

惯性信息辅助的高动态弱 GPS 信号快速捕获

张敏虎, 任 章, 华春红

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 通过分析高动态弱 GPS 信号对捕获的影响, 提出了一种惯性信息辅助的快速捕获算法。该算法利用惯性系统的速度估算 GPS 载波信号的多普勒频移, 减小频率搜索范围。同时, 通过改进基于快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 的相干-非相干积分捕获策略, 克服了导航数据位边沿和多普勒速率引起的能量扩散, 提高了捕获的灵敏度和速度。最后, 对高动态弱 GPS 信号捕获进行了仿真验证, 结果表明该算法仅用 300 ms 的输入数据就可以有效捕获载噪比为 24dB-Hz 的 GPS 信号。

关键词: 捕获; 惯性信息; 高动态; 弱 GPS 信号

中图分类号: V 249

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.02.27

Fast acquisition of high-dynamic and weak GPS signals aided by inertial information

ZHANG Min-hu, REN Zhang, HUA Chun-hong

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the influence analysis of weak GPS signals on acquisition under high dynamic environment, a fast acquisition algorithm is developed. The involvement of the inertial navigation system is applied to estimate the GPS carrier Doppler frequency so as to decrease the range of frequency uncertainty. By improving the acquisition method of coherent and non-coherent integration based on fast Fourier transform (FFT), it overcomes the energy diffusion caused by the data bit sync and Doppler rate. In addition, the acquisition time is reduced and its sensitivity is enhanced. Simulation results illustrate that the proposed algorithm is valid to 24 dB-Hz carrier-to-noise (CNR) GPS signal acquisition within 300 ms.

Keywords: acquisition; inertial information; high-dynamic; weak GPS signal

0 引 言

随着全球导航卫星系统的发展, 卫星导航系统的可见星数、可靠性和定位精度进一步提高^[1]。其接收机大量应用在民用和军事领域, 尤其在精确制导导弹等高动态环境下的应用更为重要。与静态和中低动态环境下相比, 高动态弱信号环境对 GPS 接收机可靠接收信号带来了较大的技术难度^[2]。

捕获可见 GPS 卫星是进行导航定位的关键。特别是安装在箭载、星载 GPS 接收机为保证有足够的卫星参与定位, 接收机须很短时间捕获新出现的可见卫星使其参与定位。研究高动态弱 GPS 信号的快速捕获成为一个重要的课题。文献[3]用半比特交替相干积分处理循环相关后的高动态弱 GPS 信号, 但由于其采用了内部时延相乘法导致捕获灵敏度较低; 文献[4]提出了估计导航数据最佳组合的 FFT 相关法捕获灵敏度较高, 但这种方法需要长的时间进行导航数据组合选取导致捕获速度慢; 文献[5-6]采用基

于 FFT 的并行码相位捕获策略, 将捕获的二维过程降低为一维的载波频率搜索过程, 加快了捕获速度, 但只是适合于强 GPS 信号。对于高动态的弱信号的捕获, 可以通过获得关于多普勒频率的先验信息加快捕获速度^[2]; 通过增加相干和非相干积分累加时间提高信噪比增益^[7-8], 但是相干和非相干积分累加数据长度受导航电文、频率分段步长和频率变化率的限制。

1 高动态弱 GPS 信号捕获分析

捕获可视 GPS 卫星通常在天线接收的信号下变频采样及量化后进行。

1.1 捕获信号模型

接收机的中频高动态 GPS C/A 码信号模型为

$$\begin{cases} r(t_k) = \sum_{s=1}^N \{A_s D_s C_s(t_{k,\tau,f_d}) \cos(\theta_{sk})\} + n(t_k) \\ t_{k,\tau,f_d} = (t_k - \tau)[1 + (f_{d0} + at_k/2)/f_{L1}] \\ \theta = \theta_{nk} + 2\pi(f_{IF} + f_{ds,0})t_k + \pi a_{sk} t_k^2 \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-09-03; 修回日期: 2010-08-09。

基金项目: 航空科学基金(20070851011)资助课题

作者简介: 张敏虎(1974-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为组合导航与仿真。E-mail: zmh@asee.buaa.edu.cn

式中, N 为可见星数目; t_k 为采样时间; A 为信号幅度; D 为导航数据; C 为接收到的 C/A 码; θ_c 为中频载波初始相位; n 为零均值、单位方差的高斯白噪声; τ 为码时延; f_{IF} 为中频载波频率; f_{d0} 为 $t_k = 0$ 时刻多普勒频移; a 为多普勒速率; $f_{L1} = 1575.42$ MHz 是 GPS L1 频段载频。

GPS 弱信号是比普通的 GPS 信号 (44 dB - Hz) 要低 20 dB~30 dB 的信号^[9]。GPS 高动态接收机是指具有大的多普勒频率和多普勒变化率, 通常 f_{d0} 的范围为 ± 10 kHz, 加速度大于 $10g$, 此情况下的多普勒速率 $a = dv/dt \cdot f_{L1}/c = 515$ Hz/s。在捕获过程中, 接收机采用接收信号与本地信号进行一个积分过程。接收机产生针对某一颗卫星的本地信号

$$L(n) = C_L t_{k, \tau, f_d} e^{j\pi[2(f_{IF} + f_{d0})]t_k} \quad (2)$$

式(2)中的下标 L 表示本地信号。如果本地信号 PRN 码与接收信号的相同, 那么相关后的输出将有如下的模型

$$I = AM_E DR(\tau_c) \text{sinc}[(f_c + a_e T/2)T] \cos \theta_c + n_I \quad (3)$$

$$Q = AM_E DR(\tau_c) \text{sinc}[(f_c + a_e T/2)T] \sin \theta_c + n_Q \quad (4)$$

式中, τ_c 是码相位误差; f_c 是多普勒频移误差; a_e 是多普勒速率误差; T 是预检测积分时间; $\theta_c = 0.5 f_c T$ 是相关积分间隔内的平均相位误差; $M_E = T/t_k$ 为预检测时间内的采样点个数; n_I, n_Q 为输入噪声引起的同相、正交分量。

$$R(\tau_c) = 1 - |\tau_c| / T_C, \quad |\tau_c| \leq T_C \quad (5)$$

式中, $R(\tau_c) = 0$; $T_C \approx 977.5$ ns 为 C/A 码片时间。

1.2 捕获分析

标准捕获算法是通过相干、非相干积分后的能量与设定的阈值比较进行的, 如果能量积累值达到预定门限, 则可捕获到信号。

相干和非相干捕获算法总的处理增益可以表示为^[10]

$$\begin{cases} G_c = 10 \lg N \\ G_w = 10 \lg M - 10 \lg \left[\frac{1 + \sqrt{1 + 9.2M/D_c(1)}}{1 + \sqrt{1 + 9.2/D_c(1)}} \right] \end{cases} \quad (6)$$

$D_c(1)$ 为理想检测因子, 可表示为

$$D_c(1) = [\text{erfc}^{-1}(2P_{fa}) - \text{erfc}^{-1}(2P_d)] \quad (7)$$

式中, $\text{erfc}^{-1}(y)$ 是互补误差函数的反函数; $P_d = 0.9$ 、 $P_{fa} = 10^{-7}$ 是检测概率和虚警概率。在不考虑导航数据位的影响下, 其增益和积分数目关系如图 1 所示。

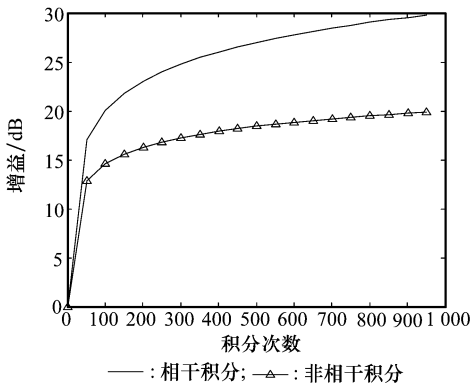


图 1 相干与非相干处理增益

由图 1 可知, 要完成弱信号捕获额外 20 dB 的增益, 非相干积分 1 000 次, 而相干积分却只需 100 次。但是由于 20 ms 导航数据位的影响, 一般相干积分时间不大于 20 ms, 此时的增益为 13 dB, 还要得到 7 dB 的非相关增益, 这要求大概 8 次非相干积分, 但由于导航数据位和多普勒频率的影响, 可能需要的次数还要多一些。

在高动态的情况下, 总非相干积分次数 K 受到多普勒变化率的影响。假设相干积分时间为 T_I , 则频率分段为 $\Delta f = 1/\lambda T_I, \lambda \geq 1$ 。在这段时间内, 多普勒频率由原来的 f_d 变化为 $f_d + aKT_I$, 由于非相干积分是每个频率分段对应相加, 所以 $aKT_I < \Delta f$ 。对于 $T_I = 20$ ms, $a = 515$ Hz/s, $\lambda = 2$ 时, K 小于 2 次。所以应该分析能量积累情况。如果现在的捕获频率分段为 f , 真实频率 $f_d = f + \mu/T_I (0 \leq \mu \leq 1)$, 那么由式(1)、式(2)可知 $f_c = \mu/T_I$, 此时信号能量的积累可根据 α_e 的符号分为两种情况。在第一种为正的情况下, 频率分段 f 的能量积累直到真实频率的变化 $\delta f = \alpha_e NT_I \geq (1 - \mu)/T_I$ 为止, N 为积累步数; 第二种 α_e 为负的情况下, 频率分段 f 的能量积累直到真实频率的变化 $\delta f = |\alpha_e| NT_I \geq (1 + \mu)/T_I$ 为止。过了 N 步后, 信号能量将跳至 $f + \Delta f$ 或者 $f - \Delta f$ 中。

高动态时的大的多普勒频移必然引起捕获速度的减慢, 单次停留算法的平均捕获时间表示为^[11]

$$\bar{T} = \frac{2 + (2 - P_d)(q - 1)(1 + \kappa P_{fa})}{2P_d} \tau_D \quad (8)$$

式中, q 为不确定区域大小 τ_D 为停留时间; κ 为时间损失系数, 满足 $\kappa \tau_D = 1$ s。所以在停留时间一定的情况下, q 越小, 捕获时间越短。在 $\lambda = 2.5, T_I = 20$ ms 时, $\Delta f = 20$ Hz。对于假定的 ± 10 kHz 的搜索范围, 若采用 FFT 循环相关方法, $q = 1 000$; 当采用惯性辅助时, 温启动条件下, 由文献 [12] 知惯性信息辅助可将多普勒频率偏差为 ± 150 Hz, $q = 15$ 。所以基于辅助可以将捕获时间缩短大约 100 倍。

2 高动态弱 GPS 信号捕获算法

根据以上分析, 捕获采用适合软件接收机的 FFT 循环相关方法。相干积分时间选为 20 ms, 其他的增益由非相干积分实现。在温启动条件下, 首先根据惯性信息和星历数据估计载体的多普勒频移 f_0 , 将它们用于下变频操作中。

取 20 ms 输入的中频数据, 本地用估计的 f_0 产生 20 ms 的本地数据。

$$C(n) = e^{j\pi[2(f_{IF} + f_0)]t_k} \quad (9)$$

与式(1)下变频操作后, 将输出的数据按每块 1 ms 分为 20 块。

$$y_k = [x_{ki}, \quad i = 1, \dots, 20] \quad (10)$$

式(10)中的 x_{ki} 可能有不同的极性, 用一个 20 的方阵 H 与其相乘, 输出为 z_k 。

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ -1 & 1 & \dots & 1 \\ -1 & -1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$z_k = \mathbf{H} \times \mathbf{y}'_k = [y_{ki}, i = 1, \dots, 20] \quad (12)$$

z_k 的能量损失最大为跳变发生在 x_{ki} 中间, 其值为 0.4 dB。将 z_k 与 1 ms 的本地 C/A 码循环相关, 求出其幅值仍记为 z_k 。

$$z_k = | \text{IFFT}(\text{FFT}(y_{ki}) \text{conj}(\text{FFT}(L_c))) | \quad (13)$$

$$i = 1, \dots, 20$$

式中, L_c 为本地产生的考虑了多普勒频率的 1 ms 数字化 C/A 码; conj 为取复共轭; z_k 为一个 $20 \times N_r$ 的矩阵, N_r 为 L_c 1 ms 采样数。采用此方法减少了 19 次 FFT 循环相关操作。用 $f = f_0 \pm \Delta f$ 重复以上步骤, 覆盖所有可能频率范围, 输出为一个 $20 \times N_r \times N_f$ 的矩阵记为 z'_k 。这将完成一次 20 ms 的相干积分。

再取 20 ms 输入数据, 同样完成以上的 20 ms 相干积分, 记为 z'_{k+1} 。由前面非相干积分分析, 能量可能扩展至前、后相邻的频率分段。因此在获得新的非相干积分值前, 完成 3 次加法运算。

$$\mathbf{E}_1 = z'_{k+1} + z'_k, \mathbf{E}_2 = z'_{k+1} + z'_k, \mathbf{E}_3 = z'_{k+1} + z'_k \quad (14)$$

比较找出其中的最大值 $\mathbf{E} = \max(\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_3)$, 作为新的非相干积分累加值, 仍记为 z'_k 。这样就解决了信号从一个频率分段移到了另一个频率分段的能量扩散问题。

重复上述算法, 直到捕获结束为止。最后在 z'_k 的 $20 \times N_r \times N_f$ 矩阵中找到最大值。

$$(\hat{b}, \hat{h}, \hat{f}) = \max_{b, h, f} (z'_k) \quad (15)$$

$$b = 1, \dots, 20; h = 1, \dots, N_r; l = 1, \dots, N_f$$

则最可能导航数据跳变位置为 \hat{b} 、初始 C/A 码相位位置为 \hat{h} 和多普勒频率位置为 \hat{f} 。

3 仿真验证

由式(1)模型, 通过 Matlab 程序产生 1 s 的中频高动态弱 GPS 信号仿真数据, 采样频率为 5 MHz, 中频载波频率 1.25 MHz, 卫星 PRN 为 19, 多普勒频率在 ± 10 kHz 范围内假设开始时为 3.6 kHz, 多普勒速率 515 Hz/s, 导航数据跳变在输入数据 6 ms 位置, 初始码相位在第 1 104 个采样点, 载噪比为 24 dB-Hz。信号的幅值是基于噪声基础上生成的, 假设输入带宽为 2 Mb/s, 则信号的幅度可以表示为^[12]

$$A = \sqrt{2} n_{st} (10^{S/N/20}) \quad (16)$$

此时, 信噪比 (S/N) 与载噪比相差 63 dB, 噪声为单位白噪声。

首先采用本文所述算法, 假设惯导估计的多普勒频率误差为 100 Hz, 其值是 3.76 kHz, 搜索范围为惯导估计的多普勒频率 ± 150 Hz, 即 [3.61 3.91] kHz, 多普勒分段间隔取 $\lambda = 2.5$, $T_f = 20$ ms, 则由 1.2 节可知 $\Delta f = 20$ Hz, 因此搜索频率可以分为 16 段, 即 3.61, 3.63, ..., 3.89, 3.91 kHz。按照第 2 节所述的算法进行 20 ms 的相干积分和 15 次非相干积分后, 捕获结果如图 2~图 4 所示。

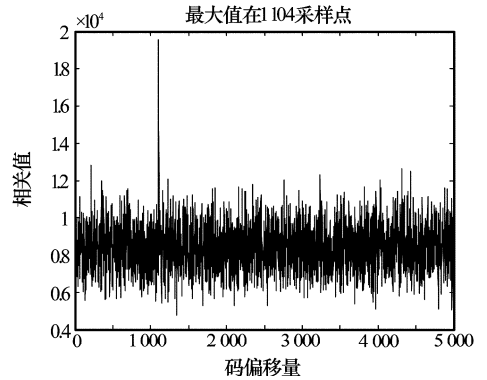


图 2 19 号卫星的 C/A 码起始位置

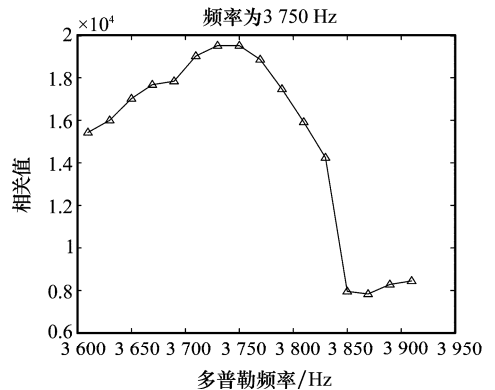


图 3 19 号卫星的多普勒频率

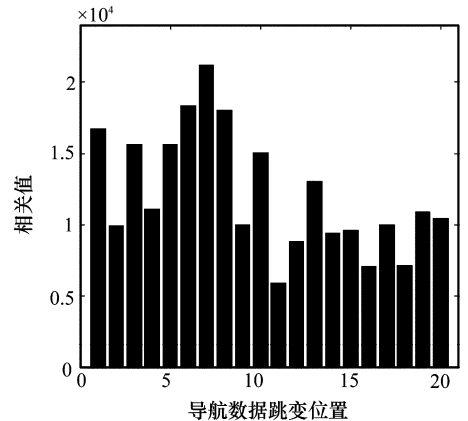


图 4 19 号卫星导航数据跳变位置

在最大多普勒频率处的码相位捕获结果如图 2 所示, 可以看出最大相关值处的码相位采样点为 1 104, 与仿真所设相符。从图 3 最大码相位处的多普勒频率捕获结果可以看出, 最大相关值处的频率为 3 750 Hz, 因为经过了 300 ms 数据进行的捕获, 所以捕获结束时真正的多普勒速率为 $3\ 600 + 515 \times 0.3 = 3\ 754.5$ Hz, 所以估计的频差为 4.5 Hz。图 4 中显示的是最大码相位和频率处的数据跳变在第 7 个位置, 从第 2 节的 \mathbf{H} 阵中得到应为前面 6 个 -1, 与仿真所设的跳变位置一致。

为了比较, 用同样载噪比的数据, 在假设无导航数据跳

变和载波完全正确估计的情况下,分别进行有 515 Hz/s 多普勒速率和没有多普勒速率情况下的 300 ms 输入数据非相干积分仿真,其相干积分时间采用 20 ms,结果如图 5 所示;有 515 Hz/s 多普勒速率条件下,采用 1 ms 相干积分时间,进行 300 ms 输入数据和 1 s 输入数据非相干积分仿真,结果如图 6 所示。

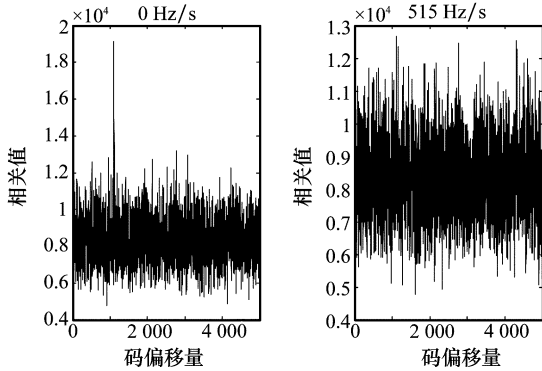


图 5 相干积分时间 20 ms C/A 码捕获

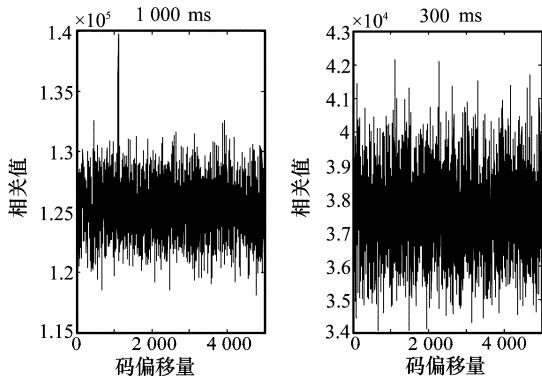


图 6 相干积分时间 1 ms C/A 码捕获

从图 5 和图 6 中可以看出,采用长的相干积分时间时,必须处理不同的频率分段间的能量转移;而采用短的相干积分时间又必须采用长的输入数据;否则无法捕获高动态弱 GPS 信号。然而在高动态情况下,往往没有长的数据窗口可供捕获。

4 结 论

本文提出的高动态弱 GPS 信号快速捕获算法,通过改进 FFT 循环相关算法减少了 FFT 和 IFFT 计算;利用惯性信息估计出频率减少了频率分段;采用相邻频率分段相加比较的方法突破了非相干积分在高多普勒长相干积分时间的数目限制;解决了数据跳变引起的能量损失。从最后的仿真结果中可以看出采用本文算法可以用较短的数据快速捕获 GPS 的 C/A 码信号,证实了本算法的有效性。同时,仿真中发现,由于为了提高捕获的灵敏度采用了复杂的计

算,所以计算时间不如普通的算法迅速。因此,如何简化本算法减少运算复杂度仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] Zaidi A S, Suddle M R. Global navigation satellite systems: a survey[C]// *Advances in Space Technologies*, 2006;84-87.
- [2] 张文明,周一宇,姜文利. GPS 信号捕获性能分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2002,24(10):73-75. (Zhang W M, Zhou Y Y, Jiang W L. Analysis of the signal acquisition performance of the GPS[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24(10): 73-75.)
- [3] Chun Y, Thao N B E, Miller M. Post-correlation semi-coherent integration for high-dynamic and weak GPS signal acquisition[C]// *Proc. of Position, Location and Navigation Symposium*, 2008; 1341-1349.
- [4] Ni Z D, Garrison J L. Unaided acquisition of weak GPS signals using circular correlation or double-block zero padding[C]// *Proc. of Position Location and Navigation Symposium*, 2004; 461-470.
- [5] 李成军,陆明泉,冯振明. 基于采样率变换与 FFT 的 GPS 系统 C/A 码捕获改进算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2008,30(1): 164-166. (Li C J, Lu M Q, Feng Z M. GPS system civilian code signal improved acquisition algorithm based on multi-sampling rate and FFT[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(1):164-166.)
- [6] Akopian D. Fast FFT based GPS satellite acquisition methods[J]. *Radar, Sonar and Navigation*, 2005,152(4):277-286.
- [7] Chuang M Y, Feng K T, Shtessel. Adaptive GPS acquisition technique in weak signal environment[C]// *Vehicular Technology Conference*, 2006;2612-2616.
- [8] 李怀建,刘莉,杜小菁. 高灵敏度 GPS 信号捕获技术研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2009,29(4):25-28. (Li H J, Liu L, Du X J. Study on high-sensitivity GPS signal acquisition techniques[J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2009, 29(4):25-28.)
- [9] 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. (Ma Y K, Zhang Y, Zhang Z Z, et al. Modified method of high dynamic & high sensitivity GPS signal acquisition[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009,31(2):265-269.)
- [10] Bastide F J, Macabiau C. Analysis of L5/E5 acquisition tracking and data demodulation thresholds[C]// *Proc. of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*, 2002;2196-2207.
- [11] Gao G J. INS-assisted high sensitivity GPS receiver for degraded signal navigation[D]. Calgary: The University of Calgary, 2007.
- [12] Tsu B J. *Fundamentals global positioning system receivers a software approach*[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2007.