收机对信号的捕获和跟踪都由软件完成,具有很好的灵活性和适应性,但其运算能力和硬件相比,还有一定的差距。而随着导航用户对于各种低信噪比环境(如市中心、立交桥、隧道、森林或室内)下接收机性能的需求越来越大,如何在保持运算效率的同时,能灵敏地捕获到微弱 GPS 信号并定位,是软件接收机信号捕获技术的研究重点。其中,串行搜索算法<sup>[2]</sup>与循环相关算法<sup>[3]</sup>是一直以来研究改进的热点:串行搜索算法简单易实现,但其捕获时间较长;循环相关算法是一种基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的频域捕获算法,其捕获速度优于串行搜索算法,在弱信号捕获中主要靠延长累积时间来提高检测增益,但同时会带来 FFT 的次数增多、相干积分时间受导航比特跳转的限制、非相干积分的捕获损耗等问题,尽管后来针对导航比特跳转的影响,提出了全比特法<sup>[4]</sup>与半比特交替法<sup>[5]</sup>等改进算法,但在捕获速度和灵敏度上的提高还需有效的解决。

为此,本文提出一种基于 FFT 改进的差分相干累积的微弱 GPS 信号捕获算法。该算法通过优化相干积分累加和多普勒搜索的方式,提高了算法的运算效率,并采用差分相干累积的方法,相比传统的非相干积分,提高了信噪比。仿真实验和分析表明,该算法适用于 GPS 软件接收机,具有较高的运算效率和灵敏度。

## 1 传统的弱信号捕获方法

本文主要对 GPS 信号中的 C/A 码进行捕获,在软件接收机中输入信号为射频模组输出的数字中频采样,其数学表达式如下:

$$y_n = \sqrt{2P_s} D(t_n - t_s) C(t_n - t_s) \times \cos(w_{IF} t_n - (w_D + \varphi_0)) + v_n \quad (1)$$

其中: $y_n$  是采样时间  $t_n$  时刻的射频输出; $P_s$  是信号功率; $D(t)$  是导航数据流; $C(t)$  是信号中的 C/A 码; $t_s$  是伪码起始时间,表示伪码相位; $w_{IF}$  是中频载波频率,其值由射频电路和多普勒频移  $w_D$  决定; $\varphi_0$  是初始载波相位; $v_n$  是噪声项。

以  $y_n$  为输入信号,采用传统的相干与非相干积分组合的捕获方法进行捕获,如图 1 所示。

收稿日期:2011-09-30;修回日期:2011-11-24。

基金项目:广东省教育部产学研结合计划项目(2009A090100004, 2011A090200088)。

作者简介:黎山(1986-),男,广东梅州人,硕士研究生,主要研究方向:卫星导航信号处理、嵌入式系统;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;陈庆(1987-),男,广东汕头人,硕士研究生,主要研究方向:卫星导航信号处理、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。

若相干积分时间为 $L, N$ 为1 ms的中频采样数,则对去载波后的同相和正交分量进行相干积分,得到两路信号:

$$I_L = \sum_{n=0}^{LN-1} y_n C(t_n - t_s') \cos((w_{IF} - w_D')t_n) + v_{n,I} \quad (2)$$

$$Q_L = \sum_{n=0}^{LN-1} y_n C(t_n - t_s') \sin((w_{IF} - w_D')t_n) + v_{n,Q} \quad (3)$$

组合成复信号后输出为:

$$Z_L(t_s', w_D') = I_L - jQ_L \quad (4)$$

其中: $t_s'$ 为捕获伪码初始时间,可换算为码相位; $w_D'$ 为捕获的载波频率。根据圆周相关性<sup>[6]</sup>,可将相干积分运算转换为图1所示的方法,即:

$$Z_L(t_s', w_D') = \text{IFFT} \left\{ \sum_{n=0}^{LN-1} \text{FFT}(y_n \exp(-j(w_{IF} - w_D')t_n)) * \text{FFT}(C(t_n - t_s'))^* \right\} \quad (5)$$

其中IFFT为逆快速傅里叶变换。相干积分累加的处理增益<sup>[6]</sup>为 $G_c = 10 \lg L$ 。

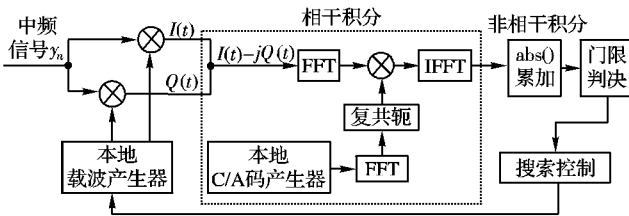


图1 传统的弱信号捕获框图

假设第 $l$ 段相干积分输出 $Z_l(t_s', w_D') = I_l - jQ_l$ ,若非相干积分累加次数是 $M$ ,则得非相干积分累加输出的判决函数:

$$P_M(t_s', w_D') = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} |Z_l(t_s', w_D')|^2 = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} \sqrt{I_l^2 + Q_l^2} \quad (6)$$

它的处理增益<sup>[6]</sup>是 $G_i = G_c - D(M)$ ,其中 $D(M)$ 为非相干积分的平方损失。

总的来说,传统的弱信号捕获方法主要采用延长相干或非相干积分累加的时间,在去除同相、正交载波分量后,采用FFT循环相关的方式进行捕获,得到相干积分增益,并对相干结果进行非相干积分累加,进一步提高输出信号增益,最后对结果进行门限判决,若超过门限则本星搜索成功;否则重新对本地载波进行多普勒频率补偿,继续捕获。

## 2 基于FFT改进的差分相干累积算法

### 2.1 相干积分的块累加

在图1传统的捕获方法中,延长相干积分时间 $L$ 能有效地提高处理增益 $G_c = 10 \lg L$ ,但 $L$ 取值是有限制的:一方面受导航比特(波特率50 bps)跳变的影响,长度只能限制在20 ms以内,因此 $L \leq 20$ ;另一方面,相干积分累加造成的捕获损耗 $D_{acq}$ 与 $L$ 和载波频率误差 $\Delta f$ 呈sinc函数关系<sup>[6]</sup>:

$$D_{acq} = 20 \lg [\sin(\pi L \Delta f T_{ca}) / \pi L \Delta f T_{ca}] \quad (7)$$

其中 $T_{ca}$ 为1 ms的伪码周期。从式(7)可看出:在损耗不变的情况下,若 $L$ 增加, $\Delta f$ 必须减小,直接导致搜索次数的增加,延长捕获时间。

因此,本文算法在相干积分中采用块累加处理解决 $L$ 限制的问题,并提高捕获效率。根据序列线性FFT运算性质,序列的FFT之和等于序列和的FFT,在捕获相干积分累加中,对去除载波后的复信号进行 $L$ 段的1 ms累加,然后再经过FFT

与本地存储的伪码FFT复共轭信号相乘,经过IFFT运算后得到相干积分 $L$ 时间的累加效果。

### 2.2 多普勒圆周移位搜索

图1所示的传统方法采用了对本地载波进行频率补偿的方式来搜索多普勒频偏,可以看出,每一次频率补偿后进行相干积分都需要一个FFT和IFFT组合运算,这在多星的频率搜索中运算量大,捕获时间长,并且不适合应用在软件接收机中。

因此,针对此问题,本文对多普勒搜索方式进行了改进。根据FFT频移特性,对于序列 $y(n)$ 和 $c(n)$ 的FFT $Y(k)$ , $C(k)$ ,有

$$Z_m = \text{IFFT} \{ Y(k-l) C^*(k) \} = \sum_{n=0}^{N-1} c(n) y(n) \exp(-j \frac{2\pi n l}{N}) \quad (8)$$

式(8)表明,对 $Y(k)$ 进行 $l$ 的循环移位等效于在时域中对 $y(n)$ 进行频率补偿后的FFT。令 $y(n)$ 等于式(5)中的去载波中频信号 $y_n \exp(-j(w_{IF} - w_D')t_n)$ ,若当前搜索的多普勒频率 $w_D' = w_{D0}' - l * [2\pi * (1/T_{ca})]$ ,则频率相差1 kHz的整数倍, $l$ 为圆周移位参数。因此,只需对去初始载波频率 $w_{D0}'$ 后的中频序列经过一次FFT运算,在频域上采用 $l$ 进行圆周移位,即可代替多普勒搜索中的 $\pm 10$  kHz频率补偿 $\{w_{D0}', w_{D0}' \pm 2\pi * 1000, w_{D0}' \pm 2\pi * 2000, w_{D0}' \pm 2\pi * 3000, \dots, w_{D0}' \pm 2\pi * 10000\}$ 和多次FFT运算,从而提高了捕获效率。

然而,对于1 ms的积分长度来说,当搜索多普勒频率正好落在相邻频率间隔中间时,式(7)中 $\Delta f T_{ca} = 1/2, L = 1$ 时,有捕获损耗 $D_{acq} = -3.92$  dB。这时信号的幅度将会下降,对于搜索弱信号,这样的损耗是不能接受的。因此,针对多普勒搜索,本文在频率补偿上,采用不同的下变频方式,选择不同的初始载波频率 $w_{D0}' = 0$ 和 $\pm 500$  Hz,频率补偿为1000 Hz,进行 $\pm 10$  kHz频率搜索,使式(7)中 $\Delta f T_{ca} = 1/4, D_{acq} = -0.92$  dB,从而最大限度地弥补了捕获损耗。

### 2.3 差分相干累积算法

对于传统的弱信号捕获,采用式(6)的非相干积分累加来提高增益,它将多个数据段中同相和正交支路的相干积分结果的平方和的平方根进行相加,而其中的平方运算会同时带来噪声能量的增加,导致平方损耗的产生。针对这个问题,Harald Elders-Boll等提出了一种差分相干累积算法<sup>[7]</sup>来改进,其数学模型为:

$$D_k = \sum_{m=1}^M Z_k^*(m+1) Z_k(m) = \sum_{m=1}^M \text{conj}(I_{m+1} + jQ_{m+1}) * (I_m + jQ_m) = \sum_{m=1}^M (I_m I_{m+1} + Q_m Q_{m+1}) \quad (9)$$

其中: $Z_k(m+1)$ 和 $Z_k(m)$ 为相邻样点的相关输出,通过两者的共轭相乘,使对噪声的放大降低,故相对于非相干积分的平方损耗,对信噪比会更优化。而本文从受导航比特跳变影响出发,相邻 $Z_k^*(m+1) Z_k(m)$ 累加时,可能因符号不同而造成累加抵消,故对式(9)改进为模的累加:

$$D_k = \sum_{m=1}^M |Z_k^*(m+1) Z_k(m)| \quad (10)$$

### 2.4 算法框图与步骤

本文基于FFT的差分相干累积算法模型如图2所示,具

体步骤可描述如下：

1) 对输入采样频率 $f_s$ ,载波中频 $f_0$ 的中频序列进行本地初始频率 $w_{D0}' = 0$ 或 $\pm 500$  Hz 3 种同相和正交支路的载波相乘剥离,并组合成复信号。

2) 对1)的3种复信号分别进行连续 $L$ 个 $T_{ca} = 1$  ms 码周期的累加,组合成 $M$ 个1 ms 的累加数据段,并转换成 $M$ 行, $(f_s * T_{ca})$ 列的矩阵,然后进行FFT。

3) 对3种圆移的FFT信号(包括2)输出信号)分别与本地存储的PRN码FFT后的共轭信号进行相乘,然后再进行IFFT,得到相干积分矩阵。

4) 对3)得到的3种频率相干积分的 $M \times (f_s * T_{ca})$ 矩阵进行式(10)的差分相干累积处理,得到 $1 \times (f_s * T_{ca})$ 的矩阵,存储到对应频率的 $41 \times (f_s * T_{ca})$ 的矩阵中,其中行数41表示多普勒频率范围 $[-10\text{ kHz}, 10\text{ kHz}]$ ,步进为500 Hz 的频率点。若41个频率点搜索完成,转至6)进行门限判决;否则继续5)。

5) 对3)的3种输入信号进行频率圆移,方法是 $w_{D0}' = 0$ 的信号进行 $l = \{\pm 1, \pm 2, \dots, \pm 10\}$ 圆移; $w_{D0}' = 500$  Hz 的进行 $l = \{1, 2, \dots, 9\}$ 圆移; $w_{D0}' = -500$  Hz 的进行 $l = \{-1, -2, \dots, -9\}$ 圆移,然后转入3)进行处理。

6) 对差分相干累积结果的 $41 \times (f_s * T_{ca})$ 矩阵取最大相关峰值,若超过所设捕获门限,则本星捕获成功,获得多普勒频率和码相位;否则更换本地PRN码转入3)重新进行各个频点的搜索。

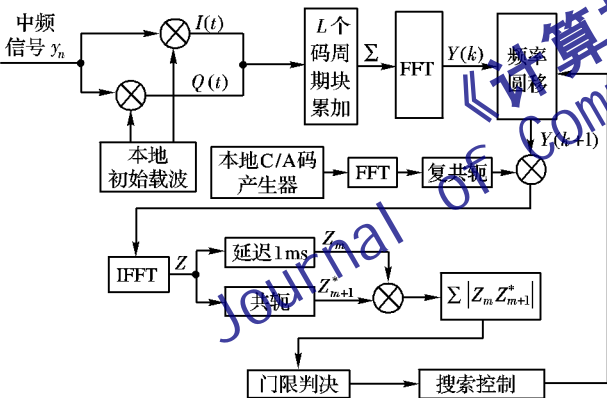


图2 本文算法框图

### 3 仿真实验与分析

为了验证本文提出的GPS弱信号捕获方法的有效性,对仿真的多颗卫星弱信号进行捕获,并分析与传统方法在运算量上的比较。在Matlab平台下,采用Simulink工具搭建GPS数字中频信号源模块,生成如表1参数的GPS弱信号,其中采样率为16.368 MHz,中频频率为4.092 MHz,量化位数为2。

表1 仿真GPS弱信号参数

PRN 值	信噪比/dB	码相位	多普勒频偏/Hz
2	-35	3367	1753
7	-36	4269	-2227
11	-37	8752	-4770
13	-39	9273	5945

表1中各卫星PRN的功率(信噪比)均低于GPS软件接收机正常接收信号的标准-19 dB<sup>[6]</sup>。采用本文的捕获方法对仿真信号进行捕获,选择相干积分累加时间 $L = 10$  ms,差分相干累积数据段 $M = 10$ ,在多普勒频偏 $[-10\text{ kHz}, 10\text{ kHz}]$

和1023个码相位下搜索32颗卫星信号,根据捕获峰值获得信噪比,设置门限为10 dB,虚警概率小于 $10^{-6}$ 。

图3是第13号星的三维捕获和码相位捕获结果。从图(a)可看出本文方法捕获-39 dB的弱信号具有明显的相关峰值,并且图(b)中显示捕获码相位为9273,与仿真的中频信号源参数相符合,表明了本文弱信号捕获方法具有较高的灵敏度和准确性。

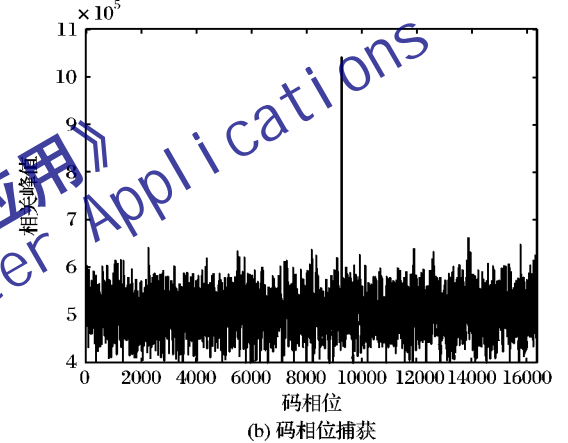
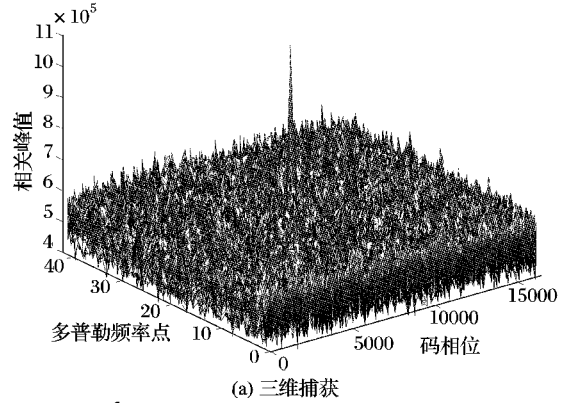


图3 第13号星捕获结果

图4显示了本文方法对32颗卫星的捕获结果,其中卫星PRN2、PRN7、PRN11、PRN13的捕获信噪比超过门限10 dB,捕获成功;而其他星则未能捕获,与仿真的中频信号源相符合。

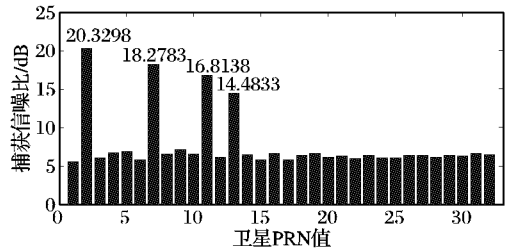


图4 多星捕获结果

表2分析了传统的弱信号捕获方法与本文方法在运算量上的比较。

表2 算法运算量的比较

方法	FFT	IFFT	等效总数
传统方法	$32 * 21 * L * M$	$32 * 21 * M$	$672(L+1)M$
本文方法	$32 * 3 * M$	$32 * 41 * M$	$1408M$

在仿真实验中, $L = 10, M = 10$ ,根据表2可以计算出本文方法在FFT/IFFT等效运算量上是传统方法的4/21,表明本文方法具有捕获速度上的优势,对于捕获效率要求严格的软件接收机而言更适用。

(下转第822页)



现,  $9(3 \times 3)$  组 LED 阵列光源设计已经基本达到了前者在对应差异率及均匀光照率上的表现。同时由于该方案同时继承 Nakagawa 研究团队的采用分组的 LED 阵列的设计思路, 因而同样便于同下一代照明设计的结合以及产品的大规模推广。

$16(4 \times 4)$  组 LED 阵列光源设计方案也有在无线信号分布均匀性及实现复杂度的兼顾表现。仿真分析显示, 不同接收位置接收到无线光信号功率的最大值为 4.56 dBm, 最小值为 0.74 dBm, 如图 5(d) 所示。对应差异率  $d$  为 58.5%。在照明方面, 工作面上接收到的光照度的最大值为 1176.8 lx, 平均值为 962.20 lx, 最小值为 558.9 lx, 如图 6(d) 所示。可以算得, 相应的均匀光照率为 0.58。

以上量化结果显示, 通过增加 LED 阵列的分组数目, 以分组为单位增加光源的均匀分布程度, 可以避免最初的  $4(2 \times 2)$  组 LED 阵列光源设计在中心区域出现覆盖低谷的缺陷, 同时保留了在实现复杂度上和便于工程实现上的出色表现。

#### 4 结语

本文对基于 LED 的室内光无线系统部分进行了讨论。重点比较分析了已有光源设计方案在无线信号覆盖及商用性上的各自表现, 并给出了具体的量化分析。同时针对以上分析, 本文提出了两种工程实践意义的光源设计方案。对应的仿真分析显示这两种分布式设计方案能够同时兼顾和改进无线信号覆盖均匀性及光源实现复杂度上的表现。

#### 参考文献:

- [1] O'BREAN D C, FAULKNER G. Home access networks using optical wireless transmission [C]// Proceedings of the 19th International Symposium Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 15 - 18.
- [2] WANG Z, YU C, ZHONG W, JIAN C. Performance improvement by tilting receiver plane in M-QAM visible light communications [J]. Optics Express, 2011, 19(14): 13418 - 13427.
- [3] ELGALA H, MESLEH R, HAAS H. Indoor Broadcasting via white LEDs and OFDM [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(3): 1127 - 1134.
- [4] SARKER S, DIXIT S, MUKHERJEE B. Hybrid Wireless-Optical Broadband-Access Network (WOBAN): A review of relevant challenges [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(11): 3329 - 3340.
- [5] GREEN R J. Secure communications: the infrared alternative [C]// Proceedings of IEEE ICTON Mediterranean Winter Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 1 - 4.
- [6] NTOGARIG, KAMALAKIS T, SPHICOPOULOS T. Performance analysis of non-directed equalized indoor optical wireless systems [C]// Proceedings of 2008 IEEE Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 156 - 160.
- [7] CARRUTHERS J B. Propagation modeling for indoor optical wireless communications using fast multi-receiver channel estimation [J]. IEEE Proceedings Optoelectronics, 2003, 150(10): 473 - 481.
- [8] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100 - 107.
- [9] GRUBOR J. Broadband information broadcasting using LED-based interior lighting [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(24): 3883 - 3892.
- [10] OMEGA. Project [EB/OL]. [2010-10-10]. <http://www.ict-omega.eu>.
- [11] BERTRAND M, BOUCHET O, BESNARD P. Personal optical wireless communications: LOS/WLOS/DIF propagation model and QOFI [C]// Proceedings of 2008 IEEE Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 179 - 182.
- [12] WON E T. IEEE 802.15.7g VLC Closing Report [C]// Proceedings of IEEE 802.15 Interim Meeting. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008.
- [13] KAHN J M, BARRY J R. Wireless infrared communication [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(2): 265 - 298.
- [14] HASHEMI S K. Orthogonal frequency division multiplexing for indoor optical wireless communications using visible light LEDs [C]// Proceedings of 2008 IEEE Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 174 - 178.
- [15] TANAKA Y. Indoor visible light data transmission system utilizing white LED lights [J]. IEICE Transactions on Communication, 2003, E86-B(8): 2440 - 2454.
- [16] KOMINE T, LEE J H, HARUYAMA S, et al. Adaptive equalization system for visible light wireless communication utilizing multiple white LED lighting equipment [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2009, 8(6): 2892 - 2900.

(上接第 818 页)

#### 4 结语

本文面向 GPS 软件接收机的捕获应用提出了一种基于 FFT 改进的差分相干累积算法。该算法对相干积分进行了块累加处理, 在多普勒搜索中采用频域的圆周移位搜索代替传统时域上的频率补偿搜索, 同时为了补偿频域分量间的捕获损耗, 采用了不同的下变频, 最后采用差分相干累积处理来提高信噪比。实验结果表明, 相对于传统的弱信号捕获方法, 该算法能捕获到低至 -39 dB 的弱信号, 并能精确捕获到码相位, 捕获信噪比高, 并且提高了捕获速度, 具有一定的实际意义。

#### 参考文献:

- [1] YAO XIANGZHEN, QIN XINXIAN, CUI SHAOLONG, et al. The optimizations of FFT algorithm in GPS software receiver [C]// Proceedings of 19th International Conference on Geoinformatics. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 1 - 6.
- [2] 胡永辉, 胡永辉, 蔡成林. GPS 信号串行捕获算法研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(1): 186 - 189.
- [3] 徐卫明, 刘雁春, 朱慕华. GPS 中频信号快速捕获技术分析 [J]. 测绘科学, 2007, 32(5): 98 - 100.
- [4] 姜冰心, 张中兆, 孟维晓. 弱信号下软件 GPS 接收机全比特捕获算法 [J]. 电子技术应用, 2008(9): 99 - 102.
- [5] YANG L, TIAN J. Analysis and compare of weak GPS signal acquisition algorithms [C]// CCWMC 2009: Proceedings of IET International Communication Conference on Wireless Mobile and Computing. [S.l.]: IET, 2009: 492 - 495.
- [6] TSUI J B-Y. Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach [M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2004: 113 - 117, 192 - 227.
- [7] ELDERS-BOLL H, DETTMAR U. Efficient differentially coherent code/Doppler acquisition of weak GPS signals [C]// ISSSTA 2004: IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004: 731 - 735.