

· 雷达系统与技术 ·

DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2021.04.006

基于星历匹配的导航电文快速帧同步算法

房晓丽¹, 彭晖¹, 吴礼杰²

(1. 湖南信息学院 电子信息学院, 长沙 410151; 2. 国防科技大学 电子科学学院, 长沙 410073)

摘要:卫星导航已经成为各类高精度制导导弹的主要导航手段。由于整个飞行时间很短,弹载接收机为了减小首次定位时间通常会预先加载真实的星历数据。受 GPS L1C/A 信号电文格式限制,传统使用帧头进行同步的方法在最差情况下需要 6 s 的时间。针对该问题,文中提出了基于星历匹配的电文快速帧同步算法,利用预加载的星历数据与接收信号进行匹配,从而完成电文的帧同步。理论分析和仿真结果表明:相比传统的基于帧头的帧同步算法,该算法平均同步时间可缩短约 25%。

关键词:卫星导航;弹载接收机;快速定位;帧同步;星历匹配

中图分类号:TN959.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-7859(2021)04-0034-05

引用格式:房晓丽, 彭晖, 吴礼杰. 基于星历匹配的导航电文快速帧同步算法[J]. 现代雷达, 2021, 43(4): 34-38.

FANG Xiaoli, PENG Hui, WU Lijie. A quick frame synchronization method for navigation message based on ephemeris matching[J]. Modern Radar, 2021, 43(4): 34-38.

A Quick Frame Synchronization Method for Navigation Message Based on Ephemeris Matching

FANG Xiaoli¹, PENG Hui¹, WU Lijie²

(1. School of Electronic Information, Hunan Institute of Information Technology, Changsha 410151, China)

(2. College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:Satellite navigation has been the primary method of various high precision guided boom. Because of short flying period, the ephemeris should be load beforehand for reducing the time to first fix. The custom frame synchronization method needs 6 s in worst condition restricted by the navigation data format of GPS L1C/A signal. A novel fast frame synchronization method is proposed, in which the pre-loaded ephemeris is used for quick matching with the received bit data. The theoretical analysis and simulation result shows that the mean time of frame synchronization of the proposed method could be reduced by 25% compared with that of custom method.

Key words:satellite navigation; missile borne receiver; rapid positioning; frame synchronization; ephemeris matching

0 引言

随着全球导航卫星系统(GNSS)定位服务性能的不断提升,特别是各类低成本、高性能卫星导航用户接收机的持续研发与推广,GNSS 系统已经服务于极其广泛的用户类型。从地面的行人、汽车,到空中的飞机、导弹等各类飞行器,甚至一些低轨道卫星,都已安装部署了卫星导航接收机^[1-3]。

精确制导导弹拥有高精度、准确打击和性能可靠

等众多技术优势,是各军事强国确保国家安全、提升军事威慑力的主要手段,已然成为现代战争的主角。卫星导航技术因其优异的定位性能以及全球、全天候的覆盖特性,逐渐成为精确制导弹药的首选制导方式^[4]。

由于精确制导导弹整个飞行时间很短,因而比传统接收机要求更短的首次定位时间。首次定位时间是指接收机从上电到输出首次定位结果的时间差^[5]。随着硬件工艺的快速发展,弹载接收机的捕获和跟踪模块都具备强大的并行处理能力,因而首次定位时间主要取决于电文帧同步和星历获取所需的时间^[6]。

以目前最广泛使用的 GPS L1C/A 信号为例,其电文由长度为 6s 的子帧组成^[7]。为了获取定位所需的

基金项目:湖南省教育厅科学研究资助项目(18C1583);湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(19B395);湖南省教育厅科学研究重点项目(18A511)

通信作者:彭晖 **Email:**feixuepiaoyi@126.com
收稿日期:2020-11-15 **修订日期:**2021-01-21

全部星历数据,至少需要收到完整的子帧1、2、3。在最差情况下,获取完整星历需要时间长达36 s^[8],这显然无法满足弹载接收机快速启动的需求。为了解决星历获取对首次定位时间的影响,弹载接收机通常采用预先加注星历的方式,因而影响弹载接收机首次定位时间的主要因素就是电文帧同步时间。

GPS L1C/A信号每个子帧的开始部分为固定的8 bit同步码序列10001011,接收机在完成位同步之后,将解调出的比特数据与8 bit同步码序列进行相关,当完全一致时,即确定为帧头^[9]。为了避免将电文数据中的比特序列误认为帧的同步头,通常还需要连续多帧判断帧头是否正确。受限于GPS L1C/A信号的子帧结构,在最差情况下完整帧同步需要约6 s的时间。如果考虑连续两帧进行帧头判断,则同步时间会进一步增加至12 s。对于弹载接收机而言,则需要进一步缩短帧同步所需的时间,以减小首次定位时间。

针对上述问题,本文提出了基于星历匹配的电文快速帧同步算法,利用预先加注的星历数据,按照最长帧同步时间为优化目标,选择特定的星历数据段作为电文匹配的序列,以实现电文的快速同步,从而减小接收机的首次定位时间。理论分析和仿真结果表明:相比传统的基于帧头的帧同步算法,该算法平均同步时间可缩短约25%。

1 GPS L1C/A 导航电文格式及作用

1.1 导航电文的格式

GPS L1C/A信号导航电文的字、子帧、帧的结构组成如图1所示^[9]。

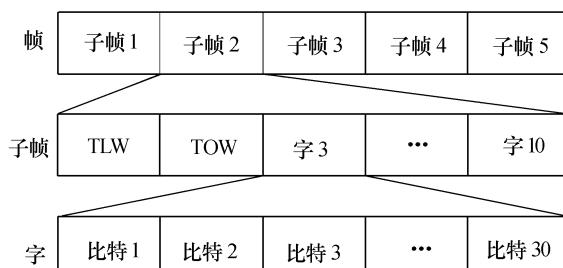


图1 GPS L1C/A信号的导航电文结构

每个子帧由10个30 bit的字组成,周期为6 s;每5个子帧组成1个帧,共30 s;每25帧组成一个超帧,共750 s。在帧同步环节,并不需要引入超帧的概念,因而图1中并未描述帧与超帧之间的关系。

1.2 导航电文的作用

通过导航电文,接收机可以实现如下两个目的。

1) 获得卫星信号毫秒以上的时间

接收机在完成捕获和跟踪后,根据本地码相位只能获得卫星信号毫秒以内的时间,而毫秒以上的时间必须通过导航电文同步才能获得。

GPS L1C/A信号导航电文每个子帧的第一个字和第二个字分别为遥测字(TLM)和交接字(TOW)。遥测字的第1 bit至第8 bit为固定的二进制序列10001011,通常称为帧头。接收机利用该序列匹配解调出的比特数据,当确定子帧的边沿后,接收机即完成了帧同步,此时子帧的边沿与系统时间6 s严格对齐。完成帧同步之后,接收机可以根据接口控制文件(ICD)中的定义解析出导航电文特定字段的数据。交接字由周计数(WN)和周内秒(TOW)组成,接收机根据该字段准确获得卫星信号毫秒以上的时间。

2) 获取定位所需的参数

接收机定位需要根据星历参数计算任意时刻的卫星位置,而星历参数就是从卫星播发的导航电文中提取。

GPS L1C/A信号播发的导航电文可分为三类数据块:第一数据块提供卫星的时钟校正参数和健康状态等,由第1子帧播发;第二数据块提供卫星自身的星历参数,由第2和第3子帧播发;第三数据块提供所有卫星的历书参数、电离层延时校正参数等其他数据。其中,第一和第二数据块是接收机实现定位所必须的,而第三数据块则不是急需的。因此,通常情况下,接收机在完整地获取到子帧1、2、3的数据后即可完成定位解算^[10]。

2 传统帧同步方法及性能评价指标

2.1 算法原理

传统的基于帧头匹配的帧同步方法通过移动解调出数据序列,并与帧头进行相关,直至相关值超过门限^[11]。在位同步阶段,数据序列通常使用1 bit量化的模拟电平表示,其与逻辑电平之间的关系如表1所示。

表1 逻辑电平和模拟电平的对应关系

逻辑电平	模拟电平
0	-1
1	1

假设导航电文帧长度为N,帧头长度为M,序列为 $f_h[k] (0 \leq k \leq M-1)$,接收机解调后的数据序列为

$d[k]$ 。帧头所在位置的搜索过程如下式所示。

$$x = \arg \left\{ \cdot \mid \sum_{k=0}^{M-1} d[k+i] \cdot f_h[k] \mid \geq \lambda \right\} \quad (1)$$

式中: $\arg \{\cdot\}$ 表示满足条件的参数; λ 表示帧同步相关值的门限。在通常情况下,解调后的数据序列出现误码的概率很低,因而门限通常选为电文的帧头长度 M 。当找到相关值超过门限 λ 的位置 x 后, $d[x]$ 即表示帧头的第 1 bit。

由于导航电文数据中也可能存在和帧头完全相同的序列,因而仅仅根据相关值过门限即确定帧头位置可能会导致帧头同步错误。假设导航电文数据服从平均分布,则帧头同步错误的概率 P_f 为

$$P_f = \frac{1}{2^{M-1}} \quad (2)$$

对于 GPS L1C/A 信号,帧头同步错误的概率为 $1/128$ 。为了降低帧同步错误的概率,通常还会根据每个字的校验结果进行验证。当连续多个字的校验结果异常时即认为帧同步错误,并重新进行帧同步^[9]。

上述处理的具体流程如图 2 所示。

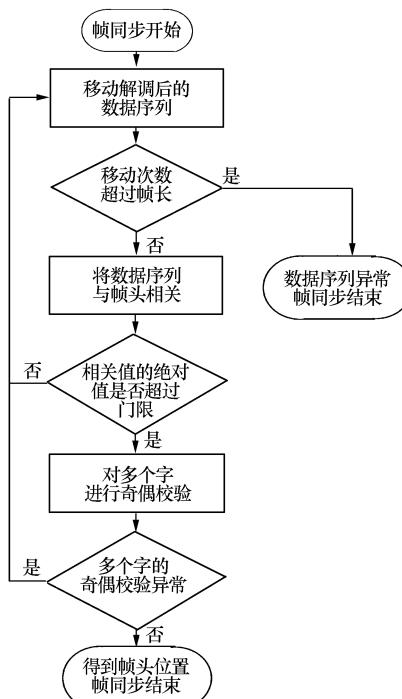


图 2 基于帧头匹配的帧同步算法流程图

2.2 性能评价指标

衡量帧同步算法的性能指标主要包括平均同步时间 T_m 和最长同步时间 T_l 。易知,当不考虑由于电文数据与帧头完全一致所导致的帧同步错误时,基于帧

头匹配的帧同步算法的最长同步时间 T_l 和平均同步时间 T_m 分别为

$$T_l = (N - 1 + M)t_b \quad (3)$$

$$T_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (k + M)t_b = \left(\frac{N-1}{2} + M \right) t_b \quad (4)$$

式中: t_b 表示每比特导航电文数据对应的时长,对于 GPS L1C/A 信号, t_b 为 20 ms。因此,基于帧头匹配的帧同步算法的平均同步时间为 3 150 ms,最长同步时间为 6 140 ms。

3 基于星历匹配的帧同步算法

3.1 算法原理

弹载接收机通常会预先加注星历。GPS L1C/A 的星历数据更新周期通常为 2 h,在更新周期内保持不变^[10-11]。因此,可以将星历数据当作和帧头类似的特征序列与导航电文数据进行匹配,以降低由于帧头间隔时间较长所导致的帧同步时间较长的问题。将导航电文数据与解调后的数据序列进行匹配的方式和式(1)完全相同,只是特征序列的长度以及对应的门限存在差异,这里不再赘述。

假设包括帧头在内所有特征序列的个数为 L ,则基于星历匹配的帧同步算法的处理流程如图 3 所示。

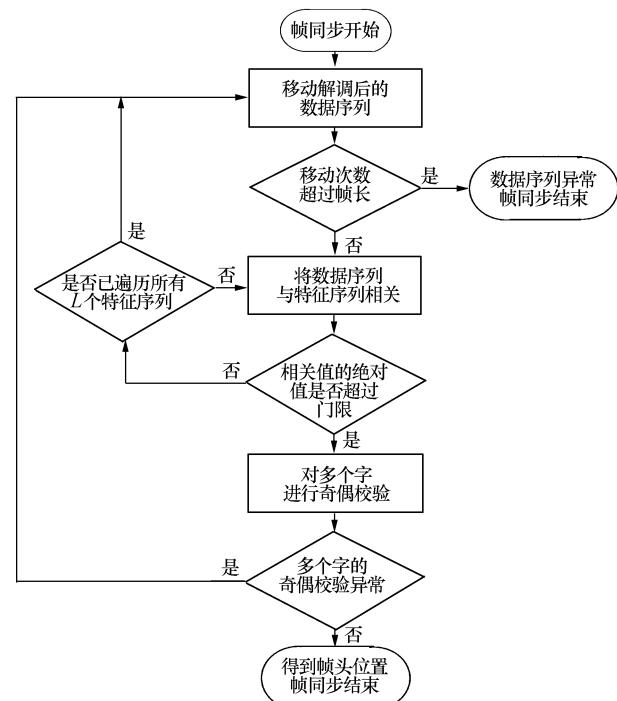


图 3 基于星历匹配的帧同步算法流程图

很显然,特征序列的个数 L 越多,帧同步所需的平均时间也就越短,但同时帧同步的计算复杂度也越高。因此,特征序列的个数必然是帧同步时间和计算复杂度之间的折中。同时,在选择星历数据时,需要遵循如下原则:

1) 尽可能选择比特数较长的星历字段,以降低帧同步错误的概率。

2) 星历字段分布尽可能平均,以减小平均帧同步时间。

按照上述原则,根据 GPS L1C/A 导航电文的具体格式,综合考虑电文同步的计算复杂度,选择如表 2 所示的导航电文字段作为帧同步匹配的特征序列。

表 2 基于星历匹配的电文快速同步算法所选择的特征序列

名称	长度/bit	子帧号	比特序号
帧头	8	1,2,3,4,5	1~8
IODC(L8) + toc	24	1	211~234
Cuc + e(H8)	24	2	151~174
i0(L24)	24	3	151~174

在更新周期内,子帧 1、2、3 播发的导航电文数据完全相同,但是子帧 4、5 将第三数据块分成 25 个页面播发。因此,从计算复杂度的角度出发,并未选择子帧 4 和 5 中的数据作为匹配的特征序列。

3.2 性能分析

当仅有帧头一个特征序列时,特征序列之间的间隔完全相同,因而仅需要知道特征序列的长度 M 和特征序列重复的周期 N 即可完全确定平均同步时间和最长同步时间。但是在增加导航电文数据作为特征序列后,不同特征序列之间的间隔以及特征序列出现的周期不再一致,所以需要每个特征序列具体的分布位置才能确定平均同步时间和最长同步时间。

由于帧头和其他三个特征序列出现的周期不完全一致,为了简化表达式,将表 2 中所选择的特征序列作如下等价转换:(1) 导航电文帧长度定义为 $5N$;(2) 特征序列共八个,包括五个帧头和三个导航电文字段。经过上述等价转换之后,可以得到使用多个特征序列匹配时的帧同步时间。

假设等价转换后的特征序列数量为 L , L 个特征序列总的重复周期为 N_L 个比特数据,每个特征序列的长度分别为 $M_l(1 \leq l \leq L)$,在每个重复周期内的起始位置为 $s_l(1 \leq l \leq L)$,且有 $0 \leq s_l < s_{l+1}$,则帧同步算法的最长同步时间和平均同步时间分别为

$$T_1 = \max_{1 \leq l \leq L} \{ (s_{l+1} - s_l + 1 + M_l) t_b \} \quad (5)$$

$$T_m = \frac{1}{N_L} \sum_{l=1}^L \sum_{k=s_l}^{s_{l+1}-1} (k + M_l) t_b \quad (6)$$

式中: s_{L+1} 定义为 $s_1 + N_L$ 。易知,基于帧头匹配的帧同步算法是上述多特征序列匹配的特例,当 $L=1$, $N_L=N$, $s_1=0$ 时,式(5)和式(6)即退化为式(3)和式(4)。以表 2 中所选择的特征序列为例,其平均同步时间为 2 298 ms,最长同步时间为 6 140 ms。很显然,使用多特征序列匹配之后,平均同步时间缩短了 852 ms,但是由于没有使用子帧 4 和 5 的特征序列进行匹配,无法减小最长同步时间。

3.3 实测验证

下面使用实际的卫星数据进行验证。使用中频数据采集设备保存 1 h 的数据,使用软件接收机解调出原始比特序列。分别使用传统的帧头匹配和星历匹配的算法从不同的数据起始位置进行 1 000 次帧同步,两种算法的同步时间分布直方图如图 4 所示。

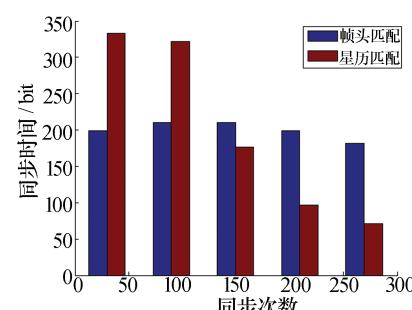


图 4 两种算法帧同步时间的分布直方图

两种算法平均同步时间和最长同步时间的统计结果如表 3 所示。

表 3 基于星历匹配的电文快速同步算法的统计结果 ms

名称	平均同步时间	最长同步时间
帧头匹配	3 054	6 120
星历匹配	2 278	6 120

由表 3 可见,仿真结果跟理论值非常接近,并且相比传统基于帧头匹配的同步算法,使用基于星历匹配可以将平均同步时间减小 776 ms,速度提高约 25%。

4 结束语

本文针对弹载接收机需要减小电文帧同步时间以快速定位的需求,通过分析传统帧同步方法的算法原

理和性能指标,利用提前加注的星历数据,提出了基于星历匹配的电文快速同步算法。理论分析和仿真结果表明:相比传统基于帧头的帧同步算法,本文所提算法可将同步时间缩短约25%,可以在很大程度上缩短弹载接收机的首次定位时间。

参考文献

- [1] 谢钢. 全球导航卫星系统原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
XIE Gang. Principles of global navigation satellite system [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [2] 姜安, 赵航. 导航卫星跟踪体制及精度分析[J]. 现代雷达, 2011, 33(2): 73-77.
JIANG An, ZHAO Hang. Tracking mode and tacking precision analysis of navigation satellite [J]. Modern Radar, 2011, 33(2): 73-77.
- [3] 夏继钢, 汤燕. 应用于卫星导航终端抗窄带干扰的信号加窗方法研究[J]. 现代雷达, 2017, 39(6): 41-45.
XIA Jigang, TANG Yan. A study on the signal windowing method for narrowband interference suppression in satellite navigation terminals[J]. Modern Radar, 2017, 39(6): 41-45.
- [4] 李跃, 邱致和. 导航与定位: 信息化战争的北斗星[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2008.
LI Yue, QIU Zhihe. Navigation and positioning: the big dipper of information warfare [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [5] 秦奋. GPS接收机快速定位技术的研究与应用[D]. 南京: 东南大学, 2009.
QIN Fen. Research and application of gps receiver's fast positioning technology [D]. Nanjing: Southeast University, 2009.
- [6] 叶睿. 北斗导航卫星系统接收机快速启动技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- YE Rui. A study on quick positioning technology in BDS receiver [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [7] Global Positioning System Wing. Navstar GPS space segment/navigation user interface IS-GPS-200 revision E [Z]. [S. l.]: Global Positioning System Wing, 2010.
- [8] KAPLAN E D, HEGARTY C J. GPS原理与应用[M]. 2版. 寇艳红, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
KAPLAN E D, HEGARTY C J. Understanding GPS principles and applications [M]. 2nd ed. KOU Yanhong, translate. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [9] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
XIE Gang. GPS principle and receiver design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [10] 黄丁发, 张勤. 卫星导航定位原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2015.
HUANG Dingfa, ZHANG Qin. Principles of satellite navigation and positioning [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2015.
- [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.
MISRA P, ENGE P. Global positioning system: signals, measurements and performances [M]. 2nd ed. LUO Ming, CAO Chong, XIAO Xiongbing, et al, translate. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.

作者简介:

房晓丽 女, 1985年生, 硕士, 讲师, 研究方向为信号与信息处理、卫星导航定位;

彭晖 男, 1979年生, 博士, 工程师, 研究方向为无线通信技术;

吴礼杰 男, 1985年生, 硕士, 工程师, 研究方向为射频通信技术。