

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.02.013

引用格式:饶爱水,张龙,王振平,等.载波频率号提取算法对箭载 GLONASS 速度计算的影响[J].电讯技术,2015,55(2):187-192. [RAO Aishui, ZHANG Long, WANG Zhenping, et al. Effect of Carrier Frequency Number Picking-up Algorithm on Rocket GLONASS Velocity Calculation[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(2):187-192.]

载波频率号提取算法对箭载 GLONASS 速度计算的影响*

饶爱水**, 张 龙, 王振平, 汪 毅

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘 要:在 GLONASS 测速原理的基础上,研究了载波频率号解算方法对箭载 GLONASS 测速的影响,发现载波频率号解算方法错误将导致测速精度变差,并从理论上分析了载波频率号错误引起的测速精度误差为目标飞行速度的 $1/2850 \sim 1/220$ 倍。设计了 4 种不同的载波频率号解算算法,采用火箭飞行试验数据对算法进行了测试,结果表明,通过卫星数判断载波频率号以及通过保留位判断载波频率号能获得正确结果,直接计算载波频率号以及丢弃保留串无法获取到全部正确结果;通过保留位判断载波频率号的算法具有最小的首次测速时间,比通过卫星数判断载波频率号的算法至少缩短 30 s 以上,载波频率号解算错误引起的测速精度误差与理论值分析基本一致。

关键词:GLONASS; 导航电文; 频道号; 速度精度; 运载火箭; 实时定位

中图分类号:TN967.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)02-0187-06

Effect of Carrier Frequency Number Picking-up Algorithm on Rocket GLONASS Velocity Calculation

RAO Aishui, ZHANG Long, WANG Zhenping, WANG Yi

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: According to the principle of velocity determination using Global Navigation Satellite System (GLONASS), the effect of carrier frequency number picking-up algorithm on rocket GLONASS velocity determination is studied and it is found that the precision of velocity becomes worse if the algorithm of frequency number is inaccurate, and the error of precision caused by inaccurate frequency number is $1/2850$ to $1/220$ of the object's velocity. Four algorithms are designed and tested by using the trial data of rocket launching. The result shows that the the algorithm of calculating carrier frequency number by satellite number and calculating carrier frequency number by reserve bits can acquire an accurate result, and the algorithm of immediately calculating carrier frequency number and abandoning reserve string can acquire an inaccurate result. The algorithm of calculating carrier frequency number by reserve bits has the least time of first velocity measurement, and gets 30 seconds better compared with that of the algorithm of calculating carrier frequency number by satellite number. The error of velocity precision caused by wrong frequency number is consistent with theoretical analysis.

Key words: GLONASS; navigation message; frequency number; precision of velocity; carrier rocket; realtime positioning

* 收稿日期:2014-08-12;修回日期:2014-12-08 Received date:2014-08-12;Revised date:2014-12-08

** 通讯作者:56585972@qq.com Corresponding author:56585972@qq.com

1 引言

GLONASS 卫星采用频分多址的扩频信号,每颗卫星采用不同的载波频率而使用相同的测距码^[1],导航信号在不同的频率上播发使得接收机的设计更为复杂,也带来 GLONASS 测速的新特点。国内外关于导航系统测速的研究主要针对 GPS 测速, GLONASS 测速以及“北斗”测速的相关文献较少。文献[2]研究了利用 GPS 单点测速技术测量海浪的运动速度,文献[3]研究了利用差分测速和 Kalman 滤波估计相位变率方法解算飞机飞行速度,文献[4]研究了利用自适应滤波方法减少影响 GPS 测速误差的方法,文献[5]分析了利用载波相位变率实时 GPS 测速的误差来源及其对测速的影响,文献[6]分析了多路径效应对实时动态精密单点定位的影响,文献[7]分析了多普勒对 GPS 测速的影响,文献[8]利用“北斗”实测多普勒观测量对其测速精度进行了初步探讨,文献[9]研究了箭载 GLONASS 单点定位的速度精度。本文研究 GLONASS 测速时载波频率号对高速运动目标测速的影响。

2 载波频率号参数介绍

GLONASS 导航电文由一个超帧组成,每个超帧由 5 个帧组成,每个帧由 15 个串组成,含有 24 颗 GLONASS 卫星历书的全部内容,如图 1 所示。每个帧传送内容为 GLONASS 卫星的部分实时数据和给

定的全部非实时数据。在帧结构上,第 1~4 帧相同,第 5 帧含有 2 个保留串。

L1 载波和 L2 载波频率标称值(单位 MHz)由如下表达式确定:

$$\begin{cases} f_{k1}=1602+0.5625K \\ f_{k2}=1246+0.4375K \end{cases} \quad (1)$$

对于任何特定的 GLONASS 卫星,频道号 K 通过历书中的载波频率号 H_n^A 计算得到,2005 年以后发射的 GLONASS 卫星的 K 取值为 $[-7,+6]$ 。根据导航卫星测速原理,当接收机测得卫星信号多普勒频移 f_d 后,可计算得出伪距变化率 $\dot{\rho}^k$ 为

$$\dot{\rho}^k=-\frac{c}{f_k}f_d \quad (2)$$

式中, c 为光速, f_k 为卫星的载波频率。联合公式(1)和公式(2),可知频道号 K 的计算结果对 GLONASS 测速结果具有重要影响。

频道号 K 与历书参数载波频率号 H_n^A 之间的关系如公式(3)所示:

$$K=\begin{cases} H_n^A, H_n^A\leq 24 \\ H_n^A-32, H_n^A>24 \end{cases} \quad (3)$$

H_n^A 位于前 4 帧的第 7、9、11、13、15 串的第 14~10 位,第 5 帧的第 7、9、11、13 串的第 14~10 位,第 5 帧的第 15 串不传输历书数据,因此为了准确获取 H_n^A 值,需要提供第 5 帧的第 14 串和第 15 串(本文称保留串)的判断方法。

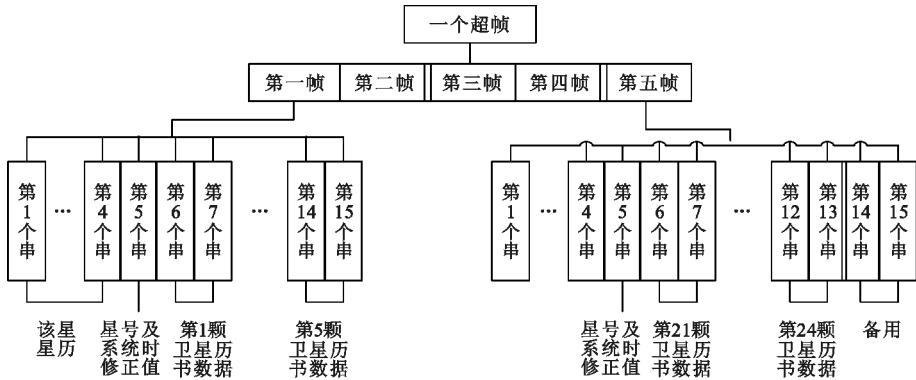


图 1 GLONASS 导航电文结构
Fig. 1 Navigation message structure of GLONASS

3 载波频率号算法设计及结果

根据 GLONASS ICD 文件规定,实时数据 P3 标识本帧内传送卫星历书的卫星数标志,“1”标识 5 颗卫星,“0”表示 4 颗卫星,P3 位于每帧电文第 3 串

的第 80 位,据此可以得出计算载波频率号 H_n^A 的处理算法,本文称全帧积累算法,如图 2 所示。当电文串号 m 为 7、9、11、13 时,需要首先判断 $(m-1)$ 串是否积累完毕,从中计算卫星号 n^A (位于第 77~73

位),然后再从 m 串中计算得到 H_n^A 值,形成 $(n^A、H_n^A)$ 配对表;当电文串号 m 为 15 时,首先要获取第 3 串中的 $P3$ 值,为此需要积累本帧全部 15 串的数据,当 $P3$ 值为 1 时再计算 $(n^A、H_n^A)$ 的值。

保留串的存在,导致通过 $P3$ 计算载波频率号的方法耗时较长,原因是需要积累一个完整的电文帧(共 15 串)才能确保 $P3$ 值与第 14、15 串的值相匹配,至少需要积累 30 s。该算法能获得正确的 $(n^A、H_n^A)$ 配对表值,如表 1 所示。

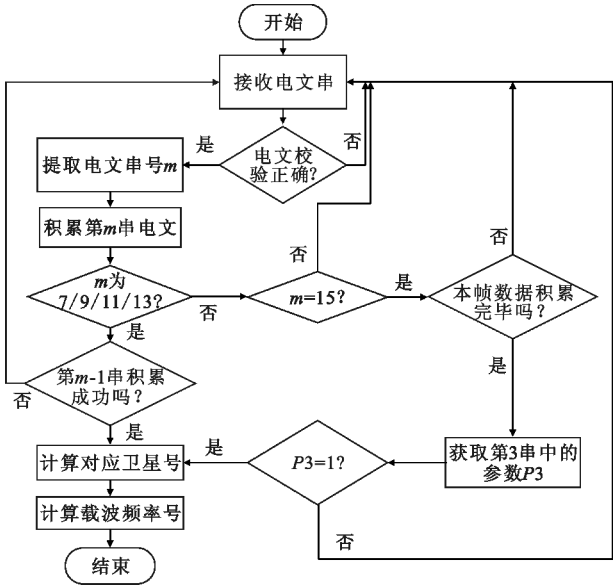


图 2 通过卫星数判断载波频率号
Fig. 2 Calculating carrier frequency number by satellite number

表 1 卫星号与载波频率号配对表			
Table 1 Counterpart table of satellite number and carrier frequency number			
卫星号	载波频率号	卫星号	载波频率号
1	1	13	30
2	28	14	25
3	5	15	0
4	6	16	31
5	1	17	4
6	28	18	29
7	5	19	3
8	6	20	2
9	30	21	4
10	25	22	29
11	0	23	3
12	31	24	2

为了快速获得(卫星号、载波频率号)配对表,一种退化的算法是直接计算载波频率号,把第 5 帧

的第 14、15 串数据当做正常数据处理,其算法流程如图 3(a)所示,显然这种算法获得的载波频率号存在错误值;另一种保守的算法是丢弃第 14、15 串的数据(包括前 4 帧),只处理第 6~13 串中的数据,其算法流程如图 3(b)所示,根据 GLONASS ICD 文件说明,GLONASS 历书在超帧内的排列如表 2 所示,这种方法将无法获取第 5、10、15、20 号卫星的载波频率号。

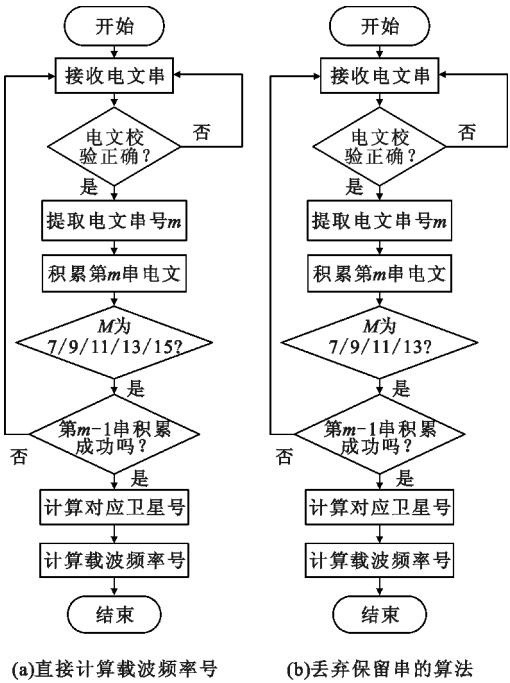


图 3 错误的载波频率号计算算法
Fig. 3 Inaccurate calculation algorithm of carrier frequency number

表 2 GONASS 历书在超帧内的排列	
Table 2 Arrangement of GLONASS almanac within superframe	
帧序号	卫星编号
1	1 ~ 5
2	6 ~ 10
3	11 ~ 15
4	16 ~ 20
5	21 ~ 24

通过观测保留的第 14、15 串的定义以及实际测量数据的分析,发现第 15 串的低数据位都为 0,而非保留串的第 15 串的低数据位不为 0,因此可以通过第 15 串的低位数据是否为 0 判断保留串,算法如图 4 所示。该算法与图 2 的算法类似,但由于无需积累完整一帧数据而具有较快的速度。

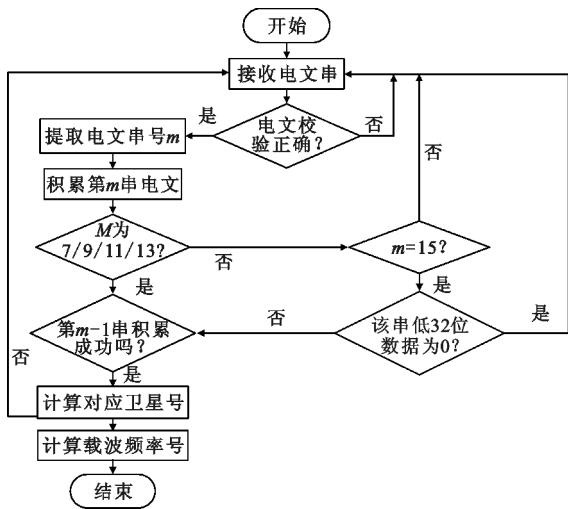


图4 通过保留位判断载波频率号

Fig. 4 Calculating carrier frequency number by reserve bits

通过复演某次火箭飞行任务数据,得出图2和图4两种算法计算载波频道号的时间曲线图,如图5所示。从图中可看出通过保留位判断载波频率号的算法可提前38 s计算出数据,对于短弧段实时测控任务,尽量缩短首次定位时间非常重要。

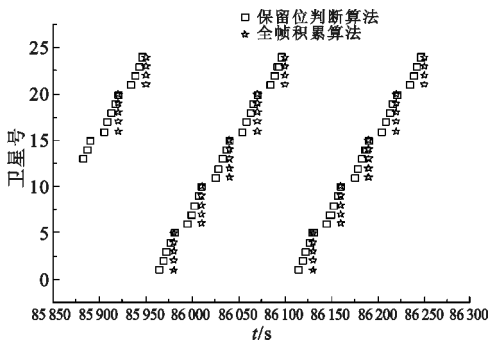


图5 两种载波频率号计算算法时间比较

Fig. 5 Time comparison between two carrier frequency number algorithms

4 载波频率号对速度精度的影响分析

4.1 速度误差理论分析

为考察载波频率号计算对速度精度的影响,公式(2)对 f_k 进行微分,得到

$$d\rho^k = -\frac{df_k}{f_k} \cdot \rho^k. \tag{4}$$

对于L1载波, f_k 近似取值为1602 MHz, df_k 近似取值为 $(0.5625 \sim 0.5625 \times 13)$ MHz, ρ^k 近似为目标运行的速度 V ,可以估算得出

$$\frac{1}{2850}V < d\rho^k < \frac{1}{220}V. \tag{5}$$

公式(5)即为载波频率号计算错误引起的速度误差值,对速度达几千米每秒的高速飞行器,最大可引起几十米每秒的误差,远超出试验任务要求的精度误差范围。

4.2 速度精度计算方法

采用伪距单点定位的最小二乘法,根据定位原理,有速度方程

$$V = AX - L. \tag{6}$$

式中, V 为速度测量噪声向量,矩阵 A 为方向余弦矩阵, X 为速度和钟差变化率向量, L 为速度观测向量。根据最小二乘法的内符合精度估计公式,下面估算定位结果的精度^[6]。

(1) 伪距观测值的均方根差

$$\sigma_0 = \pm \sqrt{\frac{V^T V}{n-4}} = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-4}}. \tag{7}$$

式中, $[vv]$ 为残差 V 的平方和, n 为观察到的卫星个数。

(2) 未知数 X 的权逆矩阵 Q_{xx}

$$Q_{xx} = (A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & Q_{34} \\ Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} & Q_{44} \end{bmatrix}, \tag{8}$$

可得定位精度 σ_p 为

$$\sigma_p = \pm \sigma_0 \sqrt{(Q_{11} + Q_{22} + Q_{33})}. \tag{9}$$

根据公式(9),在定位计算时可一并获取到对应的速度精度。

4.3 实际计算结果

为估计载波频率号计算错误对速度精度的影响,在GNSS弹道计算软件中实现直接解算载波频率号算法(图3(a)算法),通过复演某次火箭飞行试验数据,采用公式(9)估计GLONASS弹道精度,得到弹道精度曲线如图6所示。从图中可以看出引起的弹道精度误差在15~50 m/s之间,且精度误差随火箭运行速度增大而变大。分析该算法获取的8号卫星载波频率号有两个值,即6和0,0为获取到的错误值;该弧段内,火箭的飞行速度为7400~9400 m/s,根据公式(4), df_k 取值为 (0.5625×6) MHz,可估算出由于载波频率号导致的速度精度误差最小值为15.6 m/s;根据公式(5),可估算出速度精度误差最大值为42.9 m/s,理论分析与实际计算结果数据比较吻合。

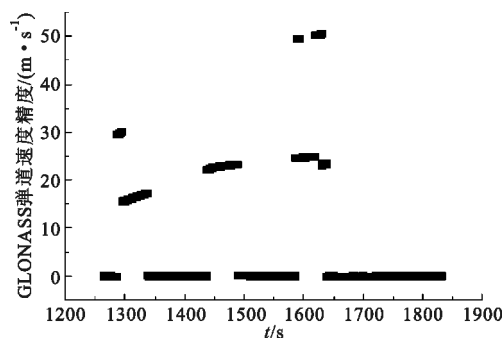


图 6 错误算法获取的 GLONASS 弹道速度精度曲线
Fig. 6 Curve of velocity precision of GLONASS trajectory calculated by inaccurate algorithm

采用图 4 通过保留位判断载波频率号的算法,估计该任务弧段 GLONASS 弹道精度,结果如图 7 所示。从图中可知,GLONASS 弹道精度绝大部分在 0.1 m/s 以下,最大值在 0.25 m/s 左右,能够满足火箭飞行试验任务对速度精度计算的要求。

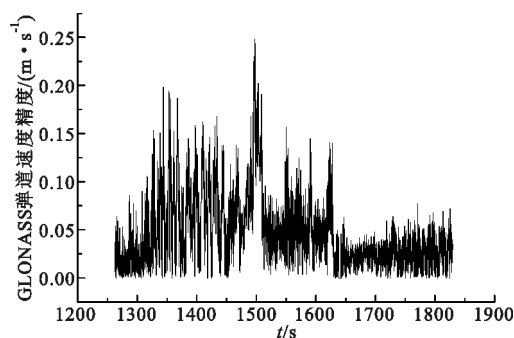


图 7 正确算法获取的 GLONASS 弹道速度精度
Fig. 7 Curve of velocity precision of GLONASS trajectory calculated by accurate algorithm

5 结束语

随着导航系统的发展, GPS、GLONASS、“北斗”等导航系统用于测速服务的应用越来越普遍,不同导航系统对目标测速的影响因素多有不同。本文针对 GLONASS 测速问题,分析了载波频率号计算对测速的影响;在给出的 4 种载波频率号提取算法中,直接计算载波频率号算法获得错误的频率号,导致速度精度跳变,引起速度精度误差为目标飞行速度的 $1/2850 \sim 1/220$;丢弃保留串算法无法获取第 5、10、15、20 号卫星的载波频率号,引起速度精度误差与直接计算载波频率号算法相同;通过卫星数判断载波频率号算法需要积累完整的电文帧,首次测速时间延长;而通过保留位判断载波频率号算法具有最小首次测速时间,缩短 30 s 以上。因此,通过保留

位判断载波频率号算法具有最优的性能。

参考文献:

- [1] 刘基余. GLONASS 现代化的启迪[J]. 遥测遥控, 2010, 31(5): 2-6.
LIU Jiyu. Some Enlightenment from GLONASS Modernization [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2010, 31(5): 2-6. (in Chinese)
- [2] SHAN Rui, LIU Yanxiong, ZHAO Tiehu, et al. Research of the wave measurement using GPS absolute velocity estimation technology [J]. Marine Science Bulletin, 2013, 15(2): 59-70.
- [3] 田良辉, 刘根友, 郭爱智. Kalman 滤波估计 GPS 载波相位变率的测速方法与实现[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(1): 72-77.
TIAN Lianghui, LIU Genyou, GUO Aizhi. Method of Velocity measurement By GPS Carrier Phaserate Estimated From Kalman Filter and Its Implement [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(1): 72-77. (in Chinese)
- [4] 仇立成, 祝程程. 自适应滤波在 GPS 测速中的应用[J]. 全球定位系统, 2013, 38(1): 15-17.
QIU Licheng, ZHU Chengcheng. The Application of Adaptive Filter in Velocity Measurement with GPS [J]. GNSS World of China, 2013, 38(1): 15-17. (in Chinese)
- [5] 郭爱智, 王勇, 刘根友, 等. 高频 GPS 实时单点测速误差分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(5): 34-38.
GUO Aizhi, WANG Yong, LIU Genyou, et al. Error Analysis of High-Rate GPS Data Real Time Single-Point Velocity-Determination [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(5): 34-38. (in Chinese)
- [6] 万胜辉, 杨遵龙, 苏尧. 实时动态精密单点定位中的多路径效应削弱方法[J]. 电讯技术, 2013, 53(3): 312-317.
WAN Shenghui, YANG Zunlong, SU Yan. Mitigation of Multipath Effects in Real time Kinematic Precise Point Positioning [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(3): 312-317. (in Chinese)
- [7] Zhang J. Short note: On the relativistic Doppler effect for precise velocity determination using GPS [J]. Journal of Geodesy, 2006, 80(2): 104-110.
- [8] 王拓, 吕志伟, 殷实. “北斗”多普勒测速精度的分析[J]. 测绘信息与工程, 2012, 37(2): 16-19.
WANG Tuo, LYU Zhiwei, YIN Shi, et al. Preliminary Accuracy Analysis on Velocity Determination Using COMPASS Doppler Measurements [J]. Journal of Geomatics, 2012, 37(2): 16-19. (in Chinese)
- [9] 赵树强, 许爱华, 王家松, 等. 箭载 GLONASS 弹道确定及精度分析[J]. 宇航动力学学报, 2012, 2(2): 27-31.
ZHAO Shuqiang, XU Aihua, WANG Jiasong, et al. Rocket

Trajectory Determination and Precision Analysis Using On-Board GLONASS Data Processing [J]. Journal of Astrodynamics, 2012, 2(2): 27-31. (in Chinese)

作者简介:



饶爱水(1979—),男,江西临川人,2002年于中国科技大学获学士学位,现为工程师,主要研究方向为卫星导航定位技术;

RAO Aishui was born in Linchuan, Jiangxi Province, in 1979. He received the B. S. degree from University of Science and Technology of China in 2002. He is now an engineer. His research concerns satellite navigation positioning.

Email: 56585972@ qq. com

张 龙(1984—),男,河南漯河人,2007年于中国科技大学获学士学位,现为工程师,主要研究方向为测控软件技术;

ZHANG Long was born in Luohe, Henan Province, in 1984. He received the B. S. degree from University of Science and Technology of China in 2007. He is now an engineer. His research concerns TT&C software.

王振平(1981—),女,山东临清人,2007年于苏州大学获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为测控软件技术;

WANG Zhenping was born in Linqing, Shandong Province, in 1981. She received the M. S. degree from SooChow University in 2007. She is now an engineer. Her research concerns TT&C software.

Email: prettyicecream@ 163. com

汪 毅(1985—),男,安徽东至人,2008年于装备学院获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为测控软件技术。

WANG Yi was born in Dongzhi, Anhui Province, in 1985. He received the M. S. degree from Academy of Equipment in 2008. He is now an engineer. His research concerns TT&C software.