

导航卫星自主定轨中系统误差 $\Delta\Omega$ 和 Δt 的消除方法

李征航¹ 卢珍珠¹ 刘万科¹ 余金艳¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:为了消除利用星间距离或速度观测值进行自主定轨时可能存在的卫星星座整体旋转和卫星钟差整体漂移的误差,提出利用单点定位的方法来研究并消除上述两项误差。当导航卫星整体旋转 $\Delta\Omega$ 角时,单点定位所求得测站经度也会偏移 $\Delta\Omega$ 角,据此就能用具有精确地面坐标的控制点来测定 $\Delta\Omega$ 角。当各卫星钟中均含有系统误差 Δt 时,利用单点定位所求得的接收机钟差中也会出现同样的误差,通过与标准时间对比就能测定 Δt 值。算例结果表明,该方法是有用的、可行的。

关键词:卫星导航系统;星间观测值;自主定轨

中图法分类号:P228.41; P207

目前, GPS 星座的 Block II R 卫星已具有用双频伪距观测值来测定星间距离的能力、卫星间的相互通信能力以及在卫星上计算自身的卫星星历和卫星钟差的能力^[1-4]。在没有地面控制系统支持的情况下, 180 d 的预报星历的 URE 仍可保持在 ± 6 m 以内。Ananda 等人的研究表明, 当 Block II R 卫星的数量达到 6 颗时, 在它们之间就能实现自主定轨了。当整个 GPS 卫星星座完全由 Block II R 卫星和 Block II F 卫星组成时, 整个系统就可按下列三种方式进行工作^[5]:

① 在地面控制系统的支持下, 按常规方式工作。

② 按自主导航方式工作, 但地面控制部分每月对卫星星历进行一次更新, 以控制误差的累积。

③ 不依靠地面控制系统的支持, 完全按自主导航方式工作。

为了减少 GPS 卫星上的计算工作量, 提高自主导航的精度, Rajan 等人提出在地面建立一个锚固站协助进行定轨, 并及时将地面位置基准和时间基准传递给自主导航系统^[6]。该建议与第二种工作方式有些类似。除 GPS 系统外, 欧洲在组建 GNSS-2 时也计划在卫星间建立链路, 以协助地面控制系统进行精密定轨工作。研究结果表明, 通过星间观测可将定轨精度从原来的 2~4 m

提高至 1~2 m^[7]。我国在导航卫星的自主定轨方面起步较晚, 有关具体研究可见文献[8-10]。另外, 还有一些学者对利用 GNSS 进行低轨卫星的自主定轨开展了研究, 所提出的方法、模型也具有一定的参考价值。

1 利用星间观测值进行导航卫星的自主定轨

目前, 导航卫星的自主定轨一般均采用原系统中的无线电测距观测值, 如测码伪距观测值, 来进行自主定轨。但是利用导航卫星间的距离观测值或速度观测值进行卫星自主定轨时会出现秩亏问题^[8]。利用已有的预报星历所提供的卫星先验轨道信息是解决秩亏问题的一种较为简便而有效的方法。这种方法早在 20 世纪 70 年代动力法测地、短弧平差等需同时确定卫星轨道和测站坐标的问题中已被广泛使用。

利用地面资料进行定轨时, 由于观测值中含有残余的系统误差(如在电离层延迟改正中未顾及高阶项所带来的影响等), 所用的数学力学模型和计算软件不够完善(如未顾及某些微小的摄动项等), 以及模型中所用的参数不够准确等原因,

可导致由地面控制系统所提供的卫星预报轨道含有系统误差。也就是说,在导航卫星自主定轨时,先验轨道信息本身就可能含有偏差。此外,由于上述原因还将使卫星自主定轨过程中产生新的系统误差,其中多数轨道根数(如轨道椭圆的长半径 a 、偏心率 e 、近地点角距 ω 、轨道倾角 i 及平近点角 M 等)中所含有的系统误差是可以通过星间距离观测值来发现并加以纠正的。因为对于上述任何一种轨道根数而言,当各卫星的星历中均含有同样的系统性偏差时,就会导致卫星间的距离或卫星间的相对速度发生变化而与观测值不符。但当各卫星的升交点赤经 Ω 中含有同一系统偏差 $\Delta\Omega$ 时(即整个导航卫星星座绕地球自转轴旋转 $\Delta\Omega$ 角时),并不影响卫星间的距离和相对速度。也就是说,单纯从星间距离观测值或星间速度观测值中是不可能发现系统误差 $\Delta\Omega$ 的,自然也无法加以纠正。同样,当各卫星钟的钟差中均含有同一系统误差 Δt 时,也不会影响站间距离观测值和速度观测值,单纯依靠星间距离观测值和速度观测值也不可能发现和纠正各卫星钟差中的系统性偏差 Δt 。

从上面的讨论可知,利用星间距离观测值和速度观测值进行导航卫星的自主定轨时,可利用精确的星间观测值来调整卫星间的相对位置,消除或削弱各卫星星历中的随机误差和前面所讲的大部分轨道根数中所含的系统误差,但对于该系统中所含有的系统误差 $\Delta\Omega$ 以及各卫星钟中所含的公共误差 Δt 却无能为力。不管星间距离观测值和速度观测值准确到何种程度, $\Delta\Omega$ 的存在将大大损害系统的导航定位精度,而 Δt 的存在则会影响系统的授时精度,使利用 GPS 所测定的时间与标准时间不一致。

2 消除系统误差 $\Delta\Omega$ 和 Δt 的方法

2.1 消除 $\Delta\Omega$ 的地面校正法

利用星间距离观测值和速度观测值进行导航卫星自主定轨时,各卫星星历的升交点赤经 Ω 中若含有公共误差 $\Delta\Omega$,那么利用这些卫星星历来进行导航和单点定位时所求得的点位中的大地经度 L 也会含有同样的误差,即 $\Delta L = \Delta\Omega$ 。也就是说,当整个卫星星座绕地球自转轴旋转 $\Delta\Omega$ 角时,地面上所有的点只有绕自转轴旋转同样的角度后,才能使卫星与地面测站间的关系保持不变。由于 $\Delta\Omega$ 是一个微小量,所以一般不会影响相对定位的结果。

任何一个卫星导航定位系统在地面控制部分被摧毁而不得不采用自主导航的模式前,往往已在地面上测定了大量的控制点的精确位置。如我国已用 IGS 所提供的精密星历布设了数千个高精度的 GPS 点。从原则上讲,只需在任何一个高精度的地面控制点上重新用自主定轨星历进行一次单点定位,并将新求得的测站坐标(大地经度)与原已知值进行比较,即可求得自主定轨星历中所含的偏差 $\Delta\Omega$ 。当然,为了削弱其他误差的影响,保证所测定的 $\Delta\Omega$ 的精度,在实际测定时,其值应根据多个测站上较长时间的观测值来确定。

2.2 消除 Δt 的方法

若自主定轨所求得的卫星星历中各卫星钟差含有公共误差 Δt ,那么利用它们来进行单点定位时所求得的接收机钟差也会含有同样的误差 Δt ,但对站坐标不会产生影响。因此,只需将该接收机钟与标准时间进行比对后,即可求得 Δt (已归算至同一时间系统)。

由于自主定轨的卫星星历中所含的 $\Delta\Omega$ 和 Δt 本身的变化较为缓慢平滑,因而一般只需定期(如数天或每周一次)进行上述校正即可。校正工作可由专门机构负责进行,然后通过计算机网络、广播等方式播发给用户。必要时,也可由用户自行测定。

3 算 例

算例 1 各卫星的轨道根数 ω, i, M, a, e 中若含有系统误差时,会使卫星间的距离发生变化。从理论上讲,依据卫星间的距离观测值是可以发现和校正上述误差的。具体计算方法如下:任取两颗 GPS 卫星,依据其卫星星历算出这两颗卫星间的距离 S ,然后在这两颗卫星的某轨道根数中加入相同的误差后,再根据新的卫星星历重新计算它们间的距离 S' ,从而求得距离变化值 $\Delta S = S' - S$ 。表 1 至表 5 仅列出了 2004 年 10 月 12 日 6 h 40 m 00 s、6 h 41 m 00 s、6 h 42 m 00 s 三个历元的值。

表 1 在 16 号卫星和 25 号卫星的轨道根数 ω 中同时加入 $\Delta\omega = +2''$ 后星间距离的变化值

Tab. 1 Variety in Inter-satellite Distance Between Prn 16 and Prn 25 After Adding $\Delta\omega = +2''$ to ω

时间/h m s	S/m	S'/m	$\Delta S/\text{m}$
6 40 00	21 745 812.14	21 754 937.23	125.09
6 41 00	21 853 665.26	21 853 789.68	124.42
6 42 00	21 960 954.70	21 961 078.43	123.73

表 2 在 15 号卫星和 25 号卫星的轨道根数 i 中同时加入 $\Delta i=+2''$ 后星间距离的变化值

Tab. 2 Variety in Inter-satellite Distance Between Prn 15 and Prn 25 After Adding $\Delta i=+2''$ to i

时间/h m s	S/m	S'/m	$\Delta S/\text{m}$
6 40 00	7 687 690.27	7 687 649.34	-40.93
6 41 00	7 607 092.70	7 607 050.25	-42.45
6 42 00	7 544 447.60	7 544 403.97	-43.63

表 3 在 3 号卫星和 19 号卫星的轨道根数 M 中同时加入 $\Delta M=0.000\ 1$ rad 后星间距离的变化值

Tab. 3 Variety in Inter-satellite Distance Between Prn 3 and Prn 19 After Adding $\Delta M=0.000\ 1$ rad to M

时间/h m s	S/m	S'/m	$\Delta S/\text{m}$
6 40 00	12 989 862.60	12 989 871.34	8.74
6 41 00	12 990 610.78	12 990 619.38	8.60
6 42 00	12 991 346.36	12 991 354.82	8.46

表 4 在 3 号卫星和 19 号卫星的轨道根数 \sqrt{a} 中同时加入 $\Delta\sqrt{a}=0.005\ \sqrt{\text{m}}$ 后星间距离的变化值

Tab. 4 Variety in Inter-satellite Distance Between Prn 3 and Prn 19 After Adding $\Delta\sqrt{a}=0.005\ \sqrt{\text{m}}$ to \sqrt{a}

时间/h m s	S/m	S'/m	$\Delta S/\text{m}$
6 40 00	12 989 862.60	12 989 810.67	-51.93
6 41 00	12 990 610.78	12 990 558.84	-51.94
6 42 00	12 991 346.36	12 991 294.40	-51.96

表 5 在 3 号卫星和 19 号卫星的轨道根数 e 中同时加入 $\Delta e=0.000\ 01$ rad 后星间距离的变化值

Tab. 5 Variety in Inter-satellite Distance Between Prn 3 and Prn 19 After Adding $\Delta e=0.000\ 01$ rad to e

时间/h m s	S/m	S'/m	$\Delta S/\text{m}$
6 40 00	12 989 862.60	12 989 270.80	-591.80
6 41 00	12 990 610.78	12 990 024.72	-586.06
6 42 00	12 991 346.36	12 990 766.07	-580.29

算例 2 各卫星的轨道根数 Ω 中含有系统误差时,卫星间的距离不会发生任何变化。从理论上讲,从星间距离观测值中是不可能发现和校正上述系统误差的。具体算法如下:任取两颗 GPS 卫星,依据它们的卫星星历算出其星间距离 S ,然后分别在这两颗卫星的升交点赤经 Ω 中加入 $2''$ 的系统误差,重新计算它们间的距离 S' ,并计算

表 8 系统误差 Δt 对单点定位结果的影响

Tab. 8 Effect of Systematic Error Δt on Results of Point Positioning

$\Delta t/\text{ns}$	X/m	Y/m	Z/m	接收机钟差/ns
0	-2 267 754.609	5 009 161.054	3 221 295.337	-31.712 6
10	同上	同上	同上	-21.712 6
25	同上	同上	同上	-6.712 6
75	同上	同上	同上	43.285 7

4 结 语

利用星间测距、测速观测值进行导航卫星自主定轨时,可能存在卫星星座整体旋转和卫星钟

距离变化值 $\Delta S=S'-S$ 。表 6 中仅列出了 2004 年 10 月 12 日 3 个历元(同算例 1)的数值。

表 6 在 16 号卫星和 31 号卫星的轨道根数 Ω 中同时加入 $\Delta\Omega=+2''$ 后星间距离的变化值

Tab. 6 Variety in Inter-satellite Distance Between Prn 16 and Prn 31 After Adding $\Delta\Omega=+2''$ to Ω

时间/h m s	S/m	S'/m	$\Delta S/\text{m}$
6 40 00	35 007 009.929 8	35 007 009.929 6	-0.0002
6 41 00	34 985 840.460 8	34 985 840.460 7	-0.0001
6 42 00	34 963 750.188 4	34 963 750.188 2	-0.0002

算例 3 利用广播星历和 2.5 h 的实测 GPS 资料进行单点定位,原定位结果为 $B=30^{\circ}31'53.942\ 664''$, $L=114^{\circ}21'26.216\ 136''$, $H=35.365\ \text{m}$ 。在每颗卫星的升交点赤经 Ω 中分别加入某一系统误差 $\Delta\Omega$ 后,用同样的软件和观测值重新进行计算。新定位结果中, B 、 H 保持不变, L 的值见表 7。从定位结果之差(ΔL 见表 7)可以看出系统误差 $\Delta\Omega$ 对单点定位的影响。

表 7 系统误差 $\Delta\Omega$ 对单点定位结果的影响

Tab. 7 Effect of Systematic Error $\Delta\Omega$ on Results of Point Positioning

$\Delta\Omega$	新定位结果	定位结果之差
2.062 648''		
(0.000 01 rad)	$L=114^{\circ}21'28.278\ 792''$	$\Delta L=2.062\ 656''$
14.438 537''		
(0.000 07 rad)	$L=114^{\circ}21'40.654\ 656''$	$\Delta L=14.438\ 520''$
3'26.264 810''		
(0.001 rad)	$L=114^{\circ}24'52.480\ 944''$	$\Delta L=3'26.264\ 808''$

算例 4 利用广播星历和 2.5 h 的 GPS 观测值进行单点定位,其结果见表 8。在各卫星的钟差中分别加入某一系统误差 Δt 后,用同样的软件和观测值重新进行计算。比较先后两次单点定位中所求得的站坐标和接收机钟差可看出系统误差 Δt 所造成的影响。

差整体漂移的问题。理论分析和计算结果表明,采用本文所提出的单点定位法可以消除导航卫星星座整体旋转误差 $\Delta\Omega$ 以及各卫星钟中均含有的系统误差 Δt 。

由于无法获得实际的星间观测值进行自主定

轨计算,因而对定轨过程中所产生的 $\Delta\Omega$ 和 Δt 的量级,尤其是它们的变化速率等数值还难以精确估计,故文中所提出的定期校正的时间间隔等还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Andrew C. Autonomous Navigation of GPS Satellite: A challenge for the Future[C]. National Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, CA, 1985
- [2] Ananada M P, Bernstein H, Cunningham K E, et al. Global Positioning System Autonomous Navigation[C]. IEEE Position Location and Navigation Symposium, Las Vegas, Nevada, 1990
- [3] Robert W. Satellite Orbit and Ephemeris Determination Using Inter Satellite Links[D]. Munchen: University of Bundeswehr, 2000
- [4] Rajan J A, Orr M, Wang P. On-Orbit Validation of GPS R Autonomous Navigation[C]. The 59th Annual Meeting Proceedings of the Institute of Navigation, Albuquerque, New Mexico, 2003
- [5] Harold B, Andro F B, James H G. GPS User Posi-

tion Accuracy with Block II R Autonomous Navigation[C]. The 6th International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Salt Lake City, 1993

- [6] Rajan J A, Brodie P, Rawicz H, et al. Modernizing GPS Autonomous Navigation with Anchor Capability[C]. GNSS 2003, Portland, 2003
- [7] Gill E. Precise Orbit Determination of the GNSS-2 Space Segment from Ground Based to Satellite to Satellite Tracking [C]. GNSS-1998, Toulouse, 1998
- [8] 刘林,刘迎春. 关于星-星相对测量自主定轨中的秩亏问题[J]. 飞行器测控学报, 2000, 29(3): 80-83
- [9] 闫野,周伯昭,任莹. 关于卫星网整网自主定轨方法的探讨[J]. 宇航学报, 2002, 23(2): 13-16
- [10] 刘经南,曾旭平. 导航卫星自主定轨的算法及模拟结果[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(12): 1 040-1 044

第一作者简介: 李征航,教授,博士生导师。主要从事卫星大地测量的教学和科研工作。

E-mail: zhhlh@sgg.whu.edu.cn

Method for Eliminating Systematic Error $\Delta\Omega$ and Δt in Autonomous Orbit Determination of Navigation Satellites

LI Zhenghang¹ LU Zhenzhu¹ LIU Wanke¹ YU Jinyan¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: A method is put forward, which is based on single point positioning to eliminate the satellite constellation revolving errors round the earth and systematic error $\Delta\Omega$ in all satellite clocks in making autonomous orbit determination with distance and velocity observations among satellites. When all navigation satellites revolve an angel $\Delta\Omega$ round the earth, the longitude of the station given by point positioning will deviate the same angel. According to this principle, we can determine the angel $\Delta\Omega$ on ground station with accurate coordinates. When all satellite clocks contain the same systematic error, the clock bias of receiver determined by point positioning also contains the same time error Δt . Then the error Δt can be determined by comparing with standard time. The results of several examples show that the methods is feasible and practicable.

Key words: satellite navigation system; inter-satellite observation; autonomous orbit determination