

一种基于位跳变检测的微弱卫星信号快速捕获算法

李卫斌^{1,2} 张迎新¹ 尚保卫³ 马宪民¹

(西安科技大学电气与控制工程学院 西安 710054)¹ (咸阳师范学院信息工程学院 咸阳 712000)²
(陕西电子工业研究院 西安 710069)³

摘要 微弱 GPS 卫星信号的捕获需要长的相干积分时间,同时还要克服导航数据位跳变的影响,传统算法很难同时兼顾捕获的灵敏度和实时性这两个方面。提出了一种基于位跳变检测的微弱信号快速捕获算法,该算法通过比较多组数据的相干积分结果估计出第一个跳变位,并将其余间隔 20ms 的数据均记为跳变位进行剔除,而对其余数据进行 19ms 的分块相干积分。仿真结果表明,该算法通过对 140ms 数据的积分运算能够高效地捕获到信噪比低至 -47dB 的信号,可有效提高 GPS 接收机的灵敏度和实时性。

关键词 弱信号检测,捕获,位跳变,GPS

中图分类号 TP391.9, TN911.72 **文献标识码** A

Rapid Weak Signal Acquisition Algorithm Based on Bit-flip Detection

LI Wei-bin^{1,2} ZHANG Ying-xin¹ SHANG Bao-wei³ MA Xian-min¹

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

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

(Shaanxi Electronic Industrial Technology Research Institute, Xi'an 710069, China)³

Abstract For the weak GPS satellite signal, it requires longer coherent integration duration to improve the receiver's sensitivity. Unfortunately, the influence of navigation data bit-flip limits integral duration to 20ms. It's difficult for the traditional methods to balance sensitivity and computation complexity. In this paper, a rapid weak signal acquisition algorithm based on transition detection was proposed. Firstly, the possible position of bit-flip is detected in 1ms through the comparison of the coherent integration results of the several groups of signal blocks, and the rest signal which is at intervals of 20ms with the flip bit is removed. Then coherent integration is applied to its subblock signal in 19ms and its results operate non-coherent integration to overcome its bit-flip. The theoretical analysis and simulation results show the algorithm's performance, and it can capture the weak signal under -47dB SNR with higher computation efficiency. The proposed algorithm will improve the sensitivity and the computation complexity of GPS receiver.

Keywords Weak signal acquisition, Acquisition, Bit-flip, GPS

全球定位系统(GPS)卫星信号捕获的目的是获得接收机当前所在位置的可见卫星号,并计算可见卫星的载波频率和伪随机码的相位信息,为跟踪过程提供初始值,它是 GPS 接收机进行导航定位的第一步和关键。

在信号较强的环境中,目前的通用 GPS 接收机已经可以轻松定位并达到较高的定位精度,而在城市峡谷、隧道、高楼内等信号较微弱的环境下,普通的接收机则不能正常捕获 GPS 信号,无法实现定位功能^[1]。如何在保持运算效率的同时,灵敏地捕获到微弱 GPS 信号并实现定位是软件接收机信号捕获技术的研究重点^[2,3]。

目前学术界针对这个问题已提出多种算法^[4,5],其基本思想是通过增加信号的捕获时间长度来提高信噪比,从而达到捕获信号的目的^[6]。但是受 50bps 导航电文和频率偏移的

限制,相干积分时间不能超过 20ms,且长的相干积分时间将会引起捕获所需的时间变长^[7],常规算法很难同时兼顾捕获灵敏度和捕获效率这两个方面。

2001 年 Psiaki 提出了一种克服导航数据位跳变的全比特算法^[8,9],其采用分块相干积分的思想,在每个可能的跳变边缘位置开始累积,这样就需要得到 20 组结果,这些结果中的最大值对应正确的位跳变边缘。该算法克服了导航数据位跳变的影响,将相干积分时间延长至 20ms,但 20 组数据的运算带来的运算量的急剧增加也是不容忽视的^[10]。

2010 年何秋生、程亚奇提出了一种基于位跳变检测提高 GPS 信号处理增益的方法^[11]。该算法通过对多组连续信号进行相干积分,并比较多组相干积分结果估计出跳变位,从而避开这些跳变位延长相干积分时间,能够有效地提高接收机

到稿日期:2012-10-09 返修日期:2013-01-28 本文受陕西省自然科学基金课题(2011JJE011),科技部创新基金项目(11C26216106024),陕西省重大科技创新工程(2011ZKC06-4),陕西省科技计划项目(S2011GY1438),陕西省教育厅基金课题(08JK479)资助。

李卫斌(1976-),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为图像处理与卫星信号处理,E-mail:liweibin@sohu.com;张迎新(1989-),女,硕士生,主要研究方向为模式识别;尚保卫(1966-),男,高级工程师,主要研究方向为检测技术与自动化装置;马宪民(1954-),男,教授,博士生导师。

的处理增益。但是该算法需要采用比较相干积分值的方法估计出所有接收数据中发生跳变的位,因此增加了其实现的复杂度。

算法计算量和复杂度的增加必然导致硬件设计复杂度的增加和成本的提高,为此,本文借鉴全比特算法的数据处理方法和估计数据位跳变边缘的思想,提出了一种基于位跳变检测的弱信号快速捕获算法,其首先采用位跳变检测算法估计出导航数据位跳变的边缘位置,然后将可能发生数据位跳变的位进行剔除,其余位进行分块相干积分。该算法节约了位跳变检测算法检测每个跳变位的冗余工作,也降低了全比特算法对每组的所有数据进行分块相干积分的运算量,同时,由于只剔除了少量的数据位,也有效地延长了相干积分的时间,能够有效提高 GPS 接收机的处理增益。

1 已有算法分析

1.1 全比特算法^[8]

全比特算法的基本思想是通过估计导航数据位跳变边缘位置来延长相干积分时间,即将相干积分时间延长为 20ms。

首先使接收数据相互延迟 1ms,一共得到 20 组数据,如图 1 所示。然后对每组数据进行分块,假设数据长度为 20M ms,每块长度为 20ms,则每组可分为 M 块。

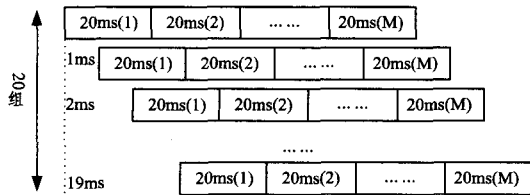


图 1 全比特算法接收数据处理示意图

对块内 20ms 的数据进行相干积分,结果记为 Y_m^b ($m=1, 2, 3, \dots, M$), 表示第 b 组数据第 m 个数据块的相干积分结果。则第 b 组数据的相干积分结果为:

$$Y^b = \sum_{m=1}^M Y_m^b \quad (1)$$

取 $Y = \max(Y^1, Y^2, \dots, Y^{20})$ 作为判决量与阈值进行比较即可完成捕获。

1.2 位跳变检测算法^[11]

在对数据的处理上,位跳变检测算法也采用各组数据相互延迟 1ms 的方式,不同的是,全比特算法的每一组数据对应一种可能的位跳变边缘,即对 20 种可能的情况一一进行计算,而位跳变检测算法只取一部分数据进行分组,并比较每组数据的相干积分结果,从而检测出跳变位。

首先对检测数据进行分组,如图 2 所示, a 表示进行相干积分的数据段长度,可以取 1, 2, ..., 20, 具体的取值可以视情况而定,各组数据相互延迟 1ms 选取,共取 a 组数据。

计算 a 组连续 a ms 数据的相干积分值 $P_{i,i+a-1} = \sqrt{I_{i,i+a-1}^2 + Q_{i,i+a-1}^2}$ 。其中, i 表示第 i 组数据,共 a 毫秒长度的数据, I 为相关值同相输出, Q 为相关值正交相输出。由于相邻两组数据有 $(a-1)$ ms 都是相同的,得到的一系列相干积分值 P 的包络将会整体有规律地变化,据此可以估计到数据位跳变出现的位置。如图 3 中, b 的位置出现了低谷,即第 b 组数据的相干积分值最小,则跳变位出现在第 b 组数据的中间位置,即将第 $(b+a/2-1)$ ms 到 $(b+a/2+1)$ ms 这 3ms 数据作为可能的跳变位。为了进一步延长相干积分时间,本文

算法仅取 1ms 作为跳变位,即认为在第 $(b+a/2)$ ms 内存在跳变位。

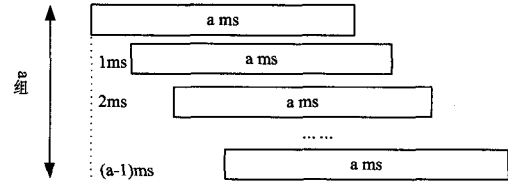


图 2 检测数据处理示意图

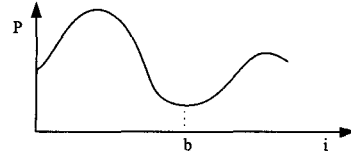


图 3 包络变化曲线图

之后的数据段中出现位跳变的位置在本文算法中未涉及,因此不再赘述。

该算法采用剔除数据法和调制数据法对可能发生了位跳变的数据位进行处理。

2 改进算法

2.1 算法的原理及实现

由于导航数据的跳变只可能发生在间隔 20ms 的地方,因此可以借鉴全比特算法估计出导航数据位跳变边缘的思想,只采用位跳变检测算法估计出第一个跳变位,将之后间隔若干个 20ms 的数据段都看作是跳变位,对其予以剔除,而对其余(没有发生位跳变)的数据则进行分块相干积分,将得到的最终结果与阈值进行比较即可。

该算法对接收数据的处理借鉴全比特算法,即取 $a = 20$ ms,相互延迟 1ms。假设采用位跳变检测算法得出 j ms 存在位跳变,则 $(j+20k)$ ms 的数据均记作跳变位($k=0, 1, \dots$),如图 4 所示,图中 G1 表示跳变位,长度为 1ms,G2 表示剔除了跳变位之后的数据段,长度为 19ms。相邻 G1 和 G2 块的长度之和为 20ms。G0 表示检测到跳变之前的数据位。

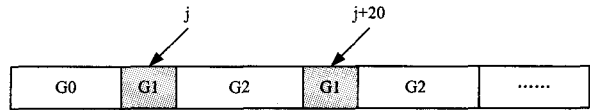


图 4 基于位跳变检测的改进算法原理示意图

检测出跳变位之后,需要重新选取数据段进行分块相干积分。方便起见,数据段的选取从第一个跳变位之后的数据开始,即从图中的首个 G2 开始。然后将图 4 中的各个 G2 数据块内部进行相干积分,各块之间进行非相干积分。本文的相干积分和非相干积分采用基于 FFT 的方式^[12]。

传统 GPS 捕获方法一般进行 1ms 的相干积分累加,在一个频率步长的相关累加值可表示为^[2]:

$$R_1(m) = \text{IDFT}[\text{DFT}(y_1(m)) \times \text{DFT}^*(C_1(m))] \quad (2)$$

式中, $R_1(m)$ 为相关累加值, $y_1(m)$ 为剥去载波后的 I 路和 Q 路复数形式, $C_1(m)$ 为一个周期的 CA 码序列。

长度为 L ms(本文中为 19ms,即为图 4 中的单个 G2 数据块)的 GPS 信号 $y(m)$ 的相关积分采用下面的处理方式:将其分成 19 个 1ms 的数据段 $y_i(m)$ ($i=1, 2, \dots, L$),然后将其累加成一个 1ms 的 GPS 数据块 $y_L(m)$,如图 5 所示。

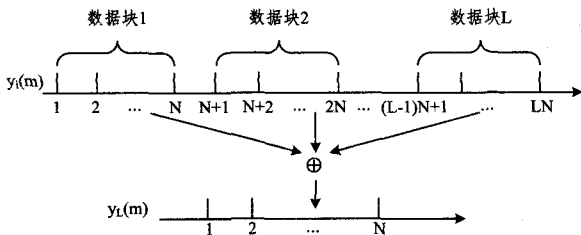


图5 数据累加示意图

图中, N 为每个数据段, 即每毫秒的数据点数。

L ms 数据的相关累加值为:

$$R_L(m) = IDFT[DFT(y_L(m)) \times DFT^*(C_L(m))] \\ = IDFT[DFT(\sum_{i=1}^L y_i(m)) \times DFT^*(C_L(m))] \quad (2)$$

求出各个 G2 块的相干积分值之后, 对各个块的积分值进行非相干求和即可得到最终的积分结果, 将此积分结果与阈值进行比较即可完成捕获。

该算法的具体步骤描述如下:

- 1) 取 20 组 20ms 的数据, 每组数据相互延迟 1ms。
- 2) 对这 20 组数据进行相干积分, 找出相关峰值最小的那组数据, 该组数据的中间 1ms 数据对应跳变位。
- 3) 从跳变位之后开始取 140ms 的数据, 将剔除了跳变位的数据进行分块, 每块为连续的 19ms 数据。
- 4) 将每块的 19ms 数据累加成 1ms 的 GPS 数据块 $y_L(m)$, 并对其快速傅里叶变换 DFT, 将输入转换到频域。
- 5) 产生 41 个步长为 500Hz 的本地码 $C_L(m)$, 每个本地码包含 5000 个数据点。对本地码进行快速傅里叶变换 DFT, 将其变换到频域, 并取其复共轭。
- 6) 对 $DFT(y_L(m))$ 和 $DFT^*(C_L(m))$ 点对点相乘, 并对结果进行反傅里叶变换, 得到相关值 $R_L(m)$ 。
- 7) 取 $|R_L(m)|^2$ 与阈值进行比较即可完成捕获。

2.2 算法性能分析

该算法是在捕获灵敏度和运算量之间有效折中的一种捕获方式, 既能将全比特算法灵敏度的降低控制在很小的范围内, 又有效地降低了位跳变检测算法的复杂度, 同时与常规算法相比又能获得不错的捕获效果。

与全比特算法采用 20 倍计算量的方式来估计导航数据位跳变边缘的方式相比, 本文的算法只需检测出第一个跳变位, 将之后间隔 20ms 的数据位均视为跳变位, 可大大降低运算量。而与位跳变检测算法相比, 本文的算法省去了检测每个跳变位的麻烦, 同时由于每 20ms 数据中只有 1ms 数据为跳变位, 相当于保留了 95% 的数据进行分块相干积分, 不会过多地浪费捕获信号可采用的数据, 因此是一种较有效的方法。

对于基于 FFT 的捕获方式, 算法的计算量主要由 FFT/IFFT 的运算量来决定, 而 FFT/IFFT 的运算量直接取决于 FFT/IFFT 的点数^[13], 故基于 FFT 方式的捕获运算量 A 可表示为^[2]:

$$A = M * L * N \quad (3)$$

式中, M 为 FFT 运算次数, L 为积分时间长度, N 为单位长度的 FFT/IFFT 点数。

仿真对 140ms 的数据进行积分, $N=41$, 各算法的运算量如表 1 所列, 为更明确地显示 3 种算法计算量的关系, 现设全

比特算法的运算量为 100%。从中可以看出, 位跳变检测算法的运算量比全比特算法仅降低了 9%, 而本文算法的运算量比全比特算法降低了 81%。

表 1 各算法的运算量比较

算法	FFT	IFFT	运算量
全比特算法	114800	114800	100%
位跳变检测算法	104140	104140	91%
本文算法	21279	21279	19%

3 算法仿真

为了验证本文算法的可行性, 现从捕获时间、捕获效果和捕获概率 3 个方面对其进行仿真, 并与传统相干积分算法和全比特算法进行对比。由于位跳变检测算法比较繁琐, 故不再对其进行仿真。仿真过程中, 中频设置为 1.25MHz, 采样频率设置为 5MHz, 处理数据采用 5 号卫星的数据, 长度为 140ms。

首先对 3 种算法的捕获时间进行对比, 在产生的同一组强信号下, 分别用 3 种算法进行捕获, 并记录下程序运行时间, 结果为: 传统算法 1.088586s, 全比特算法 24.034211s, 本文算法 2.387152s。由此可以看出, 本文算法的运算量是传统算法的 2.2 倍, 是全比特算法的 10%。运用本文中的算法可大大降低全比特算法的运算量。

接下来对算法的捕获效果进行验证, 首先在信噪比为 -40dB 的情况下用同一组产生信号对传统算法和本文算法进行比较, 结果如图 6 所示, 图中横轴表示码相位, 纵轴为相关峰值。可见, 在该信噪比条件下, 传统算法虽有峰值出现, 但已不是很明显, 而本文中的算法却可以精确捕获到信号。

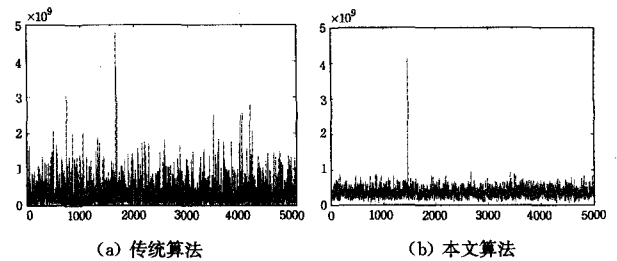


图6 -40dB 信噪比下两种算法的捕获效果

图 7 给出了信噪比为 -47dB 的情况下全比特算法和本文算法的捕获效果对比, 可见该情况下两种算法都能轻松捕获到信号, 且捕获效果差别不大, 全比特算法略优于本文算法, 但本文算法运算量却只有全比特算法的 10%, 运算效率大幅提高。

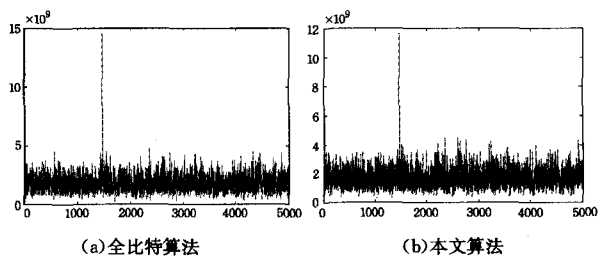


图7 -47dB 信噪比下两种算法的捕获效果

为比较 3 种算法在不同信噪比条件下的捕获成功率, 现将 3 种算法的捕获程序各运行 100 次, 阈值的设定用最大相

(下转第 78 页)

- [8] Sivakumar G, Ramprasad A V. Analysis of FiWi networks to improve TCP Performance[C]// 2012 International Conference on Computing, Communication and Applications (ICCCA). 2012:1-6
- [9] Ayaz S, Hoffmann F, German R, et al. Analysis of deficit round robin scheduling for future aeronautical data link[C]// 2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC). 2011:1809-1814
- [10] Sleem M Y, ElBadawy H M, Abo-El-Seoud M S. Two layer channel aware scheduling for QoS support in IEEE 802. 16/WiMAX networks[C]// 2011 Eighth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks(WOCN). 2011:1-5
- [11] Mansy A, Ammar M, Zegura E. Deficit Round-Robin Based Message Ferry Routing[C]// Global Telecommunications Conference(GLOBECOM 2011). 2011:1-5
- [12] 简贵宵, 葛宁, 冯重熙. 具有优先服务机制的嵌套式 DRR 算法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(1):123-126
- [13] 高斐, 张原, 杨百战. 差额轮循的平滑输出算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(1):49-53
- [14] Kumar D, Priyameenal V. Adaptive packet scheduling algorithm for real-time services in Wi-MAX networks[C]// 2011 International Conference on Recent Trends in Information Technology (ICRTIT). 2011:342-347
- [15] 张博, 汪斌强, 王珊珊, 等. 基于 Crossbar 的可重构网络输入排队分域调度研究[J]. 通信学报, 2012, 33(9):105-115
- [16] Yang Shu-qing, Peng Jin-ye. QoS Multi-users Packet Scheduling Algorithm in IEEE 802. 16e System[C]// 2011 International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2011). IPCSIT vol. 44, 2012:112-116
- [17] Yu Hua, Liu Xue. Scheduling Heterogeneous Flows with Delay-Aware Deduplication for Avionics Applications[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(9):1790-1802

(上接第 48 页)

关值与相关均值的比值来进行,且将判据阈值设为 $6^{[2]}$, 捕获结果如图 8 所示。以捕获概率为 90% 以上作为标准, 传统相干积分法能捕获到信噪比低至 -40dB 的信号, 而全比特算法能捕获到信噪比低至 -50dB 的信号, 本文算法介于二者之间, 能捕获到信噪比低至 -47dB 的信号。

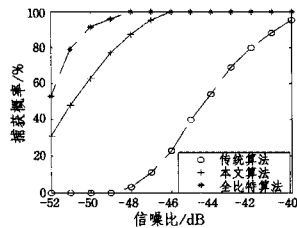


图 8 3 种算法在不同信噪比下的捕获效果比较

随着信噪比的降低, 非相干积分所带来的平方损耗影响也将增大, 到了一定程度有可能会峰值不够明显, 出现多个峰值甚至没有峰值出现等情况, 造成捕获失败, 因此, 随着噪声的增大, 接收机捕获的成功率将会有所下降, 在本文的仿真条件下, 本文算法最低能捕获到信噪比为 -47dB 的信号。

另外, 接收机的捕获性能除与算法的性能有关之外, 也与捕获采用的数据长度有关。本文采用 140ms 的数据进行捕获, 可用于室内条件下微弱信号(信噪比为 -44dB 左右^[9])的捕获。若需捕获更为微弱的信号, 则需进一步增加积分长度或采用更为灵敏的捕获算法。

由此可以看出, 本文算法相比全比特算法计算量大大减少, 又能取得良好的捕获效果, 是一种综合性能良好的算法。

结束语 本文介绍了一种基于位跳变检测的微弱信号快速捕获算法, 它通过估计位跳变边缘位置避开跳变位对相干积分的影响, 并延长相干积分时间。仿真实验效果表明, 该算法采用 140ms 的数据可以捕获信噪比低至 -47dB 的信号, 有效地提高了 GPS 软件接收机的捕获灵敏度, 同时也可以消除导航数据位跳变引起的误捕获, 算法的运算效率与全比特算法和位跳变检测算法相比大幅提高。

参考文献

- [1] 林庆恩, 茅旭初. 一种用于微弱 GPS 信号处理的快速捕获方法[J]. 计算机仿真, 2010, 27(10):330-334
- [2] 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):816-822
- [3] Ba Xiao-hui, et al. A novel algorithm based on FFT for ultra high-sensitivity GPS Tracking[C]// IONGNSS2009. Savannah, 2009:339-345
- [4] Mohammadreza Z, et al. Enhanced GNSS indoor signal detectability using polarization diversity[C]// IONGNSS 2009. Savannah, 2009:395-205
- [5] Cai Y, et al. Using network RTK corrections and low-cost receiver for precise mass market positioning and navigation applications[C]// IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Baden-Baden, 2011:345-349
- [6] Hu Cong-wei, et al. Assisted GPS positioning under weak signal environments[C]// ION GNSS 2009. Savannah, 2009:3102-3109
- [7] Wu Ling-juan, Lu Wei-jun, Yu Dun-shan. Research of weak signal acquisition algorithms for high sensitivity GPS receivers[C]// PrimeAsia 2009. Shanghai, 2009:173-176
- [8] Psiaki M L. Block Acquisition of weak GPS signals in a Software Receiver[C]// ION GPS 2001. Salt Lake City, 2001
- [9] 马若飞. GPS 弱信号捕获算法研究及其在软件接收机上的实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010:17-40
- [10] Kazemi P L, O'Driscoll C. Comparison of assisted and stand-alone methods for increasing coherent integration time for weak GPS signal tracking[C]// ION GNSS 2008. Savannah, 2008:1043-1053
- [11] 何秋生, 程亚奇. 基于位跳变检测提高 GPS 信号处理增益方法研究[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(2):99-102
- [12] Wu Ling-juan, Cui Ying-ying, Yu Dun-shan. Signal Acquisition and Tracking for Software GPS[C]// PrimeAsia 2009. Shanghai, 2009:384-387
- [13] 裘勋, 卢艳娥, 庞春雷. 改进的 GPS 弱信号差分捕获方法研究[J]. 现代防御技术, 2011, 39(6):126-130