

基于 DBZP 差分相干的 GPS 信号捕获算法

莫建文^{1,2}, 欧阳缮², 肖海林², 孙希廷²

(1. 西安电子科技大学工程学院, 陕西 西安 710071;
2. 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对弱信号环境下全球定位系统(global position system, GPS)信号捕获问题,提出了一种基于双块零拓展(double block zero padding, DBZP)差分相干捕获算法。该算法将快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)、DBZP、差分相干及频率误差修正等 4 项技术有机结合,从而有效减小了在 FFT 计算过程中由大多普勒频移引起的码片速率变化而造成的相关功率损失,同时也削弱了残余多普勒频率造成的功率损失。实验表明,算法能明显提高系统捕获性能,在仿真数据集下,与直接 FFT 差分相干算法相比,捕获灵敏度提高了约 2.8 dB,并在给定的积分时间及载噪比下,捕获频率误差的标准差小于 20 Hz;在实验数据集下,与直接 FFT 差分相干算法相比,捕获结果信噪比提高了约 3 dB。

关键词: 全球定位系统信号; 差分相干; 双块零拓展; 频率误差修正

中图分类号: TN 911.23

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2012.06.01

GPS signal acquisition algorithm based on DBZP differential coherent

MO Jian-wen^{1,2}, OUYANG Shan², XIAO Hai-lin², SUN Xi-yan²

(1. School of Electronics and Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. College of Information and Communication, Guilin University of Electronics and Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: To solve the acquisition problem of global position system (GPS) signals in weak signal environment, a new double block zero padding (DBZP) differential coherent acquisition algorithm is proposed. Integrating fast Fourier transform (FFT), DBZP, differential coherent methods with frequency error correction technology organically, the algorithm effectively reduces chip rate variation caused by large Doppler frequency shift and the correlational power loss as a consequence in the course of computing FFT. Meanwhile the power loss caused by the Doppler frequency error is also weakened. Experiment results show that the acquisition system has a much higher performance using the proposed algorithm, and it can be seen that the sensitivity is improved about 2.8 dB compared with the direct FFT acquisition algorithm in simulated data sets. The standard deviation of the Doppler frequency is less than 20 Hz when the integration time and carrier-to-noise ratio are given, and the signal-to-noise ratio (SNR) is improved about 3 dB compared with the direct FFT acquisition algorithm in experimental data sets.

Keywords: global position system (GPS) signal; differential coherent; double block zero padding (DBZP); frequency error correction

0 引言

全球定位系统(global position system, GPS)软件接收机比传统的硬件接收机具有更好的灵活性和适应性,成为目前卫星导航技术研究的热点和发展方向^[1-4]。但是, GPS 软件接收机中没有专门的相关运算硬件,如何快速、高效捕获成为软件接收机的核心问题。快速傅里叶变换(fast

Fourier transform, FFT)的频域捕获技术具有运算效率高的特性^[5-7],但积累时间不能过长,差分相干处理技术^[8-9]将相干积分结果进行差分处理,延长了积累时间,提高了弱 GPS 信号的捕获灵敏度。然而当接收机和 GPS 卫星相对速度较大时,接收机接收的 GPS 信号将产生较大的多普勒频移^[10],在长时间积分下,大多普勒频移将对码片速率产生较大影响,造成码周期不准,用 FFT 做循环卷积时存在

相关功率损失^[11];差分相干捕获也会引起残余载波多普勒频率的相关功率损失^[12-13]。文献[14-15]利用双块零拓展(double block zero padding, DBZP)技术减小了 FFT 计算过程中由大多普勒频移引起码片速率变化造成的相关功率损失,然而捕获过程中,在每个预检测积分时间内都需要对最可靠的数据位组合进行估计,并利用它去掉先前的数据位,这样需要较大的运算开销。

针对上述问题,提出了一种 DBZP 差分相干捕获算法,该算法采用 FFT、DBZP、差分相干、频率误差修正等 4 项技术相结合,既能实现高效快速的 GPS 信号捕获,又有效降低了在 FFT 计算过程中由大多普勒频移引起码片速率变化造成的相关功率损失,同时削弱了残余载波多普勒频率造成的功率损失。

1 基于 DBZP 差分相干捕获

1.1 基于 DBZP 差分相干捕获原理

从卫星发射的 L1 频段 GPS 模拟信号下变频和采样后的数字中频信号为

$$r(t_j) = Ad(t_j)C\left((t_j - \tau)\left(1 + \frac{f_d}{f_{L1}}\right)\right) \cdot \cos(2\pi(f_{IF} + f_d)t_j + \phi) + n(t_j) \quad (1)$$

式中, t_j 为第 j 个采样时刻; τ 为信号到达接收机的时延; A 为信号幅度; f_{L1} 为高频载波频率; f_{IF} 为中频载波频率; f_d 为多普勒频移; ϕ 为初始相位; $C(t)$ 为 C/A 码; $d(t)$ 为导航数据信息; $n(t)$ 为加性高斯白噪声。

对接收的弱中频信号进行差分相干捕获,设相干积分时间为 T_a ,信号采样间隔为 T_s ,则第 k 个相干时间段的数字中频信号表示为

$$r_k(t_i) = Ad(t_i)C\left((t_i - \tau)\left(1 + \frac{f_d}{f_{L1}}\right)\right) \cdot \cos(2\pi(f_{IF} + f_d)t_i + \phi) + n(t_i), \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

式中, $N = T_a/T_s$ 为正整数; $t_i = (kN + i)T_s$ 为采样时刻。

第 k 个时间段本地产生的伪码信号模型为

$$s_k(t_i) = C\left((t_i - \hat{\tau})\left(1 + \frac{\hat{f}_d}{f_{L1}}\right)\right) \exp(j2\pi(f_{IF} + \hat{f}_d)t_i) \quad (3)$$

式中, \hat{f}_d 为多普勒频移估计值; $\hat{\tau}$ 为时延的估计值。

由于多普勒频移对码相位的影响因子为 $1 + \frac{f_d}{f_{L1}}$,当多普勒频移较大且积累时间较长时,造成码片速率发生较大变化,从而对码周期产生较大影响,直接利用 FFT 对数字中频信号与本地信号做相关并进行差分累加,会造成相关峰值衰减较大^[11],从而影响捕获灵敏度。DBZP 技术可以改善在 FFT 计算过程中由大多普勒频移引起码片速率变化造成的相关功率损失。

对式(2)和式(3)中的信号进行 DBZP,得

$$r'_k(i) = \begin{cases} r_k(i), & 0 \leq i < N \\ r_{k+1}(i - N), & N \leq i < 2N \end{cases} \quad (4)$$

$$s'_k(i) = \begin{cases} s_k(i), & 0 \leq i < N \\ 0, & N \leq i < 2N \end{cases} \quad (5)$$

将式(4)和式(5)中的对应块利用 FFT 循环卷积进行相关运算,有

$$Y_k(\hat{\tau}) = \text{IFFT}(\text{FFT}(r'_k(i))(\text{FFT}(s'_k(i)))^*) = \frac{1}{2}Ad(k)R_c(\Delta\tau)T_aS_a(\pi\Delta f_d T_a) \cdot \exp(j((2k-1)\pi\Delta f_d T_a + \theta)) + n(k) \quad (6)$$

式中, $Y_k(\hat{\tau})$ 为 \hat{f}_d 下的不同码时延的相关结果; $R_c(\Delta\tau)$ 为 C/A 码循环卷积相关值; $\Delta\tau = \hat{\tau} - \tau$, $\Delta f_d = f_d - \hat{f}_d$ 为残余多普勒频率偏差; $S_a(x) = \sin(x)/x$; $n(k)$ 为积分后的噪声项,其方差为 $\sigma_n^2 = N_0 T_a/4$ 。将式(6)中的第一个有用信息子块保存,即

$$Y'_k(\hat{\tau}) = Y_k(\hat{\tau}), \hat{\tau} < NT_s \quad (7)$$

对式(7)中保存的信息进行 K 次差分累加得

$$Z(\hat{\tau}) = \left| \sum_{k=1}^K Y_{k-1}^*(\hat{\tau})Y'_k(\hat{\tau}) \right| \quad (8)$$

$Z(\hat{\tau})$ 的均值为

$$m_z = A^2 R_c^2(\Delta\tau)S_a^2(\pi\Delta f_d T_a) \exp(j2\pi\Delta f_d T_a) \cdot \sum_{k=1}^K d(k)d(k-1) \quad (9)$$

捕获时, $Z(\hat{\tau})$ 的判决值可表示为

$$Z_a(\hat{f}_d) = \max_{\hat{\tau}} Z(\hat{\tau}, \hat{f}_d) \quad (10)$$

1.2 捕获频率误差修正

捕获过程中,当码相位完全对齐且多普勒频率误差为零时,式(9)中的 $S_a(\pi\Delta f_d T_a)$ 项具有最大值 1,然而,随着积累时间的增加残余多普勒频率误差将变大,导致该项值降低,从而影响捕获性能,捕获过程中采用频率误差修正技术可以减小该影响。

由于式(9)中相邻累加项中多普勒频率偏差保持不变^[12],则相位估计值为

$$\varphi = \arg(m_z) = 2\pi\Delta f_d T_a,$$

$$\Delta f_d \in \left[-\frac{1}{2T_a}, \frac{1}{2T_a}\right] \quad (11)$$

多普勒频率偏差的估计值为

$$\Delta \hat{f}_d = \frac{1}{2\pi T_a} \arg(\varphi) =$$

$$\frac{1}{2\pi T_a} \arg\left(\sum_{k=1}^N Y_{k-1}^* Y_k\right), \varphi \in [-\pi, \pi] \quad (12)$$

利用式(12)中估计的多普勒频率偏差,修正差分相干捕获得到的载波频率,修正后的多普勒频率为

$$\hat{f}'_d = \hat{f}_d + \Delta \hat{f}_d \quad (13)$$

对修正后的结果进行二次捕获,从而减小了残余多普勒频率的影响,提高了捕获频率精度,即减小了式(9)中 Δf 的值。

1.3 算法性能分析

在没有信号存在时(H_0),式(10)检测量近似为中心 χ^2 分布:

$$f(z | H_0) = \frac{1}{2^K \Gamma(K)} \left(\frac{z}{\sigma_b^2}\right)^{K-1} \exp\left(-\frac{z}{2\sigma_b^2}\right) \quad (14)$$

式中,方差 $\sigma_b^2 = K\sigma_a^4$ 。

当有信号存在时(H_1),式(10)检测量近似为非中心 χ^2 分布:

$$f(z | H_1) = \frac{1}{\sigma_a^2} \exp\left(-\frac{z + |m_z|^2}{\sigma_a^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{2|m_z|\sqrt{z}}{\sigma_a^2}\right) \quad (15)$$

式中,均值 m_z 同式(9)中均值,方差为

$$\sigma_a^2 = K\sigma_n^4 + 2\sigma_n^2 AKS a^2 (\pi\Delta f_d T_a)$$

设检测阈值为 V_T ,利用式(10)在 N 个累加值 $Z(\hat{\tau})$ 中寻找最大值,如果此最大值大于阈值 V_T ,这时正确检测概率为

$$P_d = \int_{V_T}^{\infty} f(x/H_1) \left[\int_0^x f(z/H_0) dz \right]^{N-1} dx \quad (16)$$

漏警概率为

$$P_m = \int_0^{V_T} f(x/H_1) \left[\int_0^x f(z/H_0) dz \right]^{N-1} dx \quad (17)$$

虚警概率为

$$P_{fa} = 1 - P_d - P_m \quad (18)$$

由式(15)~式(18)知,捕获性能和均值 m_z 的值密切相关。

当积累时间一定时,较大的多普勒频移将引起码片速率变化较快,造成标准 C/A 码与接收的 C/A 码相对偏移较多,从而引起较大的相关功率损失。设经过时间 T_{cs} 后,标准 C/A 码和接收的 C/A 码相对偏移一个采样点,则 T_{cs} 可表示为

$$T_{cs} = \frac{1}{f_s} \frac{f_{L1}}{f_d} \quad (19)$$

表 1 描述了采样频率为 12 MHz 时,多普勒偏移 f_d 与 T_{cs} 之间的关系。由表 1 知,多普勒频移越大,标准 C/A 码和接收的 C/A 码之间偏移一个采样点经过的时间越短,在相同的累积时间内偏移的采样点数越多。

表 1 采样频率为 12 MHz 时, f_d 与 T_{cs} 的关系

f_d/Hz	500	1 000	2 000	5 000
T_{cs}/ms	260	130	65	26

设最坏情况下, N 个采样点有 ΔN 个采样点偏移(未对齐)。根据伪码特性,未对齐码对相关值总和的贡献几乎为零,如果不进行处理,直接用循环卷积对数字中频信号与本地信号做相关,有

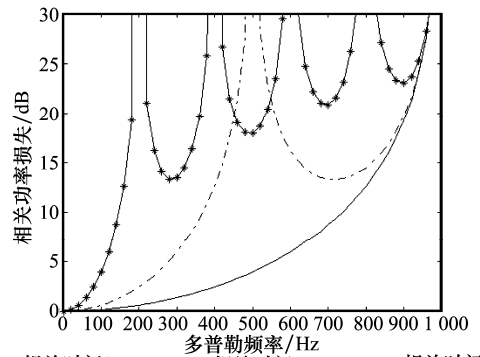
$$R'_c(\Delta\tau) = (N - \Delta N)/N = 1 - \Delta N/N \quad (20)$$

由式(20)知, ΔN 越大, $R'_c(\Delta\tau)$ 值越小。

采用 DBZP 做相关后,对接收信号做双块拓展,拓展后的两个连续数据块,与补零拓展后的本地信号大致 N 点相关对齐,则式(9)中 $R_c(\Delta\tau) \approx N/N = 1$,接近理想值。因此,捕获中采用 DBZP 技术后,式(9)中相关值 $R_c(\Delta\tau)$ 有所提升,从而改善了均值 m_z ,提高了捕获灵敏度。

式(9)中 $S_a(\pi\Delta f_d T_a)$ 项引起的功率损失可表示为 $L_{\Delta f_d} = 20 \lg [S_a^{-1}(\pi\Delta f_d T_a)]^{[13]}$,图 1 描述了多普勒频率偏差

引起的功率损失。由图 1 知,多普勒频率偏差越大,引起的功率损失也越大。



—: 相关时间 1ms; ---: 相关时间 2ms; -+ -: 相关时间 5ms。

图 1 多普勒频率偏差引起的相关功率损失

捕获过程中,采用频率误差修正技术后,多普勒频率得到了更精确地校正,即采用频率误差修正技术后,多普勒频率偏差 Δf 减小了,从而减小了 $S_a(\pi\Delta f_d T_a)$ 引起的功率损失,提高了捕获性能。

由上述分析知,捕获中将 DBZP 和频率误差修正技术结合后,更大程度上提高了弱 GPS 信号的正确检测概率,即提高了弱 GPS 信号捕获灵敏度。

2 实验及分析

为了检验算法的捕获性能,在介绍算法捕获流程图的基础上,采用仿真数据集及实验数据集对算法性能进行测评。

2.1 算法捕获流程

GPS 软件接收机的 DBZP 差分相干捕获原理如图 2 所示。

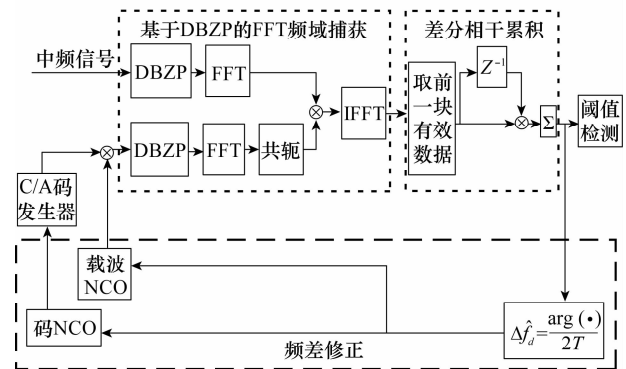


图 2 DBZP 差分相干捕获算法

结合图 2 对算法处理流程简述如下:

步骤 1 对数字中频信号进行采样,并设定合适的多普勒频移搜索间隔;

步骤 2 利用式(4)和式(5)对采样后 GPS 信号进行 DBZP,并用式(6)对拓展后的信号进行 FFT;

步骤 3 按照式(8)对进行 FFT 后的信号进行差分相干运算;

步骤 4 找出超过阈值 V_T 的最大差分相干值 $Z_d(\hat{f}_d)$,得到初捕获的码相位估计值 $\hat{\tau}$ 和多普勒频移估计值 \hat{f}_d ;

步骤 5 根据式(12)对式(8)中差分相干结果进行计算,利用频率误差修正技术得出多普勒频移误差的估计值 $\Delta \hat{f}_d$,对捕获的多普勒频移 \hat{f}_d 进行校正(图 2 中“码 NCO”(numerical controlled oscillator)、“载波 NCO”模块修正多普勒频移);

步骤 6 校正后,对码相位进行二次搜索,得到的码相位和校正的多普勒频移估计值即为捕获结果。

2.2 仿真数据集下灵敏度改善

为了评估弱信号环境下本文算法的捕获性能,采用仿真数据集对算法捕获灵敏度进行测评,并同不作频率误差修正的 DBZP 差分相干算法及直接 FFT 差分相干捕获算法进行比较。

中频采样频率为 12 MHz,DBZP 中每段长度为 12 000 个采样点(即 1 ms),多普勒频移搜索范围为 -10 ~ +10 kHz,搜索步长为 500 Hz。图 3 描述了 3 种捕获算法在多普勒频移分别为 3.2 kHz、8.2 kHz,积累时间分别为 100 ms、200 ms,对不同载噪比运行 1 000 次蒙特卡罗实验的正确检测率比较结果。其中,DFC 表示直接 FFT 差分相干捕获算法;DFC1 表示不作频率误差修正的 DBZP 差分相干算法;DFC2 表示本文提出 DBZP 差分相干捕获算法。

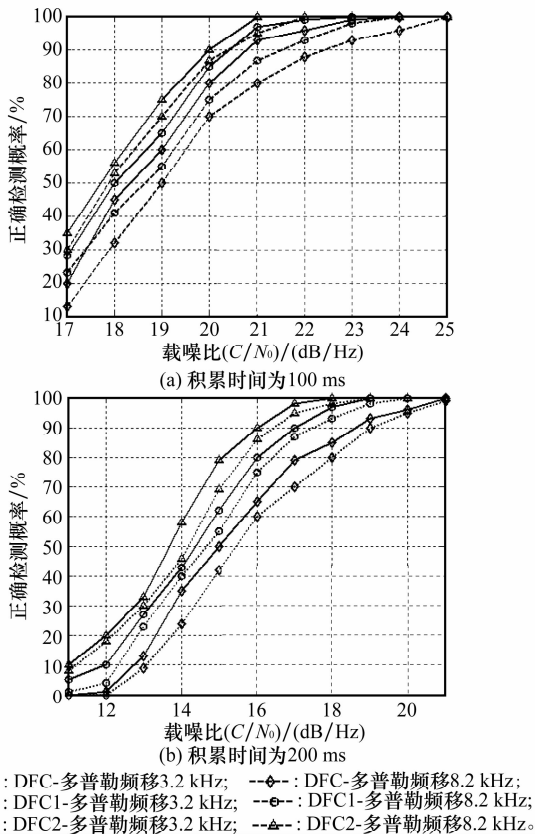


图 3 3 种捕获算法灵敏度比较结果

图 3(a)描述的是积累时间为 100 ms,3 种算法在不同多普勒频移下的比较结果,图 3(b)描述的是积累时间为 200 ms

的比较结果。由图 3(b)知,当多普勒频移较大时(例如,多普勒频率为 8.2 kHz),对于 90% 的检测概率,本文算法比不作频率误差修正的 DBZP 差分相干算法灵敏度提高约 1.1 dB,比直接 FFT 差分相干算法提高约 2.8 dB。综合图 3(a)、图 3(b)知,积累时间越长,本文算法性能改善越明显,例如,对于 70%、80% 检测概率,在积累时间分别为 100 ms 和 200 ms 时,对本文算法与直接 FFT 差分算法性能的比较,发现积累时间 200 ms 比 100 ms 性能改善明显。

为了考察本文算法在弱信号环境下捕获频率精度,图 4 描述了残余多普勒频率误差为 200 Hz,积累时间分别为 100 ms、200 ms,不同载噪比下利用式(12)估计的频率误差的标准差。由图 4 知,积累时间越长,捕获频率误差标准差越小,经本文算法捕获得到的多普勒频率越接近实际值;当积累时间为 200 ms,载噪比大于 26 dB/Hz 时,多普勒频率误差标准差小于 20 Hz,与直接 FFT 差分相干捕获频率精度由频率搜索步长决定相比,频率精度有很大提升,并保持稳定。

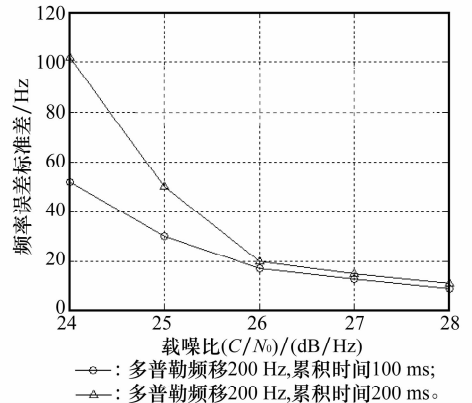


图 4 捕获频率误差标准差

2.3 实验数据集下性能分析

为了进一步评估算法性能,本文用实测 PRN5 号卫星数据进行实验,并同不作频率误差修正的 DBZP 差分相干算法及直接 FFT 差分相干捕获算法进行比较。实测信号的中频频率为 4.309 MHz,采样频率为 12 MHz,DBZP 中每段长度为 12 000 个采样点,多普勒频移搜索范围为 -10 ~ +10 kHz,搜索步长为 500 Hz,积累时间为 100 ms。3 种算法捕获结果均在码时延的第 4 044 个采样点处出现峰值。图 5 描述了 3 种算法捕获实测 PRN5 号卫星数据的比较结果。图 5(a)为本文算法捕获结果,由于经过频率误差修正,相关峰最大值出现在多普勒频移为 2.81 kHz 处;图 5(b)为不作频率误差修正的 DBZP 差分相干算法捕获结果,图 5(b)中相关峰最大值出现在多普勒频移为 3 kHz 处;图 5(c)为直接 FFT 差分相干算法捕获结果,出现如图 5(c)所示峰值时,多普勒频移为 3 kHz。分析图 5 知,本文算法比不作频率误差修正的 DBZP 差分相干算法捕获结果信噪比提高约 1 dB,比直接 FFT 差分相干算法提高约 3 dB。分析 3 种算法中相关峰出现最大值时的多普勒频移知,本文算法能大大提高捕获频率精度。

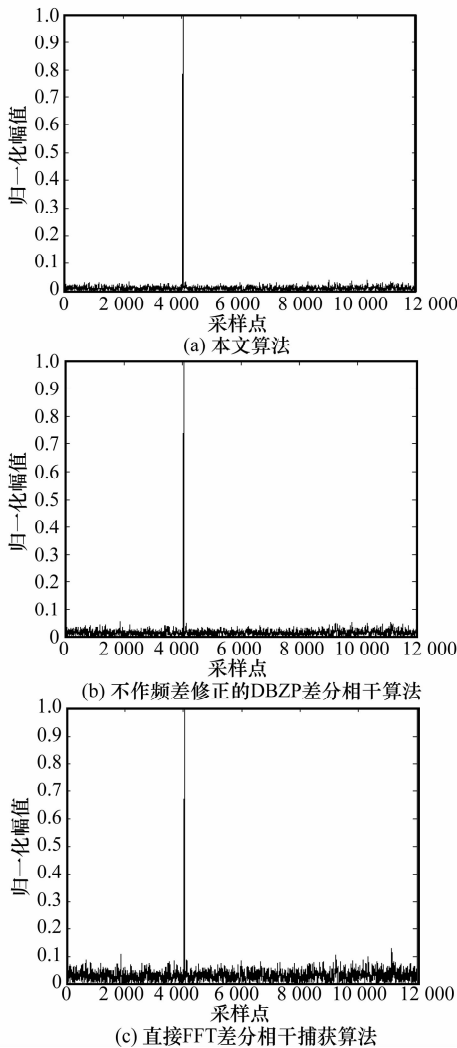


图5 捕获实测信号比较结果

3 结论

本文提出了一种基于 DBZP 差分相干 GPS 信号捕获算法。该算法采用 DBZP 技术与 FFT 循环卷积相结合,既能实现高效快速的 GPS 信号捕获,还能改善 FFT 计算过程中由大多普勒频移引起码片速率变化而造成的相关功率损失;同时捕获过程中引入了频率误差修正技术,削弱了残余多普勒频率误差造成的功率损失。

仿真了不同多普勒频率、不同积累时间及不同信噪比下 GPS 信号的正确检测率,并与不作频率误差修正的 DBZP 差分相干算法及直接 FFT 差分相干算法进行比较,发现在弱信号环境下,对于 90% 的检测概率,本文算法比不作频率误差修正的 DBZP 差分相干算法灵敏度提高约 1.1 dB,比直接 FFT 差分相干算法提高约 2.8 dB,并且多普勒频移越大,累积时间越长时,捕获性能改善越明显。

仿真了本文算法在不同积累时间,不同载噪比下捕获频率误差标准差,发现本文算法捕获频率精度高,且具有捕获频率精度随积累时间增加而提高的优点。对实测的 PRN5 号卫星数据进行了捕获,并同不作频率误差修正的 DBZP 差

分相干算法及直接 FFT 差分相干算法进行比较。结果表明,本文算法比不作频率误差修正的 DBZP 差分相干算法捕获结果信噪比提高约 1 dB,比直接 FFT 差分相干算法提高约 3 dB;此外,本文算法能大大提高了捕获频率精度。

参考文献:

- [1] Kovar P, Kacmarik P, Vejrazka F. Interoperable GPS, GLO-NASS and Galileo software receiver[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2011, 26(4):24-30.
- [2] Li X, Akos D. Implementation and performance of clock steering in a software GPS L1 single frequency receiver[J]. *Journal of the Institute of Navigation*, 2010, 57(1):69-85.
- [3] Yu X, Sun Y, Liu J, et al. Design and realization of synchronization circuit for GPS software receiver based on FPGA[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2010, 21(1):20-26.
- [4] Juang J C, Chen Y H. Accounting for data intermittency in a software gnss receiver[J]. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 2009, 55(2):327-333.
- [5] 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. (Zhao L, Gao S H, Ding J C. Improved acquisition for high dynamic GPS signals based on FFT[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(1):151-156.)
- [6] 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. (Chen X, Zhang R, Shuai T. A new rapid acquisition algorithm based on FFT for GPS signals [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(1):162-166.)
- [7] Li H, Lu M, Feng Z. Direct GPS P-code acquisition method based on FFT[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2008, 13(1):9-16.
- [8] Borio D, O'Driscoll C, Lachapelle G. Coherent, noncoherent, and differentially coherent combining techniques for acquisition of new composite GNSS signals[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(3):1227-1240.
- [9] Zhao W, Kou Y, Zhang Q. Segmented matched filter with differentially coherent combined for PN code fast acquisition[C]// *Proc. of the International Symposium on Communications and Information Technology*, 2009:876-880.
- [10] Wang S C, Yang D F, Liu Z G, et al. Simulation study on a novel high-dynamic GPS software receiver[J]. *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2009, 28(6):1386-1401.
- [11] Ziedan N I. *GNSS receivers for weak signals*[M]. Norwood: Artech House, 2006.
- [12] 丁继成,赵琳,余小辉. 应用频率误差修正的高灵敏度 GPS 信号捕获技术[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2009, 30(8):887-892. (Ding J C, Zhao L, Yu X H. A highly sensitive GPS signal acquisition technique using frequency error correction[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2009,30(8):887-892.)
- [13] Yu W, Zheng B, Watson R, et al. Differential combining for acquiring weak GPS signals[J]. *Signal Processing*, 2007, 87(5):824-840.
- [14] Ziedan N I, Garrison J L. Unaided acquisition of weak GPS signals using circular correlation or double-block zero padding[C]// *Proc. of the IEEE Position Location and Navigation Symposium*, 2004:26-29.
- [15] 焦瑞祥,茅旭初. 基于 DBZP 方法的微弱 GPS 信号的快速捕获[J]. *电子学报*, 2008, 36(12):2285-2289. (Jiao R X, Mao X C. Double block zero padding-based fast-acquisition of weak GPS signal [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008,36(12):2285-2289.)