2023 年 11 月

文章编号: 2095-4980(2023)11-1318-06

一种高动态弱GNSS信号跟踪解调算法研究与实现

吴军伟,梁涛涛,王 川

(中国工程物理研究院 电子工程研究所,四川 绵阳 621999)

摘 要:在某些高动态弱信号场景中,载波相位难以锁定。为实现对高动态弱全球导航卫星系统(GNSS)信号的跟踪,考虑锁频环较锁相环更为鲁棒,提出了一种基于锁频环(FLL)+差分解调 的算法,实现对GNSS信号的跟踪和解调。该算法采用二阶FLL实现对卫星信号的频率进行跟踪, 差分解调算法实现对比特数据的解调。工程应用上,算法采用现场可编程门阵列和数字信号处理 器(FPGA+DSP)的架构实现,在FPGA中实现信号的跟踪信号的前处理,在DSP中实现跟踪环路算 法、位同步和差分解调。本文在Matlab平台中实现算法的仿真,通过模拟器平台和对天接收真实 的GNSS信号对算法进行验证。仿真结果与实验结果表明,该算法在高动态弱信号条件下能实现对 卫星信号的稳定跟踪和数据的解调,克服了锁相环难以锁定导致数据无法解调的难题,最终实现 GNSS信号在该条件下的位置、速度和时间(PVT)解算。

关键词: 高动态弱GNSS信号; 二阶FLL; 比特同步; 差分解调; 现场可编程门阵列和数字信号处 理器(FPGA+DSP)

中图分类号:TN961 文献标志码:A doi: 10.11805/TKYDA2021322

Research and implementation of tracking demodulation algorithm for high dynamic and weak GNSS signal

WU Junwei, LIANG Taotao, WANG Chuan

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: In some high dynamic weak signal scenarios, the carrier phase is difficult to lock. In order to track the high dynamic weak Global Navigation Satellite System(GNSS) signal, considering that the Frequency Locked Loop(FLL) is more robust than the Phase-Locked Loop(PLL), an algorithm based on FLL+differential demodulation is proposed to track and demodulate the GNSS signal. The algorithm uses the second-order FLL to track the frequency of satellite signal, and the differential demodulation algorithm is employed to demodulate bit data. In engineering application, the algorithm adopts the architecture of Field Programmable Gate Array+Digital Signal Processing(FPGA+DSP), realizes the pre-processing of signal tracking signal in FPGA, and realizes the tracking loop algorithm, bit synchronization and differential modulation in DSP. The simulation of the algorithm is performed in Matlab platform, and the algorithm is verified by receiving the real GNSS signal from the simulator platform and the sky. The simulation and experimental results show that the algorithm can realize the stable tracking of satellite signal and data demodulation under the condition of high dynamic and weak signal, and overcome the problem that the data cannot be demodulated due to the difficulty of PLL locking, finally realize the Position Velocity and Time(PVT) solution of GNSS signal under this condition.

Keywords: high dynamic and weak Global Navigation Satellite System(GNSS) signal; the second order Frequency Locked Loop(FLL); bit synchronization; differential demodulation; Field Programmable Gate Array+Digital Signal Processor(FPGA+DSP)

在某些特殊的弱信号、高动态环境下^[1],天线相位衰减起伏较大,锁相环无法实现对GNSS信号的相位跟踪,无法实现数据的解调和观测量的提取,导致PVT解算结果错误甚至解算中断。文献[2]指出,矢量跟踪将各

个卫星的信号联合考虑,并且将信号跟踪与导航解算部分整合在一起,直接解算出接收机的位置、速度、钟差、钟漂等状态,然后对各个通道的载波、码参数进行更新。由于各卫星信号并不独立,而是与卫星和接收机之间的相对位置有关,矢量跟踪恰恰利用了这其中的关联,使通道间实现信息共享,因此能够跟踪更高的动态和更低的载噪比,在标量环失效的环境下仍能保持信号的跟踪。但是算法没有考虑到载体旋转的情况,且计算量大,在现有的资源有限的硬件平台中很难实现。

鉴于锁频环较锁相环更鲁棒,本文抛弃了通用的锁频+锁相的跟踪模式,只采用二阶FLL实现载波的频率跟踪,不跟踪信号载波相位。在载波相位没有剥离的情况下,及时路相关值均匀地分布在I/Q两路,采用相位差分法实现对导航数据的解调。

在弱信号存在且信号强度不稳定的条件下,为提高比特解调的成功概率,需要提高差分信号的能量,即延 长相干积分时间。但延长相干积分时间的前提是需要准确找到比特跳变位置,即正确的比特边沿。所以,比特 同步在差分解调算法中起着极其重要的作用。

本文从二阶 FLL 实现载波频率的锁定、比特同步实现比特跳变位置的查找、差分解调实现导航数据的解调 三个部分对高动态弱 GNSS 信号同步做了分析,并列出了算法基于 FPGA+DSP 的硬件实现架构,从算法研究和软 硬件实现上对跟踪解调算法进行整体分析介绍。

1 GNSS 信号跟踪算法

1.1 理论指导

高动态条件下接收机所接收的 GNSS 卫星信号的多普勒频率及其变化率很大,如果载波环采用 PLL,环路带 宽必须足够大,而且在高动态下输入信号与本地信号的频差有可能超出 PLL 同步带,造成环路失锁(无法跟踪, 环路不能收敛);如果载波环采用 FLL 直接跟踪载波频率,则其捕捉带和同步带更宽,对于动态具有更好的适应 性,但跟踪精确度却不如 PLL。二阶 FLL 比三阶 PLL 在相同的噪声带宽和载噪比下其动态应力门限要好出一个 数量级,但热噪声测量误差却大得多^[3]。所以,一般的高动态条件下都建议采用二阶 FLL 辅助三阶 PLL 的模式。 但是,在输入信号强度起伏的状态下,PLL 即使收敛了也可能会失锁,无法实现高动态弱信号下的稳定跟踪。 鉴于此种困难,接收机载波环采用二阶 FLL 实现信号的跟踪,只对频率进行锁定。二阶锁频环原理如图 1 所 示^[4],图中 NCO 为数字控制振荡器(Numerically Controlled Oscillator, NCO)。



图1 二阶锁频环

GNSS信号经过积分清除器后消除了下变频信号的高频成分和噪声,以提高信噪比,经1ms的积分清除后, I/Q及时路的复相干积分值*X*,为^[4]:

$$X_n = AD_n R(\Delta \tau) \sin c (f_0 T_c + an T_c^2) e^{j[2\pi (f_0 n T_c + \frac{1}{2}an^2 T_c^2) + \phi_0]} + w_n$$
(1)

式中: D_n 为未知的导航电文; $R(\Delta t)$ 为自相关函数; Δt 为接收码与本地码之间的偏移时间; sin c(x)为辛格函数; f_0 为初始频偏; a为多普勒速率,单位是 Hz/s; T_c 为相干积分时间 1 ms; A为信号幅度; ϕ_0 为初相位; w_n 为实部 和虚部相互独立、均值为零、方差为 1 的复高斯白噪声。考虑经捕获后码片偏移时间很短,可忽略不计, $R(\Delta t) = 1$ 。捕获的多普勒误差为 80 Hz,则 20log(sin c(f_0T_c)) = -0.2 dB,所以,简化信号模型为:

$$X_n = AD_n e^{j\phi_n} + w_n \tag{2}$$

式中 $\phi_n = 2\pi (f_0 n T_c + \frac{1}{2} a n^2 T_c^2) + \phi_0 \circ$

锁频环追求的是其复制载波与接收载波之间的频率一致,并不要求二者在相位上保持一致。假设锁频环的 相干和正交支路在第*n* 历元分别输出相干积分值*I_p(n)*和*Q_p(n)*,相应的相位值为*φ(n)*,而在第*n*-1 历元的相位差异 角为*φ(n*-1),根据相邻2个历元的相位差异变化率可以求出频率差异*f_e*:

$$f_{\rm e}(n) = \frac{\phi(n) - \phi(n-1)}{2\pi T_{\rm coh}}$$
(3)

1.2 算法实现架构

为充分利用 FPGA 的并行处理和 DSP 的串行处理优势,将跟踪算法在硬件实现上进行了合理的划分,在 FPGA 中实现下变频、码片产生以及早、中、晚3路信号的积分清除,在 DSP 上完成载波环和码环的算法实现^[5-6]。详细算法实现架构如图2 所示。



Fig.2 Architecture of algorithm implementation 图2 算法实现架构



图3 比特能量检测算法

2 比特同步

在 GNSS 系统中,要实现弱信号的跟踪和数据的解调,需要对 I/Q 相关值延长相干积分时间。为了保证相干积分时间段内没有发生数据的跳变,在延长相干积分时间前需要完成比特同步,找出比特跳变位置。

以 GPS 为例, *L*₁频段的扩频码 C/A 码周期为1 ms,比特周期为20 ms。比特同步前,信号积分时间为1个伪码 周期(1 ms),比特同步采用的是比特能量检测算法^[7-8],其原理如图3所示。比特能量检测法的处理流程如下:

1) 将一个比特划分为20 路检测点;

2) 每路相干积分时间为1个比特周期(20 ms);

3) 将每路的相干积分值做非相干累加求能量和;

4) 比较20路能量值的大小,能量值最大的那路对应1个完整的比特,从而找出比特跳变的位置[9]。

3 差分解调

前文已经介绍,由于特殊环境的需要,PLL的环路带宽太窄,满足不了现有的动态条件和灵敏度需求,所以,考虑采用环路带宽更宽的FLL来实现载波频率的锁定。在只有FLL的条件下,基带信号无法剥离载波相位,能量值均匀地分布在I/Q两路,无法根据I路信号的幅值来获取比特信息^{10]}。所以,本文利用数据比特的差分解调法^[6]来提取比特信息。差分解调的算法原理如图4所示。





如果将X,和X,1共轭相乘,不考虑噪声,则:

$$X_{n}\overline{X_{n-1}} = P_{dot} + iP_{cross} = A_{p}(n)A_{p}(n-1)e^{j(\phi(n-\phi(n-1))}$$
(4)

式中的点积和叉积分别等于:

$$\begin{cases} P_{dot} = A_{p}(n)A_{p}(n-1)\cos\left(\phi(n) - \phi(n-1)\right) \\ P_{cross} = A_{p}(n)A_{p}(n-1)\sin\left(\phi(n) - \phi(n-1)\right) \end{cases}$$
(5)

根据上面的推导,用arctan2函数计算出相位差^[9]:

$$\phi_{e} = \arctan 2(P_{cross}, P_{dot}) = \phi(n) - \phi(n-1)$$
(6)

根据相位差,可以判定比特数据是否翻转,从而获取比特数据。如果相位差在0附近,则认为比特没有发生 跳变,如果相位差在π附近,则认为比特发生了跳变。这样,给定了首个数据比特后就可以依次解调出后续的 比特。

4 算法验证

本文主要针对 GPS L1 频点的信号进行了仿真和实验平台验证,GNSS 系统中的北斗卫星导航系统以及其他的扩频体制的卫星导航系统同样适用该验证方法。

4.1 仿真分析

在 Matlab 中搭建跟踪解调算法的仿真平台, 初 始 多 普 勒 误 差 设 为 200 Hz, 共 仿 真 了 5 000 ms 的数据。设置-133 dBm、-136 dBm、 -139 dBm 三档信号强度,将 2FLL+3PLL 的跟 踪 算 法 (algorithm 1) 与 2FLL+差分解 调 算 法 (algorithm 2) 从 载 噪 比 (Carrier to Noise Ratio, CNR)和误码率(P_b)两个方面进行对比分析,仿 真结果如表 1 所示。

Table1 Contrast of simulation results		
signal power/dBm	CNR(algorithm 1, algorithm 2)/(dB·Hz)	$P_{\rm b}$ (algorithm 1,algorithm 2)
-139	33,33	0.008,0.164
-136	36,36	0,0.006
-133	39,39	0,0.04

表1 仿真结果对比

从表中可以看出,在只有FLL的载波跟踪下,并不会带来信号能量的损耗,但是由于相位差异变化量 $\phi(n) - \phi(n-1)$ 的信噪比较原来的相位差异 $\phi(n)$ 的信噪比低 3 dB,所以在相同的条件下,锁频环条件下信号解调的比特错误率。但由于锁相环在某些高动态弱信号的环境下容易失锁,锁频环+差分解调不失为一种极佳的可行方案^[11]。

4.2 实验平台验证

通过模拟器平台和对天接收真实卫星信号进行实测,验证了FLL+差分解调算法的功能的正确性和性能的有效性。在模拟器平台中,采用湖南矩阵电子所研制的多模卫星信号模拟器,在模拟器平台中设置了静态场景(用户位置固定)、大圆周高动态场景(用户运动轨迹为一个空间大圆周模型)以及外部注入高动态场景数据(用户运动轨迹为一大动态模型),对-130~-140 dBm范围内的信号进行测试验证。测试结果表明,无论是静态场景,还是高动态场景,接收机跟踪正常,取静态场景下的跟踪信号的相干积分结果,如图5所示。对天接收真实卫星信号接收机跟踪解算正常,高程解算误差优于10 m,速度误差优于0.2 m/s,解算误差如图6所示。





5 结论

二阶FLL+差分解调算法是针对锁相环在某些运用环境中 无法稳定跟踪载波多普勒,而锁频环能持续稳定跟踪载波多 普勒的条件下提出来的。同时由于有弱信号的跟踪需求,需 要延长相干积分时间来提高接收机跟踪灵敏度。本文基于此 中前提开展了二阶FLL、比特同步和差分解调算法的研究。 虽然二阶FLL+差分解调算法的误码率较二阶FLL+3 阶PLL下 的误码率要高,但克服了锁相环无法实现相位跟踪的难题。 算法实现上采用FPGA+DSP的实现架构,合理利用了2种芯 片的并行与串行工作模式。最后,通过仿真验证平台对该算 法进行了仿真验证,模拟器验证平台以及对天实测,实验结 果表明了该方法的可行性和优越性,解决了某些高动态弱信 号条件下载波相位无法锁定的技术难题。



参考文献:

- [1] 张博,杨春,解楠,等. GPS C/A 码平均相关捕获算法的 FPGA 设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2009,7(1):1-3,8. (ZHANG Bo, YANG Chun, XIE Nan, et al. FPGA design of averaging correlation for GPS C/A code acquisition[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2009,7(1):1-3,8.) doi:10.3969/j.issn.1672-2892.2009.01.001.
- [2] 姚舜扬,尹建君,张建秋. 多项式预测 GNSS 信号矢量跟踪算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(5):681-687,700.
 (YAO Shunyang, YIN Jianjun, ZHANG Jianqiu. Polynomial prediction GNSS vector tracking algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(5):681-687,700.) doi:10.11805/TKYDA201605.0681.
- [3] 吴琼,寇艳红,郑兴平. 高动态 GPS 接收机环路跟踪技术研究[J]. 无线电工程, 2008,38(12):32-36. (WU Qiong,KOU Yanhong, ZHENG Xingping. Research on high dynamic GPS receiver loop tracking[J]. Radio Engineering, 2008,38(12):32-36.) doi:10. 3969/j.issn.1003-3106.2008.12.010.
- [4] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2009. (XIE Gang. Principles of GPS and receiver design[M].
 Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2009.)
- [5] 王婷. 多模 GNSS 接收机跟踪环路研究与实现[D]. 北京:北京邮电大学, 2012: 8-9. (WANG Ting. Research and implementation of tracking loop in multi-mode GNSS receiver[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012: 8-9.)
- [6] 杨燕娇,陈静,薛志芹,等.一种高动态低载噪比接收机跟踪环路设计方法[C]//第九届中国卫星导航学术年会论文集—S03 卫星导航信号及抗干扰技术.哈尔滨:中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2018:79-83. (YANG Yanjiao,CHEN Jing, XUE Zhiqin, et al. Method for receiver tracking loop in high dynamic and low carrier-to-noise ratio conditions[C]// Proceedings of the 9th China Satellite Navigation Academic Annual Conference-S03 Satellite Navigation Signal and Anti interference Technology. Harbin, China: Academic Exchange Center of China Satellite Navigation System Management Office, 2018:79-83.)
- [7] 李新山,郭伟,谢先斌. 一种高动态、弱信号 GPS 比特同步方法[J]. 电子与信息学报, 2011,33(10):2521-2525. (LI Xinshan, GUO Wei, XIE Xianbin. A GPS bit synchronization method for high-dynamic and weak signal[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011,33(10):2521-2525.) doi:10.3724/SP.J.1146.2011.00270.
- [8] YANG C, NGUYEN T, BLASCH E, et al. Post-correlation semi-coherent integration for high-dynamic and weak GPS signal acquisition[C]// 2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Monterey, CA, USA: IEEE, 2008:1341-1349. doi: 10.1109/PLANS.2008.4570122.
- [9] LIU Xinning, NIU Yuxiang, YANG Jun, et al. A GPS bit synchronization method based on frequency compensation[J]. IEICE Transactions on Communications, 2015,E98.B(4):746-753. doi:10.1587/transcom.E98.B.746.
- [10] 郑兴平,寇艳红. 高动态 GPS 接收机跟踪环路设计与实现[J]. 无线电工程, 2010,40(1):26-28. (ZHENG Xingping,KOU Yanhong. Design and implementation of high dynamic GPS receiver tracking loop[J]. Radio Engineering, 2010,40(1):26-28.) doi:10.3969/j.issn.1003-3106.2010.01.010.
- [11] MISRA P,ENGE P. 全球定位系统—信号、测量与性能[M]. 2版. 罗鸣,曹冲,肖雄兵,等译. 北京:电子工业出版社, 2008:375. (MISRA P,ENGE P. Global positioning system—signals, measurements, and performance[M]. 2nd ed. Translated by LUO Ming, CAO Chong,XIAO Xiongbing, et al. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2008:375.)

作者简介:

吴军伟(1987-),女,硕士,助理研究员,主要研 究方向为卫星导航.email:676394009@qq.com. **王** 川(1989-),女,硕士,助理研究员,主要研 究方向为扩频信号处理.

梁涛涛(1988-),男,硕士,助理研究员,主要研 究方向为卫星导航.