

一种基于二分法的 GPS 弱信号快速捕获算法^①

李卫斌^{1,2}, 徐晓波¹, 尚保卫³, 马宪民¹

¹(西安科技大学 电气与控制工程学院, 西安 710054)

²(咸阳师范学院 信息工程学院, 咸阳 712000)

³(陕西电子工业研究院, 西安 710069)

摘要: 在高灵敏度卫星导航接收机技术中, 微弱信号捕获算法的捕获效率和运算复杂度是提高接收机灵敏度的关键。长时间相关积分是提高灵敏度的经典方法, 但由于导航数据比特翻转的限制, 一般积分时长为 10ms。提出逐层分组数据相干积分, 利用二分法估计比特翻转位置, 可将累积时长扩展为 19ms, 从而提高捕获效率。同时根据卷积的线性关系, 利用特定时间的数据累加替代卷积运算, 从而降低相关积分的运算复杂度。理论分析和仿真结果表明该算法在提高接收机灵敏度的同时, 有效降低了运算量。

关键词: 弱信号; 高灵敏度; 数据比特; 相干累积; 二分法

Dichotomy-Based Rapid Acquisition Algorithm for Weak GPS Signal

LI Wei-Bin^{1,2}, XU Xiao-Bo¹, SHANG Bao-Wei³, MA Xian-Min¹

¹(School of Electrical & Control, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

²(School of Information Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China)

³(Shaanxi Institute of Electronics Industry, Xi'an 710069, China)

Abstract: For the navigation satellite receiver technology, the weak signal acquisition is the key to improve the receivers' sensitivity. According to the characteristics of the weak signal, long duration correlation integral is the classic method. Unfortunately, the duration is always limited to 10ms for that navigation bit rate is 50bps. In this paper, a dichotomy-based acquisition algorithm is proposed to extend integration duration to 19ms. Meanwhile, to reduce its computation complexity, the convolution operation is replaced by summation for its potential linear relation in the special time. Theoretical analysis and simulated result proves that the proposed algorithm can improve receivers' sensitivity and reduce its computation.

Key words: weak signal; high sensitivity; data; correlation integral; dichotomy

一般卫星导航接收机由天线、RF 模块、基带等三部分组成, 其中 RF 模块由低噪声放大器、带通滤波器、ADC 组成, 基带部分负责基带信号处理功能。相关运算是基带处理的关键, 大量相关运算已经成为限制接收机性能的瓶颈之一, 如何进一步提高接收机的灵敏度, 减少运算量也是目前信号处理的热门课题。

提高接收机灵敏度的基本原则是提高信号质量和消除多径的影响, 但由于种种原因卫星信号本身质量无法得到改善, 即使信号非常微弱, 甚至受到有意或无意的干扰, 接收机也要能够正常工作, 这正是

提高接收机灵敏度的实际需求。在信号捕获方面, 主要采用相关累积算法、半比特交替法和估计比特跳变的全比特法等来提高信号捕获质量、提高接收机的灵敏度^[1]。

本文通过卷积的线性关系来减少相关运算次数, 对多段数据直接进行叠加, 并利用帧同步信息的自相关特性来提高信号的处理增益, 提出了基于二分法的分组比特翻转位置算法, 可以确定精确至 1ms 的比特翻转位置, 从而延长相干积分时间至 19ms, 进一步提高微弱信号的捕获能力^[2,3]。

① 基金项目: 陕西省自然科学基金(2011JE011); 科技部创新基金(11C26216106024); 陕西省重大科技创新工程(2011ZKC06-4);

陕西省科技计划项目(S2011GY1438); 陕西省教育厅基金(08JK479)

收稿时间: 2012-12-12; 收到修改稿时间: 2013-01-08

1 卫星信号模型

本文以 GPS 信号为例, 在弱信号的 C/A 码捕获研究中, 中频信号可以表达为:

$$y_k = Ad(t_k)c[(1+\eta)(t_k - t_s)] \cos(\omega_{IF}t_k - \omega_D t_k + \phi_0) + v_k \quad (1)$$

这里, y_k 是射频前端在采样时刻 t_k 的输出值, 常数 A 是幅度, $d(t)$ 是 GPS 的导航数据流, $c(t)$ 是卫星发射的 C/A 码, 其码率为 1.023MHz, 周期为 1ms, η 是由于多普勒频移对 C/A 码率的影响因子; t_s 是 C/A 码的起始时刻; ω_D 是多普勒频移; ω_{IF} 是标称中频频率. ϕ_0 是载波的初始相位. 如果忽略电离层的影响, 则多普勒频移与 C/A 码率影响因子 η 之间是相互关联的, 其中 $\eta = \omega_D / (2\pi * f_c * 10^6)$. 例如对 GPS L1 频点, 其载波频率 f_c 为 1575.42HZ. v_k 是噪声项, 通常采用高斯带限有色噪声模型. 在接收机中^[4], 捕获就是根据接收到的中频信号序列 $y_1, y_2, \dots, y_k, \dots$ 来估计出 C/A 码的初始相位 t_s 和多普勒频移 ω_D .

相关运算利用 C/A 码的正交性, 将中频信号与本地产生的 C/A 码进行相关, 遍历一定范围内的 \hat{t}_s 和 $\hat{\omega}_D$ 确定捕获结果.

$$y_I(\hat{t}_s, \hat{\omega}_D) = \sum_{k=0}^{N-1} y_k c[(1+\hat{\eta})(t_k - \hat{t}_s)] \cos[(\omega_{IF} - \hat{\omega}_D)t_k] \quad (2)$$

$$y_Q(\hat{t}_s, \hat{\omega}_D) = \sum_{k=0}^{N-1} y_k c[(1+\hat{\eta})(t_k - \hat{t}_s)] \sin[(\omega_{IF} - \hat{\omega}_D)t_k] \quad (3)$$

这里 $c[(1+\hat{\eta})(t_k - \hat{t}_s)]$ 是本地产生的复制 C/A 码; $\cos[(\omega_{IF} - \hat{\omega}_D)t_k]$ 和 $\sin[(\omega_{IF} - \hat{\omega}_D)t_k]$ 分别是本地产生的复制同相载波和正交载波.

在二维的区域: $\hat{t}_s = t_0, t_1, \dots, t_{N-1}$ 和 $\hat{\omega}_D = \omega_{Dmin}, \omega_{Dmin} + \Delta\omega_D, \omega_{Dmin} + 2\Delta\omega_D, \dots, \omega_{Dmax}$ 范围内搜索, 使得相关结果的幅值能量 $P(\hat{t}_s, \hat{\omega}_D) = I^2(\hat{t}_s, \hat{\omega}_D) + Q^2(\hat{t}_s, \hat{\omega}_D)$ 达到最大值, 在达到最大值时的 $(\hat{t}_s, \hat{\omega}_D)$ 就是我们所需要估计的 C/A 码相位 \hat{t}_s 和 $\hat{\omega}_D$ 多普勒频移.

2 弱信号捕获算法

在弱信号捕获算法中, 信号累积技术是提高处理增益的关键^[5]. 基本方法为相干累积、非相干累积和差分累积. 相干累积的基本原理就是保留所有相位信息, 对应相位点的相关值累加; 非相干累积则去除相位信息, 仅保留幅度信息, 即将相干累积后的同相和正交两支路信号求模平方后再累积; 差分累积则利用差分

后累积值降低了相干累积对次数的要求, 从而对频差的容忍度较高, 捕获时间不会显著增长. 一般三种方法中, 相干累积对系统的性能提升最为显著, 也最为常用.

相干累积中累积时间 T 不能过长, 原因是由于的导航电文数据速率为 50bps(以 GPS 为例), 即每 20ms 可能发生比特翻转, 在尚未确定比特起始位置时, 一般相干累积时间都不超过 10ms.

目前弱信号的捕获算法均是以信号累积^[6]理论为基础, 原有算法的相干积分时间都限制在 10ms 相干积分. 因此尽量延长相干累积的时间, 最大限度地提高信号的处理增益, 从而捕获更加微弱的卫星信号.

2.1 快速累积算法

在捕获算法中, 累积算法通过多次的相干运算, 并进行相干或非相干的叠加, 达到消除噪声、提高灵敏度的目的, 最耗时的运算就是相关运算^[7,8]. 这里, 依据卷积的线性关系, 引用了新的快速累计算法, 大大降低了运算的复杂度, 其基本原理如下.

设 $Y_n(k)$ 为第 n 次的相关值, $y_n(k)$ 为第 n 毫秒接收到的原始中频数据. $x(k)$ 为本地的 C/A 码与本地载波的组合, 则第 n 次的相关运算可以用卷积的形式表达为:

$$Y_n(k) = y_n(k) \otimes x(-k) \quad (4)$$

N 次的相干累积:

$$\begin{aligned} Y(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} Y_n(k) \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} y_n(k) \otimes x(-k) = \\ &= (\sum_{n=0}^{N-1} y_n(k)) \otimes x(-k) = z(k) \otimes x(-k) \end{aligned} \quad (5)$$

这里 $z(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y_n(k)$, 是 N 段接收到的原始中频

数据的叠加, \otimes 是循环卷积运算. 式中 $z(k)$ 为 N 段信号的代数和. 可见, 经过变换后进行 N 次相干累积只需做 1 次相关运算, 运算量减少近 N 倍.

在采样率为 5MHz 下, 对于 10ms 的数据信号与本地 C/A 码做相关运算, 原先的相干累积运算需要做 $10*5000$ 次乘法和 $10*5000$ 次加法运算. 而快速累积算法先进行 10ms 的数据叠加, 算法只需进行 5000 次乘法和 $10*5000$ 次加法运算, 是原先乘法运算量的 1/10, 大大减少了运算量, 提高了运算速度.

为了更好的比较算法的运算速度,在-30dB 的信噪比条件下,都对 5 号 GPS 卫星信号进行 10ms 的相干积分,使用相同的计算机,传统的相干累加方法的捕获的平均耗时约为 2.01s,而快速累积算法所用的平均耗时约为 0.21s,由此可见快速累积算法在运算速度上的优势.根据下图所示的相干累加结果,传统的相干累积方法运算后的幅值结果为 2.2166×10^4 ,而快速累积算法的幅值结果为 2.1564×10^4 .在仿真结果中,由于在数据信号累加过程中,舍入误差 ε_n 的值远小于 $\sum_{n=0}^{N-1} y_n(k)$, $\sum_{n=0}^{N-1} y_n(k) + \varepsilon_n$ 对仿真而言, ε_n 在运算中会被直接忽略,所以幅值有一定的减少,但其运算速度得到明显提高.

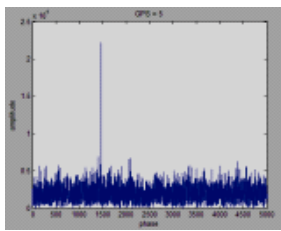


图 1 传统相干累加

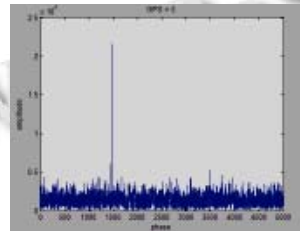


图 2 快速累积

2.2 数据比特翻转估计

利用先叠加后相关的快速累积算法,在结合本文提出的数据比特估计方法来确定数据比特翻转位置,提高了其数据比特估计精度,可实现更长时间的相干累积,获得较高的信号处理增益^[9].

信号具有良好的自相关性,根据相关性在比特翻转中降低的特性,而 20ms 数据信号有数据比特翻转的可能,数据读取 160ms 的中频信号数据,分成 8 组 20ms 数据组,先进行半比特相关累积,根据数据比特翻转的存在,其相关运算的幅值能量应当小于另一组,因此可得到存在数据比特翻转的一组 20ms 数据.然后把 20ms 数据进行以下数据处理运算,对 20ms 数据进行二分处理,根据数据比特翻转的存在,其相关运算的幅值能量应当小于另一组,逐步二分处理成最后 1ms 数据,设计方案如图 3 所示.

Step1: 把 20ms 数据信号分成 2 个 10ms 组,分别与本地 C/A 码进行循环相关,搜索其幅值能量的最大值 $P(\hat{t}_s, \hat{\omega}_D)$,比较 2 组的幅值能量大小,有数据比特翻转的那一组的幅值能量明显小于另一组,把小的那组数据做进行 step2.

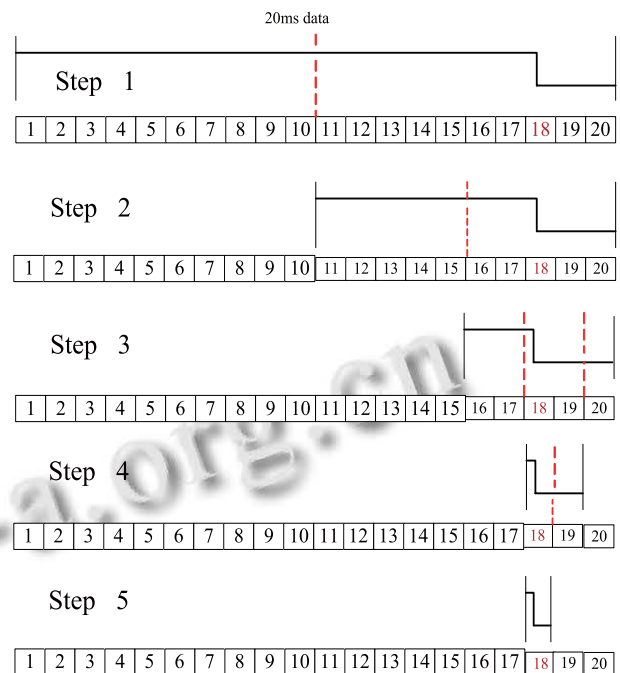


图 3 捕获数据处理方案

Step2: 从 step 1 得到的 10ms 数据,再分成 2 组 5ms 数据,在做与 step 1 一样的相关运算和幅值能量比较,得到幅值能量小的一组进行 step 3.

Step3: 把从 step 2 中得到的 5ms 数据分成 2 个 2ms 和 1 个 1ms 组,先比较 2 个 2ms 循环相关后的幅值能量大小,找到幅值能量小的一组进行 step 4; 如果 2 个 2ms 数据组的幅值能量相当,那么与 2 个 2ms 并列分组的那个 1ms 就是我们要找的数据翻转组.

Step4: 把从 step 3 中得到的 2ms 数据组分成 2 个 1ms 组进行循环相关的幅值能量比较,确定其小的那组为数据比特翻转组.

Step5: 从上述步骤中估算出了 1ms 的数据比特翻转位置,然后读取其 1ms 之后的 19ms 数据作为相关运算的数据,利用快速累积算法对这 19ms 数据进行循环相关积分,再利用码相位并行搜索捕获结果,当搜索到的幅值大于给定的捕获门限时,捕获成功.

根据本文的数据比特翻转位置估计方法,能估计出 1ms 的数据比特翻转位置,因此在做相干积分时,本文是进行 19ms 相干积分(可能翻转位置的 1ms 被跳过),进一步延长相干累积时间来捕获较弱的卫星信号.

2.3 并行码相位搜索

类似于并行频率搜索捕获法对频率的搜索予以一次性完成,在 $\pm 10\text{kHz}$ 下,采用 500Hz 步长和 0.5 码片

的码相位搜索步长, 并行码相位搜索捕获法可将 2046 次码相位搜索通过傅里叶变换一次性完成, 从而是搜索次数由线性搜索捕获法的 41×2046 次急剧地减少至只在频率一维内的 41 次搜索.

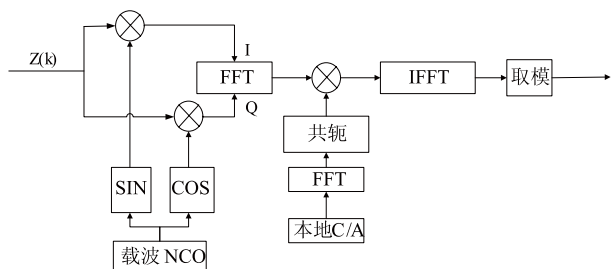


图 4 并行码相位搜索捕获算法流程

如图 4 所示, 当根据本文的数据比特翻转估计方法估计出翻转位置以后, 从翻转位置开始读取 19ms, 利用快速累积原理, 把 19ms 数据叠加成 1ms 数据 $Z(k)$, 并与 I 支路和 Q 支路上某一频率的复制正弦和复制余弦载波信号混频后进行傅里叶变换, 然后将变换结果与复制 C/A 码傅里叶变换的共轭复数值相乘, 接着将所得的乘积经过傅里叶逆变换得到在时域内的相关结果, 最后对这些相关值进行检测来判断信号是否存在^[10].

3 算法仿真

在 MATLAB 环境下对本算法进行仿真^[11], 可以准确地控制仿真数据的信噪比, 从而准确地评估算法的性能. 首先仿真中频信号的产生, 仿真信号的中频频率为 1.25MHz, 采样频率为 5MHz, 仿真产生 160ms 的数据中频信号, 捕获程序从仿真数据任意位置开始读取数据. 信号中加入的是高斯白噪声, 在不同信噪比时, 对 GPS 5 号卫星进行仿真, 将传统频域码相位并行捕获算法和本文提出的二分法数据处理频域捕获算法进行实验仿真的对比, 结果如下列图所示:

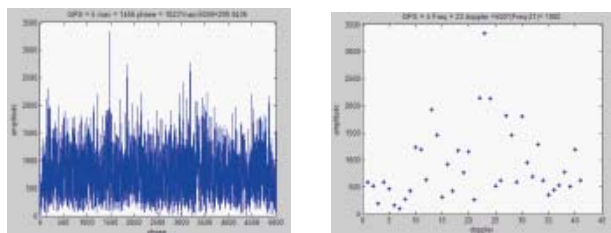


图 5 传统捕获算法在 SNR=-35dB 时的捕获结果

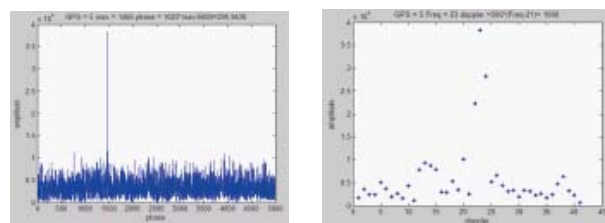


图 6 本文的新捕获算法在 SNR=-35dB 时的捕获结果

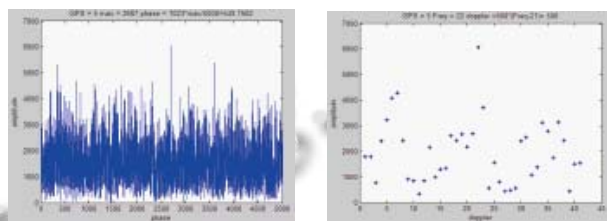


图 7 传统捕获算法在 SNR=-41dB 时的捕获结果

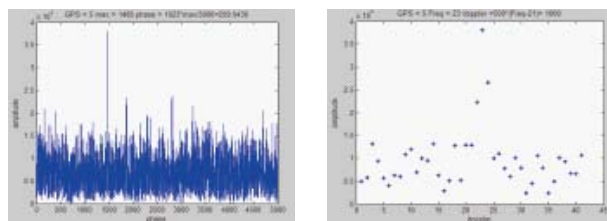


图 8 本文的新捕获算法在 SNR=-41dB 时的捕获结果

可以看出, 在信号中加入仿真噪声后, 在信噪比 -35dB 的情况下, 使用普通捕获算法已经无法正确捕获到卫星信号, 而本文提出的弱信号捕获算法, 如图 6 所示, 有明显的积分峰值, 还能精确的捕获到卫星信号. 而且在信噪比位 -41dB 下还可以捕获到卫星信号, 证明该算法比传统的捕获算法更能捕获到低信噪比下的弱信号. 可以有效地提高接收机的灵敏度, 但在更低信噪比下(-45dB 以下)由于信号过于微弱, 本算法捕获概率大大降低, 需要更先进的算法进一步提高接收机灵敏度, 这也将是今后研究的方向.

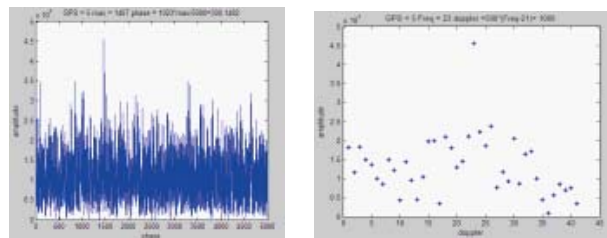


图 9 本文的新捕获算法在 SNR=-45dB 时的捕获结果

为了更好的与传统捕获算法作比较, 将两种算法

在相同的 160ms 数据, 在不同信噪比下, 针对 5 号 GPS 卫星, 分别运行 100 次, 计算其捕获成功率. 图 10 所示为两者运行 100 次的捕获成功率, 结果表明, 本文提出的二分法捕获算法对灵敏度的改善是非常明显的.

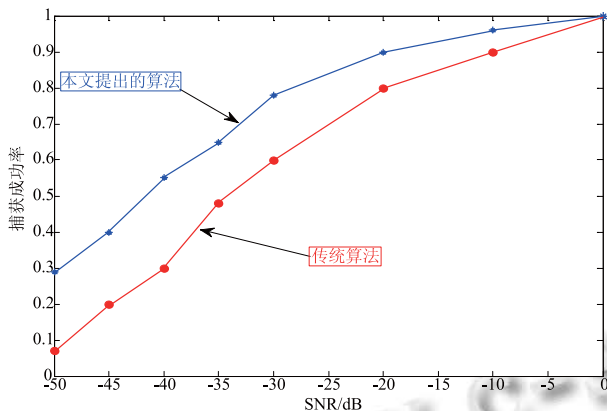


图 10 两种算法的捕获成功率比较

4 总结

本文提出了一种基于二分法预估捕获算法, 在低信噪比下比传统捕获算法更容易捕获到信号. 本文提出的算法可以将数据比特翻转限制在 1ms 范围内, 从而通过数据比特翻转位置来延长相干累积时间, 提高信号处理增益. 而且在相干累积算法中运用了先叠加后相干的快速累积方法, 减少了运算量, 提高了运算速度.

通过理论分析与仿真验证, 该算法在捕获灵敏度和运算复杂度等方面明显优于传统捕获算法.

参考文献

- 1 Gang IE. Principles of GPS and Receiver Design. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- 2 Qin XX, Han CD, Xie YK. A High Sensitive Fast Acquisition Algorithm Suitable to Implement in Software GPS Receiver. Acta Electronica Sinica, Jan. 2010,38(1).
- 3 Li YZ, Cheng J. High-Sensitivity GNSS Receive Technology. Journal of Military Communications Technology, 2010,31(2).
- 4 Hou WW. Research on Acquisition Techniques of High Sensitivity GNSS. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- 5 Won JH, Pany T, Hein GW. GNSS software defined radio real receiver or just a tool for experts? Inside GNSS, 2006, 1(5): 48-56.
- 6 Chuang MY, Feng KT. Adaptive GPS Acquisition Technique in Weak Signal Environment. Vehicular Technology Conference. 2006: 2612-2616.
- 7 Elders-Boll H, Dettmar U. Efficient differentially coherent code/Doppler acquisition of weak GPS signals. Spread Spectrum Techniques and Applications. 2004 IEEE 8th International Symposium, 2004: 731-735.
- 8 Lin DM, Tsui JBY. A software GPS receiver for weak signals. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2001, 3: 2139-2142.
- 9 Lashley M, Bevely DM. Comparison of traditional tracking loops and vector based tracking loops for weak GPS signals. 2008 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, 2008: 310-316.
- 10 Tsui JBY. Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach. 2nd Ed, Wiley Series, 224-236.
- 11 刘毓, 席光文. 弱 GPS 信号捕获算法的仿真实验研究. 测绘科学, 2012, (1).