

GPS 接收机模糊搜索粗时定位方法*

靖守让, 刘文祥, 吴鹏, 孙广富

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 由于难以获得免时定位算法所需的接收机概略位置, 提出模糊搜索的粗时定位方法。为减小搜索空间, 在位同步后优选几何精度因子值较好的 4 颗卫星通过遍历伪距模糊的方式进行位置估计, 并基于伪距残余均方根最小准则选出最合理的位置估算结果。根据概略位置恢复所有卫星的完整伪距。利用 5 状态的免时定位算法估计接收机位置。使用 11 个国际卫星导航服务观测站的观测数据对算法进行验证, 结果表明, 在概略位置未知情况下该方法能够实现粗时定位, 且定位精度与直接使用完整伪距的精时最小二乘定位精度相当。

关键词: 伪距残余检验; 免时定位; 位同步; 全球定位系统

中图分类号: TN967.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2015)03-034-05

A coarse-time GPS positioning algorithm with ambiguity search

JING Shourang, LIU Wenxiang, WU Peng, SUN Guangfu

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Because it is difficult to obtain the priori position for time-free positioning algorithm, the coarse-time GPS (Global Positioning System) positioning algorithm with ambiguity search was proposed. Four satellites, which are the most reasonable combinations based on minimum root mean square of residuals criterion, were selected for coarse positioning by iterating through all combinations of integer ambiguity. The full pseudoranges of all satellites were constructed based on the priori position. The position was estimated using time-free positioning algorithm. The performance of the proposed method was verified by using the observation data of 11 IGS (International GNSS Service) stations. This method can achieve coarse-time GPS positioning even if the priori position is unknown, and provides comparable positioning results as compared with the traditional precise-time positioning.

Key words: pseudorange residuals test; time-free positioning; bit synchronization; GPS

全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 能提供全球范围内的定位服务。传统 GPS 接收机为实现定位需要通过信号捕获、信号跟踪、位同步、帧同步以及定位解算等几个步骤^[1]。信号捕获和跟踪后用户可以获得码相位测量值; 位同步后能够获得 20ms 内的伪距值, 帧同步后能够获取完整的信号发射时间。GPS 卫星的伪距变化率最大值约为 800m/s, 因此利用优于 10ms 的时间精度计算卫星位置产生的伪距偏差小于 8m。对于标准单点定位的首次定位而言, 这通常是可以接受的, 因此通常将 10ms 作为导航定位时的时间精度界限。一般将接收机时间精度优于 10ms 的定位称为精时定位, 相反称为粗时定位^[2]。传统接收机通常在完成帧同步后获得精确时间。但是帧同步一般需要经历 1~2 帧电文,

对 GPS L1 C/A 信号为 6~12s。同时在弱信号等恶劣条件下, 由于解调电文数据的比特误码, 可能导致迟迟不能实现帧同步。

为提高首次定位时间, Peterson 等在文献[3]中针对粗时定位问题首次提出了 5 状态方程。van Diggelen 对粗时定位算法进行了详细描述, 并针对文献[3]方法中共有偏差引起的毫秒翻转误差问题提出了用于解决毫秒整数模糊问题的 van Diggelen 技术^[4]。van Diggelen 技术能有效解决毫秒整数模糊问题, 但是免时定位算法要求用户概略位置和粗略时间对伪距影响小于 150km。因此针对 GPS 的粗时定位算法的研究主要集中在概略位置获取上。文献[5]在概略位置未知的情况下采用格网搜索的方法实现接收机定位, 但是由于待搜索空间较大, 导致计算量太大。文献

* 收稿日期: 2015-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61403413)

作者简介: 靖守让 (1987—), 男, 江苏徐州人, 博士研究生, E-mail: hanchongjsr@163.com;

孙广富 (通信作者), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, E-mail: sunguangfu_nnc@163.com

[6]对联合多普勒的粗时定位方法进行了研究,即利用多普勒观测值估算接收机概略位置后使用免时定位方法进行定位。但是该方法适用于静止或者低动态用户,否则将导致多普勒定位误差超出毫秒整数模糊度恢复约束。文献[7]通过时间搜索的方法将时间精度要求扩展到12h,并针对多普勒定位结果不可靠时提出了模糊搜索的方法,从而扩展联合多普勒定位对用户速度的限制。但是该方法没有从根本上解决多普勒定位对用户速度约束的局限性问题,同时极大地增加计算量。文献[8]为减小搜索空间,针对地表用户从时间维进行搜索,但是需要微秒级的高精度的时钟辅助。上述方法均针对码捕获阶段展开讨论,而随着技术的发展,即使在弱信号环境下,仍能实现接近100%的信号位同步^[9]。

1 基于伪距残余检验的粗时定位方法

1.1 概略位置计算

非辅助的传统GPS接收机需要经过码捕获、相位锁定、位同步、帧同步等阶段后才能通过电文获取周内秒时间(Time of Week, TOW),从而获得信号发射时刻^[10]。在位同步后能够获得亚20mm的伪距值。因此在实现位同步后,第*i*颗卫星的伪距可以表示为:

$$\begin{aligned} \rho_i &= r_i(t_i^s, t^r) + t_d^r + \Delta r(\delta t^r) \\ &= N_{i,20\text{ms}} \cdot L_{20\text{ms}} + \rho_{i,20\text{ms}}^{\text{frea}} + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (1)$$

其中: ρ_i 表示伪距值; t^r 为本地时间; t_i^s 为由本地时间计算的信号发射时间; $r_i(t_i^s, t^r)$ 表示 t_i^s 时刻计算得到的卫星*i*的位置在 t^r 时刻用户位置的空间距离; t_d^r 为接收机钟差,单位为m; δt^r 表示本地时间的绝对偏差; $\Delta r(\delta t^r)$ 表示由于本地时间不准确,计算卫星位置偏差引起的空间距离误差; ε_i 表示误差项; $N_{i,20\text{ms}}$ 表示20ms的伪距模糊度; $L_{20\text{ms}}$ 为20ms距离,约为6000km; $\rho_{i,20\text{ms}}^{\text{frea}}$ 表示亚20ms伪距测量值。

各颗可见的GPS卫星离地面上接收机的距离互不相等,最短的距离约为20192km,最长的距离可达25785km。卫星的传播时间分布在67~86ms之间^[11]。由于信号在位同步后能够得到亚20ms伪距。因此,在位同步后可以构建伪距模糊组合用于解算初值,并根据定位后的伪距残余选择最合理的伪距模糊组合和粗定位结果用于后续的免时定位。位同步后的伪距模糊组合可以采用如下两种方式构建:各卫星模糊互相独立,模糊值只有2种,同时各卫星模糊度相同时认为

是同一种情况;以某颗卫星为基准,其他卫星模糊度变为3种情况。在无其他约束情况下,两种方法构建伪距模糊组合的个数与卫星数的关系见表1。

表1 伪距模糊组合数与卫星数关系

Tab.1 Relationship between number of satellites and number of ambiguity combination

构建方式	卫星数					
	1	2	3	4	...	<i>n</i>
方法1	1	3	7	15	...	$2^n - 1$
方法2	1	3	9	27	...	$3^{(n-1)}$

由于对地面用户,卫星的传播时间分布在67~86ms之间,即任意两颗卫星间的伪距差值小于20ms。因此,在增加伪距之差小于20ms约束后,能够有效剔除不合理组合。

假设*n*颗卫星的亚20ms伪距从大到小排列的组合为 $[\rho_{1,20\text{ms}}^{\text{frea}}, \rho_{2,20\text{ms}}^{\text{frea}}, \dots, \rho_{n,20\text{ms}}^{\text{frea}}]$,则在伪距之差小于20ms约束的前提下模糊组合形式为 $[\underbrace{k, \dots, k}_l, \underbrace{k+1, \dots, k+1}_{n-l}]$, $l=1, \dots, n-1$ 。否则伪距之差会出现超出20ms的情况。因此在增加20ms约束后采用上述两种方法遍历伪距模糊获得的有效组合数相等,且均等于卫星数。

通常而言,对于采用实时时钟(Real Time Clock, RTC)提供时间保持的接收机能够在几周内保持本地时间精度在数秒以内^[12]。而GPS卫星伪距变化率的最大值约为800m/s。因此,当本地时间精度保持在数秒,即使在最差情况下,由卫星位置计算引起的伪距误差也仅为数千米,远小于20ms模糊错误(甚至码捕获后的毫秒整数模糊)带来的误差。因此可以忽略式(1)中 $\Delta r(t_i^s, t_{0,i}^r)$ 直接进行最小二乘解算,在正确的模糊组合下定位后的伪距残余会小于存在模糊错误的伪距残余。对于给定的 $N_{i,20\text{ms}}$,式(1)可以写为如式(2)的形式,此方程与传统的卫星观测方程一致,可以直接使用最小二乘迭代解算用户位置。

$$\rho_i = r_i(t_i^s, t^r) + t_d^r = N_{i,20\text{ms}} \cdot L_{20\text{ms}} + \rho_{i,20\text{ms}}^{\text{frea}} \quad (2)$$

由于随着卫星数的增加伪距模糊组合数也逐渐增加,为了减小计算量,可以采用在*n*颗卫星中选出*m*颗卫星进行粗定位获取概略位置和正确的伪距模糊组合。同时由于本地时间不准确,导致计算卫星位置出现偏差,即使在正确的伪距模糊组合时仍存在数百甚至数千米的误差。因此在选取*m*颗卫星时,可以选择几何精度因子(Geometric Dilution Of Precision, GDOP)较小的星

座组合。通常选择 4 颗卫星即可估计出用户的概略位置。

定位后,卫星的伪距残差可以通过式(3)计算,其中 $\text{mod}(\cdot)$ 表示取模操作。

$$\rho_{i,residual} = \text{mod}(r_i(t_i^s, t^r) + t_d^r - \rho_{i,20ms}^{frea}, L_{20ms}) \quad (3)$$

当本地时间偏差较小时,卫星位置计算误差造成的影响远小于伪距模糊错误带来的影响。正确的伪距模糊的定位误差较小,计算得到的模糊伪距内残余也会相对较小。因此,计算用户概略位置和模糊组合的具体步骤为:

- 1) 在 n 颗卫星中选择 m 颗 GDOP 较好的卫星;
- 2) 构建 m 颗卫星的伪距模糊组合,遍历所有有效组合并进行最小二乘解算,计算用户位置和 m 颗卫星的伪距残余;
- 3) 根据每次的定位结果,计算其他 $n - m$ 颗卫星的 20ms 模糊以及伪距残余;
- 4) 结合步骤 2、步骤 3 获取的 n 颗卫星伪距残余,计算 n 颗卫星伪距残余均方根 (Root Mean Square, RMS)。并以伪距残余均方根最小为准则选出最合理的伪距模糊组合和用户概略位置。

以国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 组织的 mars 测站 L1 频点数据进行分析实验。某一时刻观测到 7 颗卫星,星空图如图 1 所示。

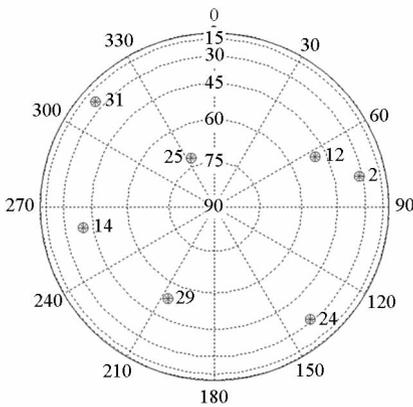


图 1 可视卫星的星空图

Fig. 1 Sky charts of visual satellite

选取 4 颗卫星计算概略位置时,20ms 模糊组合仅包含以下四种情况: $[3, 3, 3, 3]$, $[3, 3, 3, 4]$, $[3, 3, 4, 4]$, $[3, 4, 4, 4]$ 。其中组合 1 为正确情况。本算例中选择出的 4 颗卫星为 2, 24, 25, 31。并分别拉偏本地时间从 0s 到 10s,解算后得到的伪距残差均方根见表 2。

由表 2 可知,钟差偏差较小时由正确的伪距模糊组合解算得到的伪距残余均方根明显小于错

误情况。其中钟差为 0 时伪距残余均方根仍较大是由于在粗解算时未对电离层延迟、对流层延迟等误差项进行修正,仅对对定位影响较大的卫星钟差进行了修正。

表 2 不同模糊组合下的伪距残余均方根

Tab. 2 RMS of pseudorange residual under different ambiguity combination

钟差 / s	组合编号			
	1	2	3	4
0.0	8.24	1.60E+6	1.42E+6	9.95E+5
1.0	398.20	1.60E+6	1.42E+6	9.95E+5
2.0	801.51	1.60E+6	1.42E+6	9.95E+5
3.0	1.20E+3	1.60E+6	1.42E+6	9.95E+5
4.0	1.60E+3	1.60E+6	1.42E+6	9.94E+5
5.0	2.01E+3	1.60E+6	1.42E+6	9.94E+5
6.0	2.41E+3	1.60E+6	1.42E+6	9.94E+5
7.0	2.81E+3	1.60E+6	1.42E+6	9.94E+5
8.0	3.21E+3	1.60E+6	1.42E+6	9.94E+5
9.0	3.62E+3	1.60E+6	1.42E+6	9.94E+5
10.0	4.02E+3	1.60E+6	1.42E+6	9.93E+5

1.2 免时定位方法

当获取用户概略位置和成功恢复各卫星的模糊组合后,式(1)中未知变量仅包含三维用户位置、接收机钟差以及接收机绝对时间偏差。因此可以使用免时定位算法解算用户位置和时间偏差。免时定位算法的矩阵方程可以表示为:

$$\Delta \rho = \begin{bmatrix} -l_x^{(1)} & -l_y^{(1)} & -l_z^{(1)} & 1 & v^{(1)} \\ -l_x^{(2)} & -l_y^{(2)} & -l_z^{(2)} & 1 & v^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -l_x^{(n)} & -l_y^{(n)} & -l_z^{(n)} & 1 & v^{(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t_d^r \\ \Delta \delta t^r \end{bmatrix}$$

其中: $l_x^{(i)}, l_y^{(i)}, l_z^{(i)}$ 分别为接收机到卫星 i 的单位向量在地心地固 (Earth Centered Earth Fixed, ECEF) 坐标系下各坐标轴上的投影; $v^{(i)}$ 为卫星速度在视线矢量上的投影。

由于免时定位算法存在 5 个未知量,因此至少使用 5 颗卫星信息对未知量进行估计。而在本地时间偏差较大时,使用该方法进行粗定位也可能选择错误的伪距模糊组合。因此,为保证最终定位结果的可靠性,在无法确定本地时间精度范围的情况下,至少需要 6 颗卫星进行后续的免时定位解算。而且卫星数越多,基于伪距残余最小

准则获取的伪距模糊组合的可靠性越高。表3给出了mars站在本地时间存在不同偏差的情况下,分别使用5颗星和6颗星进行定位的定位误差以及定位后的伪距残余均方根。

表3 不同卫星数时定位结果

Tab.3 Position results with different number of satellites

本地时间 偏差 / s	定位误差 / m		伪距残余 RMS / m	
	5 颗星	6 颗星	5 颗星	6 颗星
600	5.44	14.32	4.78E-9	0.75
1200	7.26E+6	14.32	8.94E-9	0.75
2400	4.56E+6	4.04E+6	3.00E-9	3.15E+5

由表3可知,使用6颗星进行定位时,在定位误差较大时伪距残余RMS值同样比较大,能够通过伪距残余RMS值识别定位是否成功。而5颗星时无论定位是否成功,定位后的伪距残余RMS值均很小。无法通过最终的伪距残余RMS值判断最终的定位结果是否正常。

2 实验与分析

GPS卫星的轨道运行周期为11h58min,星座分布的重复周期为1d^[13]。因此利用1d时长的GPS观测数据进行仿真实验。使用IGS提供的2014年12月31日11个测站观测数据进行后续分析实验,其中测站分布如图2所示。

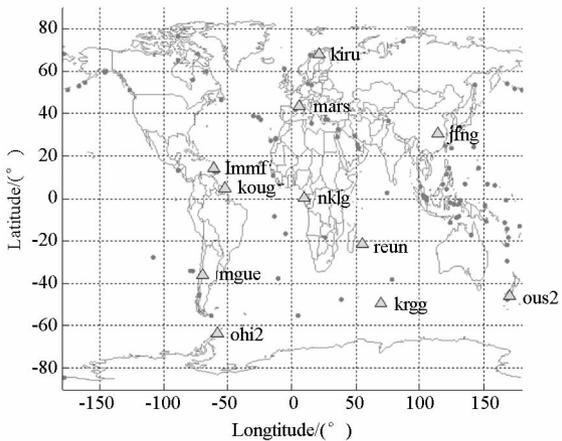


图2 11个IGS测站分布图

Fig.2 Distribution of 11 IGS stations

在时间拉偏10s的情况下,利用mars测站L1观测数据,把该粗时定位方法和完整伪距的精时定位方法的误差进行对比,其可视卫星数如图3所示。

由图3可知,粗时定位精度在绝大多数时间与使用完整伪距的精时定位相当,少部分时间粗

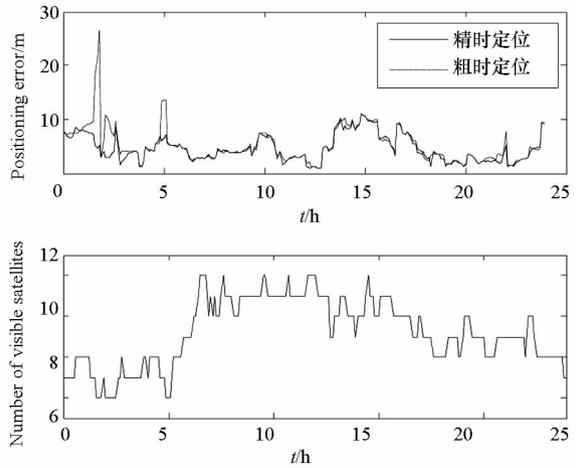


图3 粗时定位和精时定位结果

Fig.3 Result of coarse-time position and precise-time position

时定位精度比精时定位精度略差。这是由于免时定位算法存在5维未知量,因此在卫星数较少的情况下通过免时定位算法迭代获得的本地时间偏差 $\delta t'$ 出现误差从而导致定位精度略差。

11个测站的定位误差统计结果见表4,其中水平误差和垂直误差均指95%的可能性误差。由表4可知,在概略位置未知时,使用模糊搜索方法能够实现GPS接收机粗时定位,且定位精度与直接使用完整伪距的定位精度相当。

表4 定位误差统计结果

Tab.4 The positioning error statistical results

测站	水平误差 / m		垂直误差 / m	
	粗时定位	精时定位	粗时定位	精时定位
mars	6.21	4.78	9.12	8.46
jfng	11.86	11.47	7.41	8.26
kiru	4.44	4.12	9.01	9.47
koug	8.81	8.40	8.27	8.03
krgg	5.38	5.04	7.12	6.23
lmmf	10.85	10.30	11.09	10.93
mgue	4.91	5.01	10.77	10.41
nklg	5.34	5.17	8.68	8.77
ohi2	4.66	4.26	8.37	8.16
ous2	4.17	3.56	5.77	5.48
reun	6.09	5.40	10.59	9.71

3 结论

论文提出基于伪距残余检验的粗时定位方

法,通过伪距残余最小均方根准则获取概略位置和卫星之间的相对伪距。能够在概略位置完全未知的情况下结合免时定位算法计算得到用户准确位置。详细描述了伪距残余最小均方根准则下的概略位置计算流程和免时定位方法,并使用 IGS 的 11 个测站数据验证了方法的有效性。同时统计结果表明提出的粗时定位方法的定位精度与使用完整伪距信息的定位精度相当。

提出的基于伪距残余检验的 GPS 接收机粗时定位方法同样适用码捕获后仅获取亚毫米伪距情况。在此种情况下,随着卫星数增加,搜索空间将急剧增大。可以采用高程或高精度时钟辅助等手段减小粗定位时卫星数需求,从而缩小模糊搜索空间。

参考文献 (References)

- [1] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: principles and applications [M]. 2nd ed. USA: Artech House, 2006.
- [2] Van Diggelen F. A-GPS: assisted GPS, GNSS, and SBAS [M]. USA: Artech House, 2009.
- [3] Peterson B, Hartnett R, Ottoman G. GPS Receiver structures for the urban canyon [C]// Proceedings of the 8th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 1995: 1323 - 1332.
- [4] Van Diggelen F. Method and apparatus for time-free processing of GPS signals [P]. US Patent 6417801, July 9, 2002.
- [5] Sirola N. Exhaustive global grid search in computing receiver position from modular satellite range measurements [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2006, 52(1): 73 - 82.
- [6] Othieno N, Gleason S. Combined Doppler and time free positioning technique for low dynamics receivers [C]// Proceedings of IEEE ION Position Location and Navigation Symposium, 2012: 60 - 65.
- [7] Chen H W, Wang H S, Chiang Y T, et al. A new coarse-time GPS positioning algorithm using combined Doppler and code-phase measurements [J]. GPS Solutions, 2014, 18(4): 541 - 551.
- [8] Wu P, Jing S R, Liu W X, et al. A quick location method for high dynamic GNSS receiver based on time assistance [J]. International Journal of Computers Communications & Control, 2013, 8(5): 768 - 773.
- [9] Ren T T, Petovello M. An analysis of maximum likelihood estimation method for bit synchronization and decoding of GPS L1 C/A signals [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2014: 3.
- [10] Lannelongue S, Pablos P. Fast acquisition techniques for GPS receivers [C]// Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Institute of Navigation, 1998: 261 - 269.
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] 陈亮, 咸德勇, 刘思慧, 等. 一种新型高精度低功耗守时芯片 [J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(3): 176 - 180.
CHEN Liang, XIAN Deyong, LIU Sihui, et al. A novel high-precision, low-power time keeping chip [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(3): 176 - 180. (in Chinese)
- [13] 谢钢. 全球导航卫星系统原理——GPS、格洛纳斯和伽利略系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
XIE Gang. Principles of GNSS: GPS, GLONASS and Galileo [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013. (in Chinese)