

北斗弱信号跟踪相干积分算法设计

韩志凤[†], 刘建业, 李荣冰, 王 翌

(1. 江苏省物联网与控制技术重点实验室, 南京 211106; 2. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106)

摘 要: 为了提高北斗接收机弱信号跟踪灵敏度, 解决北斗信号中 NH 码跳变和比特跳变频繁限制相干积分时间加长的问題, 提出一种基于相干积分的北斗弱信号优化跟踪算法. 首先, 利用分组比特匹配方法进行位同步/帧同步算法优化, 实现全比特相干积分; 然后, 采用最大似然法对数据比特值进行估计和解码, 实现跨比特相干积分; 最后, 利用卫星导航系统开发平台开展仿真验证, 分别实现了 20 ms 和 40 ms 时间的相干积分, 结果表明, 采用 40 ms 积分后信噪比提升约 16 dB. 所提出算法能够稳定可靠地实现北斗信号位同步和帧同步功能, 并快速地剥离 NH 码, 消除数据比特跳变和 NH 码相位变化的影响, 可实现全比特相干积分和跨比特相干积分, 有效提高北斗弱信号跟踪灵敏度.

关键词: 弱信号; NH 码; 高灵敏度; 相干积分

中图分类号: V249.3

文献标志码: A

Beidou weak signal tracking algorithm based on coherent integration

HAN Zhi-feng[†], LIU Jian-ye, LI Rong-bing, WANG Yi

(1. Jiangsu Key Laboratory of Internet of Things and Control Technologies, Nanjing 211106, China; 2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to improve the tracking sensitivity of the Beidou receiver and solve the problem that the data bits and NH code phase changes limit coherent integration time, a weak signal tracking algorithm based on coherent integration is proposed. Firstly, an optimized bit synchronization/frame synchronization algorithm is designed with bits matching in groups to realize coherent integration within bits. Then, the maximum likelihood estimation method is used to estimate bit reversions to realize coherent integration over bits. Finally, software receiver simulation is carried out. Correlation tests of 20 ms and 40 ms are realized and the signal-to-noise ratio increase about 16 dB. The simulation results show that the bit synchronization method is able to achieve stable and reliable signal synchronization. With bit synchronizing and NH code solving, it can realize coherent integration within or across bits, and effectively improve the tracking sensitivity of the Beidou weak signal.

Keywords: weak signal; NH code; high sensitivity; coherent integration

0 引 言

在室内、隧道、密林等环境中, 卫星信号强度会严重衰减, 一般的卫星接收机设计难以满足使用要求. 随着我国北斗卫星导航系统的发展, 北斗卫星导航系统已广泛应用于我国国民经济各行业和国防建设, 针对弱信号的高灵敏度北斗导航接收机设计已成为研究热点^[1-5].

加长相干积分时间提高信噪比, 是高灵敏度接收机设计的基本方法. 同时, 增长相干积分时间可以削弱多路径、互相关干扰并避免平方损耗. 越长的相

干积分时间意味着越高的相干积分增益, 但是延长积分时间往往受到数据比特跳变的限制^[6]. 北斗信号二次编码调制了速率为 1 kbps 的 NH 码, 在不去除 NH 码的情况下, 积分时间被限制在 1 ms.

非相干积分通过平方运算可以消除比特跳变影响, 但噪声同时被平方, 造成平方损耗. 差分相干积分将当前相干积分结果与下一时刻的相干积分结果共轭相乘, 也可以消除比特跳变的影响, 且增益损耗比非相干积分小. 非相干、差分相干以及半比特变换、四分法等, 其目的都是规避 NH 码的影响^[7].

收稿日期: 2017-02-28; 修回日期: 2017-05-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61374115); 江苏省研究生培养创新工程项目(KYLX-0283); 中央高校基本科研业务费专项资金项目; 南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金项目(BCXJ14-06).

作者简介: 韩志凤(1989—), 女, 博士生, 从事卫星/惯性组合导航技术的研究; 刘建业(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 从事惯性导航、组合导航技术等研究.

[†]通讯作者. E-mail: hanzhifeng@nuaa.edu.cn

目前,常用的NH码剥离方法是滑动相关法,与测距码的剥离类似,将20ms数据依次与本地NH码进行滑动相关,找到相关峰值,搜索NH码相位并去除NH码。但在此种方法中,要考虑数据累积过程中数据比特跳变的影响^[8]。另外,采用滑动相关法需要对NH码进行20次相关才能找到正确的NH码相位,因此,会造成每个环路搜索时间增加到原有的20倍,使得首次定位时间大大增加。可见,使用滑动相关法剥离NH码去除NH码相位影响并不是非常有效的途径。

北斗信号中包含频繁的数据比特跳变和NH码相位变化,使得传统长相干积分算法不再适用,限制了积分时间的加长。对此,本文针对北斗信号特点设计优化算法,消除数据比特边缘以及NH码相位的影响,实现全比特和跨比特的相干积分,从而提高北斗弱信号跟踪能力。

1 北斗信号特点分析

GPS信号导航电文数据比特宽20ms,在未知比特跳变的情况下,用于信号跟踪的相干积分时间最长为20ms,可以通过预存星历预测数据比特跳变情况,实现长于20ms的相干积分。但是,卫星星历一般每两个小时更新一次,此方法需要及时判断导航电文更新。另外,也可通过外界辅助提供导航电文数据比特信息。

在北斗卫星导航系统中,MEO/IGSO卫星B1I信号播发速率为50bps的D1导航电文,并二次编码调制了速率为1kbps的NH码,D1导航电文中一个信息位宽度为20ms,扩展码周期为1ms,20比特的NH码码宽为1ms,与导航信息码和测距码同步调制;GEO卫星B1I信号播发速率为500bps的D2导航电文。北斗D1导航电文数据比特跳变、NH码序列与测距码之间存在固定重复性的关系,如果信号实现了位同步,即找到数据比特的边缘,则能确定NH码序列。

GPS中常用的位同步方法是直方图法^[9],根据相邻两个毫秒数据的符号跳变情况判断数据比特边缘,但是北斗信号中NH码跳变的存在使得直方图方法难以实现北斗信号的位同步。

2 北斗弱信号跟踪算法设计

2.1 基于分组比特匹配的全比特积分算法

NH码的存在虽然导致比特内数据的跳变,但是由于NH码的重复性,比特数据之间的关系是存在的。导航电文以帧为单位进行编排,帧数据以11比特帧同步码为起始标志,具有很强的可靠性。因此,结合帧同步的比特匹配法,借鉴位同步直方图分组的思

想,本文提出基于分组比特匹配的全比特相干积分算法。

进行时长为1ms的相干积分,将积分结果二进制数据流用1~20循环编号,分成20组,对每一组数据进行比特匹配检测。如果连续有20组实现比特匹配且20个数据之间符合NH码调制,则可同时实现信号的位同步和帧同步,即找到数据比特边缘和子帧起始边缘。因此,可以根据数据比特边缘实现全比特相干积分。此方法借鉴了直方图中分组的思想,但是并不进行直方图中比特跳变检测,而是对每组的内部数据进行比特匹配检查,因此,该方法不受NH码相位跳变的影响。

在完成信号的位同步和帧同步之后,数据比特边缘和子帧起始边缘已确定。由于NH码的起始边缘与数据比特边缘一致,直接将每比特20ms数据与NH码进行模二相加即可剥离NH码,方便快捷,而且不会增加额外的时间消耗。

2.2 分组比特匹配方法流程设计

常用的帧同步比特匹配法是通过帧同步码、奇偶校验检测完成的。北斗D1导航电文由超帧、主帧和子帧组成。每个超帧由24个主帧组成,每个主帧由5个子帧组成;每个子帧由10个字组成,历时6s;每个字为30比特,历时0.6s。每个子帧第1个字的前15比特信息不进行纠错编码,后11比特信息采用

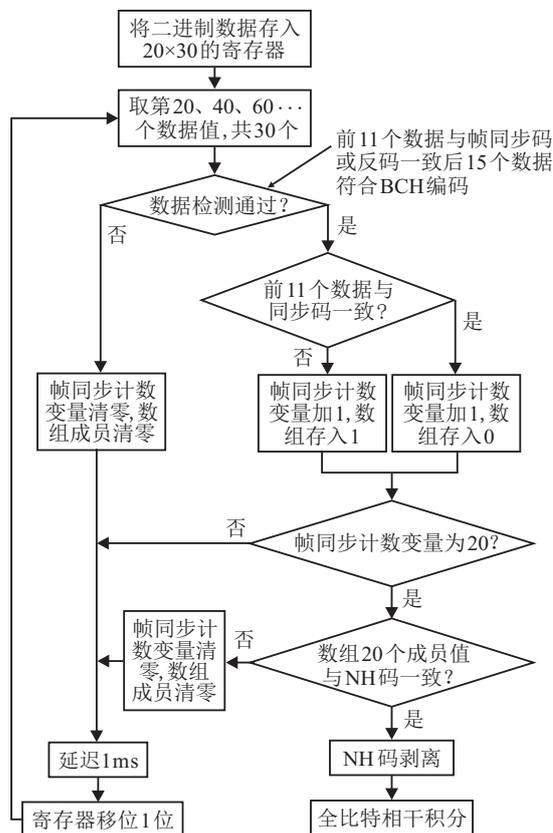


图1 分组比特匹配方法流程

BCH(15,11,1)方式进行纠错,信息位共有26比特;其他9个字均采用BCH(15,11,1)加交织方式进行纠错编码,信息位共有22比特。

基于北斗D1的以上特点,选择连续30比特的数据进行比特匹配,对前11位进行帧同步码检测,对后15位进行BCH纠错检查可以保证检测的可靠性。

全比特相干积分的分组比特匹配方法的基本流程如图1所示。

按以上流程实现全比特相干积分过程,主要包括循环分组、比特匹配检测、NH码检测剥离、全比特积分等部分。设计行宽为20、深度为30的移位寄存器,数据每1ms移位1位,对每列的30个数据进行比特匹配检测,从而保证检测数据取自不同的数据比特。比特匹配检测主要包括帧同步码检测和BCH纠错检查,确保位同步的可靠性。此方法解决了MEO/IGSO卫星信号中调制NH码的问题,可实现时长20ms的全比特相干积分。

2.3 跨比特相干积分算法

对于GEO卫星,所播发的D2导航电文速率为500 bps, 2ms比特内的相干积分远远不能满足对弱信号跟踪的要求。另外,在弱信号情况严重的环境中,需要对MEO/IGSO卫星信号进行长于20ms的相干积分累积,以获得更高的积分增益。因此,需要进行跨比特的相干积分。

采用最大似然比特估计方法^[10]对数据比特的值进行估计和解码,从而实现跨比特的相干积分。在分组比特匹配实现比特同步的基础上,利用若干比特长度的积分结果与本地比特组合的内积运算结果进行最大似然估计。例如有 N 个比特长度的数据,可能的比特值的组合有 2^{N-1} 种可能。可以获得本地数据比特组合矩阵 $B(2^{N-1} \times N)$ 为

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & -1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & -1 & \cdots & -1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

将 N 个全比特相干积分结果 $I_P(N)$ 与组合矩阵中的每一行 b_m 进行内积运算,有

$$I_m = I_P(N) \cdot b_m, \quad m = 1, 2, \dots, 2^{N-1}. \quad (2)$$

利用最大似然比特估计对内积运算结果进行分析,获得比特的估计值为

$$\hat{b} = \underset{b_m \in \{\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1\}}{\arg \max} |I_m|. \quad (3)$$

在获得比特估计值的基础上,可进行跨比特的长相干积分运算,从而获得更高的信噪比增益。

2.4 相干积分增益

I 支路离散信号的相干积分公式如下:

$$I_P(n) = \frac{1}{N_{\text{coh}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{coh}}} i_P(nN_{\text{coh}} + k). \quad (4)$$

其中: $i_P(n)$ 为相关器输出的相关结果信号, N_{coh} 为在相干积分时间内输入到 I 支路的积分器的相关结果个数。相关结果信号 $i_P(n)$ 包含着均值为零、方差为 σ_n^2 的高斯白噪声。 N_{coh} 个 $i_P(n)$ 相加后,幅值为原来的 N_{coh} 倍,信号功率增强了 N_{coh}^2 倍;而 N_{coh} 个可正可负的噪声加在一起,噪声功率增强了 N_{coh} 倍。因此,相干积分后信噪比SNR增加了 N_{coh} 倍。于是以分贝为单位的相干积分增益 G_{ci} 为

$$G_{ci} = 10 \lg N_{\text{coh}}. \quad (5)$$

因此,如果相关器累积时间为1ms,相干积分时间为20ms,则通过全比特相干积分可获得增益约为13.01 dB。如果通过跨比特相干积分将积分时间加长到40ms,则可获得16.02 dB增益。

3 仿真分析

3.1 仿真平台

在卫星导航系统开发平台上对本文方法进行实验验证,如图2所示,包括北斗卫星信号模拟器、北斗卫星接收机、仿真器等。其中北斗卫星模拟器可以设置卫星信号强度和载体运动航迹用于仿真模拟各种场景。北斗卫星接收机由天线单元、射频单元及基带处理单元组成,如图3所示,基带处理单元由Altera公司的FPGA-EP2S6F484I4芯片和TI的DSP-TMS320C6713芯片构成。在FPGA中编程实现载波NCO产生模块、码NCO产生模块、载波混频模块、码产生模块、相关器模块、帧同步模块;在DSP中设计实现可见星预测、信号捕获策略、信号跟踪环路等功能。



图2 卫星导航系统开发平台



图3 北斗卫星导航接收机

3.2 分组比特匹配模块实验仿真

仿真中采用二维搜索策略进行信号捕获,利用二阶锁频环辅助下的三阶锁相环形式进行环路跟踪.在信号稳定跟踪后, I 即时支路相关器将输出速率为 1 kHz 的卫星导航电文原始二进制数据并作为分组比特匹配模块的输入.

对全比特相干积分的分组比特匹配模块进行设计,利用 QuartusII7.2 软件进行代码编写如下:

```

GPS_FRAME_SYNC_GEN
(
clock,
clock32x,
cs_gnss,
reset,
DUMP,

```

```

CHn_I_PROMPT_SIGN,
Frame_sync_flag,
Bit_sync_flag,
clock_1ms
).

```

其中:clock32x 为码 NCO 产生的 32 倍码速率时钟使能输入,作为帧同步产生模块的主使能时钟;cs_gnss 为模块工作使能信号输入,高电平使能模块工作;DUMP 为码产生模块输出信号,这里作为输入,脉冲周期为 1 ms;CHn_I_PROMPT_SIGN 为即时相关累加 I 支路符号位输出;Frame_sync_flag 为帧同步信号输出,周期为 6 s,指示帧同步标志的起始;Bit_sync_flag 为位同步指示信号,指示 20 ms 位同步信号的起始;clock_1ms 为帧同步产生模块 1 ms 同步时钟输出.时序仿真结果如图 4 所示.

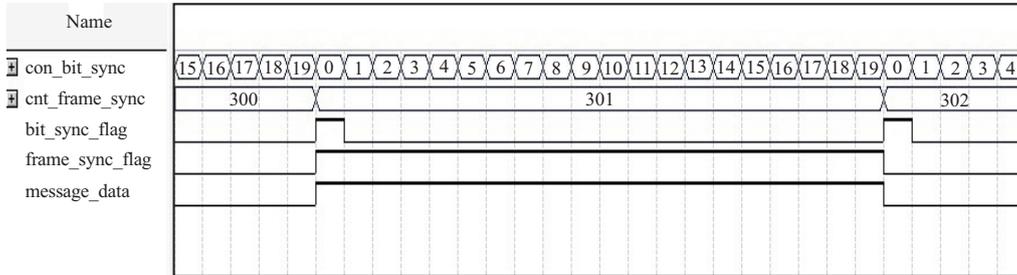


图 4 分组比特匹配模块时序仿真结果

图 4 中, cnt_bit_sync 将数据流分成 20 组, cnt_frame_sync 为帧同步计数, bit_sync_flag 和 frame_sync_flag 分别是位同步和帧同步标志, message_data 是解调出的数据流.

由仿真结果可以看出, 分组比特匹配方法能够稳定可靠地实现信号位同步和帧同步功能, 找到数据比特边缘和 NH 码相位.

3.3 相干积分模块实验仿真

在分组比特匹配模块实现的基础上, 在开发平台中按照全比特相干积分和跨比特相干积分流程实现积分时间加长.

设计采用 3 个通道同时跟踪同一颗卫星: 第 1 个通道始终采用 1 ms 积分时间; 第 2 个通道在帧同步后采用 20 ms 相干积分; 第 3 个通道在全比特相干积分后采用 40 ms 相干积分. 在实验过程中逐渐降低卫星信号强度, 信号载噪比由 45 dB-Hz 均匀减小到 10 dB-Hz. 图 5 为第 1 通道的 1 ms 相干积分 IQ 幅值情况. 图 6 为第 2 通道中 IQ 幅值情况, 可以看出, 此通道最初阶段进行 1 ms 相干积分, 在 12 s 左右实现帧同步, 相干积分时间加长到 20 ms 后, I 与 Q 幅值对比更加明

显, Q 路噪声明显减小. 图 7 为第 3 通道中 IQ 幅值情况, 采用 40 ms 相干积分后, I 与 Q 幅值对比最为明显.

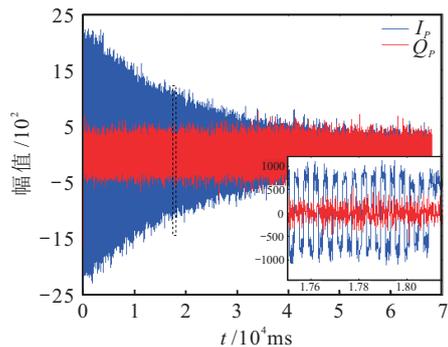


图 5 1 ms 相干积分 IQ 值

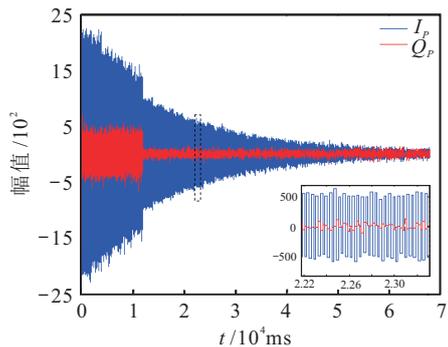


图 6 20 ms 相干积分 IQ 值

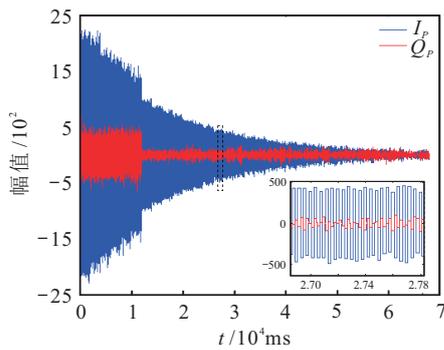


图7 40 ms相干积分IQ值

图8为3个通道的载波鉴相值结果对比. 可以看出: 第1个通道1 ms积分的载波鉴相值随着信号强度的减弱而逐渐变大, 在20 s时已达到失锁边界, 信号载噪比约35 dB-Hz; 另外两个通道在12 s左右积分时间加长后鉴相值显著变小, 随着信号强度减弱, 鉴相值也逐渐增大, 40 ms积分的载波鉴相值在约50 s时达到失锁边界, 信号载噪比约为20 dB-Hz. 通过积分时间的加长, 环路弱信号的跟踪能力大大增强.

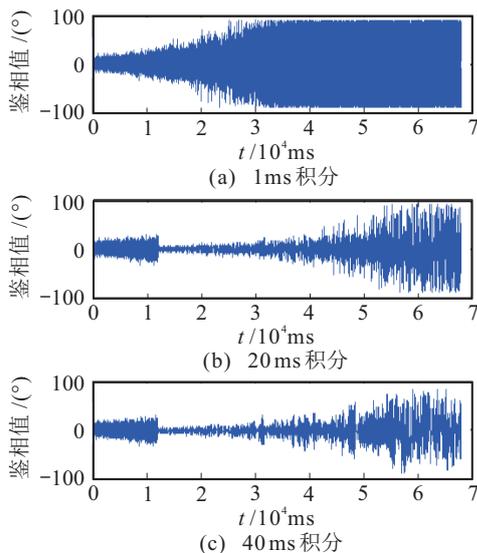


图8 鉴相值对比

图9为40 ms积分过程中信噪比变化情况. 可以看出, 40 ms积分前后环路信噪比增大了约15~16 dB, 与理论值相符.

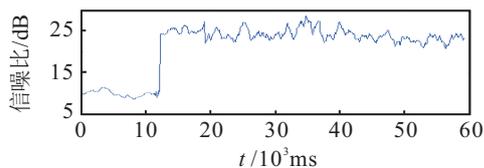


图9 40 ms积分信噪比变化

4 结论

针对数据比特跳变和NH码相位变化限制了北斗导航接收机相干积分延长的问题, 本文提出了一种分组比特匹配的位同步/帧同步设计方法, 实现了全

比特相干积分, 并采用最大似然估计法对数据比特进行估计, 实现了跨比特相干积分. 在接收机硬件开发平台上进行仿真分析, 所得结果验证了其正确性: 1) 此方法可同时实现北斗信号位同步和帧同步, 且不受NH码相位跳变的影响; 2) 此方法消除了数据比特跳变和NH码相位变化的影响, 可实现全比特相干积分和跨比特相干积分; 3) 该算法可有效提高北斗弱信号跟踪灵敏度.

参考文献(References)

- [1] Yan K, Ziedan N I, Zhang H, et al. Weak GPS signal tracking using FFT discriminator in open loop receiver[J]. GPS solutions, 2016, 20(2): 225-237.
- [2] Wang Xinlong, Ji Xinchun, Feng Shaojun, et al. A high-sensitivity GPS receiver carrier-tracking loop design for high-dynamic applications[J]. GPS Solutions, 2015, 19(2): 225-236.
- [3] Ren T, Petovello M. Collective bit synchronization for weak GNSS signals using multiple satellites[C]. Position, Location and Navigation Symposium-PLANS 2014. Monterey: IEEE, 2014: 547-555.
- [4] Meng Q, Liu J Y, Zeng Q H, et al. BeiDou navigation receiver weak signal acquisition aided by block improved DBZP[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2017, 38(8): 144-154.
- [5] Wen C Y, Yue F Z, Chou Y H, et al. Under the environment of high rail BDS weak signal tracking technology research[J]. J of Aircraft Measurement and Control, 2013, 32(4): 363-370.
- [6] 谢刚. GPS原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009. (Xie G. Principles of GPS and receiver design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.)
- [7] Jin S. Global navigation satellite systems signal, theory and applications[M]. Croatia: Shuanggen Jin, 2012: 161-188.
- [8] Shivaramaiah N C, Dempster A G, Rizos C. Exploiting the secondary codes to improve signal acquisition performance in Galileo receivers[C]. Proc of ION GNSS. Savannah, 2008: 1497-1506.
- [9] Puga G L, Roncagliolo P A, Garcia J G. Multi-millisecond GNSS maximum likelihood bit synchronization method[C]. The 5th Int Conf on Advances in Satellite and Space Communications. Venice, 2013: 34-39.
- [10] Ren T, Petovello M, Basnayake C. Requirements analysis for bit synchronization and decoding in a standalone high-sensitivity GNSS receiver[C]. 2012 Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation, and Location Based Service (UPINLBS). Helsinki: IEEE, 2012: 1-9.