

测控站布局对区域卫星导航系统的影响*

文援兰¹ 柳其许² 朱俊¹ 廖瑛¹

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院 湖南 长沙 410073; 2. 中华测绘技术服务公司 北京 100088)

摘要 建立区域卫星导航系统的测控网是卫星导航系统要解决的关键问题之一。讨论国内测控站的布设问题,采用网格计算方法分析国内测控站对导航星座的可观测性。引入位置精度衰减因子 PDOP 和定轨中的法矩阵条件数,分析测控网对导航星座的观测几何结构强度以及测站位置分布对轨道确定精度的影响,仿真结果表明,利用我国有限的国土跨度和航天测控资源可以确保对导航卫星的测控任务的完成。对在国外布设测控站进行讨论和仿真,结果说明位于国外的测控站(如可在澳大利亚的珀斯设站)的加入能明显改善观测的几何结构强度、提高导航卫星的轨道精度。

关键词 区域卫星导航系统 测控站布局 卫星轨道确定

中图分类号 :V474.2+5 文献标识码 :A

The Effect of TT&C Deployment on the Regional Satellite Navigation System

WEN Yuan-lan¹ ,LIU Qi-xu² ,ZHU Jun¹ ,LIAO Ying¹

(1. College of Aerospace and Material Engineering , National Univ. of Defense Technology , Changsha 410073 , China ;

2. National Service Corporation for Surveying and Mapping , Beijing 100088 , China)

Abstract :The telemetry , tracking , and command (TT&C) network is one of the key issues for regional navigation satellite system. Firstly , the domestic deployment of TT&C stations was discussed. The observability on navigation satellite constellation based on domestic stations was analyzed by means of grid computation. Then , the observing geometric structure intension on satellites was synthesized by the position dilution of precision (PDOP) , and the influence of the station 's location on satellite orbit determination precision was valuated by the condition number of normal matrix. The simulation shows that the TT&C stations located in the limited span of Chinese territory and the existing TT&C resources can accomplish the TT&C task. Finally , the setting of stations abroad was considered and simulated , and it verified that the joining of the stations abroad , such as the station in Perth in Australia , can improve the observing geometric structure intension and satellite orbit determination precision.

Key words :regional navigation satellite system ; the telemetry , tracking , and command (TT&C) deployment ; satellite orbit determination

区域卫星导航系统可采用地球静止轨道(GEO)、倾斜地球同步轨道(IGSO)和中高轨(MEO)等混合轨道的卫星^[1],它不仅要求轨道确定和轨道预报精度高,而且对轨道确定实时性、轨道预报及事后精密轨道的时效性也有较高要求。我国区域卫星导航系统一般主要在国内建立测控网,因此,合理布局测控站、建立卫星导航系统测控网是我国卫星导航系统首先要解决的关键问题之一。所谓布局是指测控网为完成对卫星的跟踪、观测、定轨和控制,地面站布设位置要合理,所需的地面站数量要最少,实质上是解决对卫星轨道的覆盖问题。测控站的布局将直接影响对导航卫星的跟踪观测、卫星的轨道精度和导航性能,各个卫星导航系统都非常重视测控网的布局和建设^[2],它既是卫星导航的技术手段,又是构成卫星导航系统定位的几何基准,它还与社会依托条件、气象条件、地形条件和地址水文条件有关,是一项非常复杂的系统工程。

目前,我国的卫星测控站主要分布在国内。由于这些测控站都分布在北半球,对我国的卫星导航系

* 收稿日期:2006-09-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(10573041)
作者简介:文援兰(1965—),男,副研究员,博士。

统来说,其跟踪条件有限。本文讨论国内测控站是否满足对我国卫星导航系统测控任务,并对在国外布设测控站进行了仿真和分析。

1 测控站对卫星可见性分析

当卫星飞入测控站当地水平面以上空间,可说测控站对卫星可见。但为保证观测精度,只有观测仰角大于一定的高度,即最小仰角 E_0 ,测控站对卫星才具有“可见性”,此时可将观测数据作为有效数据进行卫星定轨。最小仰角取决于地面站周围水平面上的环境以及大气对信号的衰减。

由卫星轨道动力学方程和坐标转换可得卫星在地固坐标系中飞行路径的地心距、地心经度和地心纬度坐标 $(r, \lambda, \theta)^{[3]}$ 。设测控站的大地经度为 L ,大地纬度为 B ,大地高度为 h ,卫星在测控站所在的测控站坐标系中的球坐标为 (ρ, E, A) ,其中 ρ 为测控站到卫星的距离, A 为卫星大地方位角, E 为仰角,则可计算出任意测控站对飞行卫星的观测仰角 E 。

$$\sin E = \frac{r \cos \theta \cos B \cos(\lambda - L) + r \sin \theta \sin B - (N + h) + Ne^2 \sin^2 B}{r} \quad (1)$$

其中 e 为地球扁率, $N = R_E / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}$, R_E 为地球赤道半径。

若考虑在我国境内布设局域导航卫星的测控站,可以经纬度为 5° 的间距在我国划分网格点,测控站最小仰角取 5° ,利用(1)式分别计算地面网格点对导航星座中GEO、IGSO和MEO卫星各一颗的观测时间百分比,如表1表中总的计算弧段长为6天。

表1 卫星可观测弧段与总弧段之百分比(单位%)

Tab.1 The percentage of observable arc of the satellite to the total arc

纬度	卫星类	经度											
		75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130
50	GEO										100	100	
	IGSO										61	61	
	MEO										25	25	
45	CEO		0	100	100					100	100	100	100
	IGSO		60	60	61					64	65	64	64
	MEO		24	25	25					25	25	24	24
40	CEO	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	IGSO	60	61	63	65	66	67	67	67	68	68	68	
	MEO	24	25	25	25	25	25	25	25	25	24	24	
35	CEO		100	100	100	100	100	100	100	100	100		
	IGSO		65	66	68	69	70	71	71	71	71		
	MEO		25	25	25	25	25	25	25	24	24		
30	CEO		100	100	100	100	100	100	100	100	100		
	IGSO		68	70	71	72	73	74	75	75	75		
	MEO		25	26	26	26	25	25	25	25	25		
25	CEO						100	100	100	100	100		
	IGSO						77	78	78	79	79		
	MEO						26	25	25	25	25		
20	CEO								100				
	IGSO								83				
	MEO								25				

从表1可以看出,国内地面点对导航星座中的GEO卫星有很好的可见性,大部分地区覆盖率达100%,只有西北个别地方可见性不好,这是由于所计算的GEO卫星处在我国东部以外赤道上空。同样道理,对于在我国西部以外赤道上空的GEO,东北地区的可见性差。对于MEO卫星,各地对卫星的可见性变化不明显,都只有24%~26%左右的可观测弧段。但对IGSO卫星,纬度越小可观测弧段较长,

在北纬 20° 处有 83% 的可观测弧段,对于经度 东经 $110^\circ \sim 120^\circ$ 地区对 IGSO 卫星的观测性较好。然而测控站的分布还要考虑对导航卫星定轨精度的影响。

2 测控站分布对卫星定轨精度的影响

为讨论问题的简化,只将卫星在地球惯性系的位置和速度作为待估参数向量 X 。

$$X = \begin{bmatrix} r \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, r 和 \dot{r} 分别为卫星的位置和速度矢量, $r = [x \ y \ z]^T$ 。假定待估参数向量为的初始值 X^* ,待估参数改正向量为 ΔX ,即 $X = X^* + \Delta X$,则卫星的动力学方程可写为

$$\Delta X_k = \Phi(t_k, t_{k-1}) \Delta X_{k-1} + W_k \quad (3)$$

式中, W_k 为噪声向量, t_k 为观测时刻, $\Phi(t_k, t_{k-1})$ 称为状态转移矩阵,其近似值为^[5]

$$\Phi(t_k, t_{k-1}) = I + A_{t_k}(t_k - t_{k-1}) = I + A_{t_k} \Delta t \quad (4)$$

对于导航卫星,一般采用伪距或激光测距数据定轨,为讨论问题的方便,将伪距或激光测距数据的其他误差消去,在观测时刻 t_k 只取其距离测量值 ρ_k 。

$$\rho_k = R_k + \epsilon_k \quad (5)$$

式中, R_k 是卫星到测控站的实际距离, $R_k = [(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2]^{1/2}$, ϵ_k 是测量噪声。可将观测方程在 X^* 处进行泰勒展开:

$$\Delta \rho_k = \rho_k - R_k |_{X^*} = H_k \Delta X + \epsilon_k \quad (6)$$

式中 $[X_i \ Y_i \ Z_i]$ 为各测控站位置向量 $[x_k \ y_k \ z_k]^T = r$ 为卫星位置向量, H_k 是设计矩阵:

$$H_k = \begin{bmatrix} \frac{x_k - X_k}{R_k} & \frac{y_k - Y_k}{R_k} & \frac{z_k - Z_k}{R_k} \end{bmatrix} = \frac{1}{R_k} [\Delta x_k \ \Delta y_k \ \Delta z_k] \quad (7)$$

若将不同历元的观测数据通过(3)式归算到初始历元,并取

$$y = \begin{bmatrix} \Delta \rho_0 \\ \Delta \rho_1 \\ \vdots \\ \Delta \rho_M \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} H_0 \Phi(t_0, t_0) \\ H_1 \Phi(t_1, t_0) \\ \vdots \\ H_M \Phi(t_M, t_0) \end{bmatrix} \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_0 \\ \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_M \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, M 为测控站的个数,则批处理定轨模型为

$$\Delta X_0 = (H^T H)^{-1} H^T y \quad (9)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \epsilon^T / \epsilon \mathcal{K} (m - n) \quad (10)$$

$$P_0 = (H^T H)^{-1} \hat{\sigma}^2 \quad (11)$$

式中, m 是观测数据的个数, n 是待估参数的个数, $\hat{\sigma}^2$ 是均方差估值, P_0 是协方差矩阵估值。

下面分观测初始历元和单站多历元两种情况来讨论测控站对卫星定轨影响。

(1) 测控站在观测初始历元对卫星定轨影响。此时 $\Phi(t_0, t_0) = I$,对于确定卫星位置来说,至少需要三个测控站。设卫星位置分量的方差为 $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$,由协方差矩阵(11)式,得定轨的位置误差估值

$$\sigma_r = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)^{\frac{1}{2}} = [\text{tr}(H^T H)^{-1}]^{\frac{1}{2}} \cdot \hat{\sigma} \quad (12)$$

式中 tr 表示矩阵的迹,右端的因子为定轨误差的权系数,称为“位置精度衰减因子”PDOP^[7],其分母是矩阵 H 的模 $|H|$,矩阵 H 的元素是卫星相对测控站视线的方向余弦。因此矩阵 H 的模 $|H|$ 与测控站的空间分布有着密切的关系,特别是对于静止卫星,卫星对测控站的方向余弦基本不变,误差权系数起恒定的影响。将矩阵 H 写成展开式,有

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{x-X_1}{R_1} & \frac{y-Y_1}{R_1} & \frac{z-Z_1}{R_1} \\ \frac{x-X_2}{R_2} & \frac{y-Y_2}{R_2} & \frac{z-Z_2}{R_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x-X_M}{R_M} & \frac{y-Y_M}{R_M} & \frac{z-Z_M}{R_M} \end{bmatrix} \quad (13)$$

如仅考虑矩阵的行列式,则三个测控站(13)式矩阵的行列式等效为

$$|\mathbf{H}| = \frac{1}{R_1 R_2 R_3} \begin{vmatrix} x & y & z & 1 \\ X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 \\ X_3 & Y_3 & Z_3 & 1 \end{vmatrix} = \frac{6V}{R_1 R_2 R_3} \quad (14)$$

式中, V 是由卫星和三个测控站组成的四面体的体积,体积越大,模 $|\mathbf{H}|$ 越大,DOP值和误差权系数越小,测距误差对定轨误差的影响越小。因此,在保证可见性的前提下,测控站之间的基线越长对定轨越有利。

(2)单站多历元观测对卫星定轨影响。对于IGSO和MEO卫星,由(4)式和(1)式得法矩阵

$$\mathbf{N} = \mathbf{H}^T \mathbf{H} = \sum_{k=1}^M (\mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k + \mathbf{A}_k^T \mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{A}_k t_k^2 + \mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{A}_k t_k + \mathbf{A}_k^T \mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k t_k) \quad (15)$$

此时 $|\mathbf{H}|$ 相当于由测控站和观测范围内卫星飞行弧段组成的一个近似半锥体,如图1(a)所示,卫星从测控站 O 所在地平面上的 A 点升起,到 C 点降下,此半锥体体积 V 越大,DOP值越小,测距误差对定轨误差的影响越小。但对于近地轨道卫星,一个测控站对卫星的可见弧段只有十几分钟,测控站 O 可见卫星弧段 ABC 很短,此时 $|\mathbf{H}|$ 相当于由 $OABC$ 组成的近似半锥体体积不大,法矩阵 \mathbf{N} 的条件数很大,可观测性不强,观测方程存在一定的病态,定轨误差很大。对于此问题,可采用多个观测弧段来解决,如图1(b)所示由两个观测弧段定轨, $|\mathbf{H}|$ 相当于由 $OABCFC$ 组成的立方体,其体积大大增加,可观测性大大增强,这就是单个测控站的观测能对卫星定轨的基本原理。

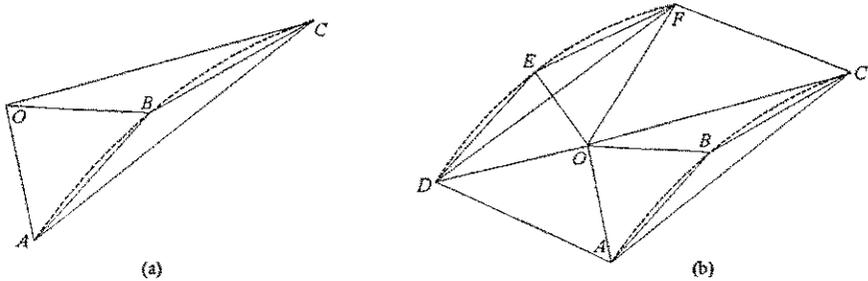


图1 单站对卫星观测

Fig. 1 A single station observes a satellite

但对于GEO卫星,即使在地球惯性系,卫星和测控站的相对位置几乎保持不变,此时 $|\mathbf{H}|$ 相当的近似半锥体体积很小,法矩阵 \mathbf{N} 严重病态,定轨误差极大,显然单站多历元是对GEO卫星定轨是不利的。

综上所述,为提高定轨精度,采用测控站分布较广的布局,利用多站和多历元的观测数据定轨能获得更高的精度。一个全球的测控网比局部地区的测控网取得更好的观测覆盖和更高的轨道确定精度。

3 卫星测控站布设仿真与分析

测控站的布设是一个复杂的系统工程,受到的限制条件很多,在这里仅从它对导航卫星可见性和轨道确定的影响方面来讨论。利用上面的基本结论,在国内原有的基础上仿真设立17个测控站^[8],为探讨以国内测控网为基础的局部地区测控网布局对卫星导航系统的影响,将它们分为三组:组合1为所有17个站,组合2为其中10个站,保持中国周边站台和内部站台分布均匀,组合3为其中6个站,保持分

布面积最大且分布位置均匀。取最小仰角为 15° 利用这三种组合分别跟踪观测 3 天的弧段,各组分别对一个 GEO 卫星、IGSO 卫星、MEO 卫星观测 3 天,可见性如表 1~4;三种组合观测 IGSO1 卫星 PDOP 值如图 2。显然,组合 1 的可见弧段最长,组合 2 保持了较好的观测性,组合 3 则观测性大大降低。

表 2 17 个站卫星可见弧段与总弧段之比(单位:%)

Tab.2 The percentage of observable arc of the satellite to the total arc in 17 stations

	至少 1 个站	至少 3 个站	至少 4 个站	所有 17 个站
GEO	100	100	100	100
MEO	42.5	37.00	31.52	18.12
IGSO	82.01	78.00	75.26	60.41

表 3 10 个站卫星可见弧段与总弧段之比(单位:%)

Tab.3 The percentage of observable arc of the satellite to the total arc in 10 stations

	至少 1 个站	至少 3 个站	至少 4 个站	所有 10 个站
GEO	100	100	100	100
MEO	42.37	33.94	28.73	18.12
IGSO	82.01	72.23	67.96	60.41

表 4 6 个站卫星可见弧段与总弧段之比(单位:%)

Tab.4 The percentage of observable arc of the satellite to the total arc in 6 stations

	至少 1 个站	至少 3 个站	至少 4 个站	所有 6 个站
GEO	100	100	100	100
MEO	42.16	31.69	22.00	18.12
IGSO	82.01	67.96	61.75	60.41

利用这三种组合分别跟踪观测 3 天弧段的 IGSO 卫星,采用 P 码伪距定轨,假设测量误差都为 6.4m ,考虑卫星所受的所有摄动,采用批处理进行事后精密定轨,精度如图 3 所示。由于三种组合在国内都有较好的分布,因此定轨误差都较小。其中组合 2 是一种较为适用的测控站组合。从对卫星的可见性和对导航卫星定轨的角度考虑,在我国有限的国土跨度,利用航天测控资源可以确保对导航卫星的测控任务的完成。以上讨论的测控站都分布在国内,下面将在组合 2 的基础上进一步讨论国外布站情况。

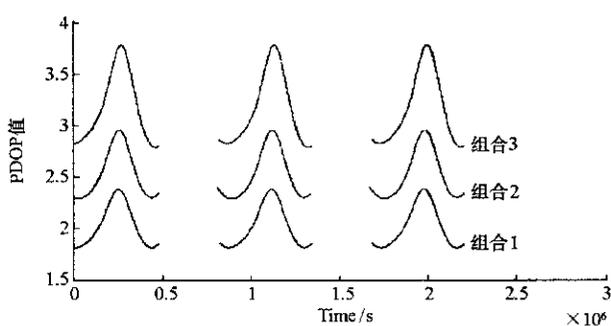


图 2 三种组合观测 IGSO1 卫星的 PDOP 值
Fig.2 PDOP of the satellite IGSO1 for three combinations of stations

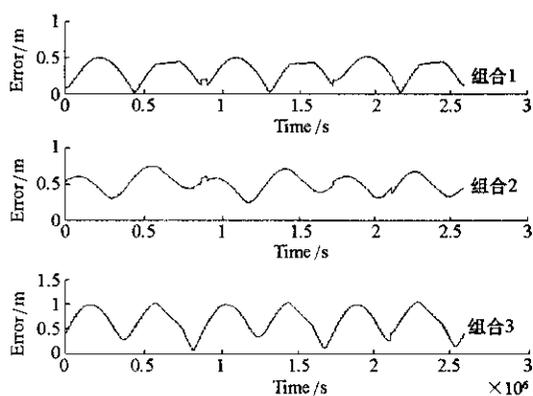


图 3 三种组合分别对 IGSO1 卫星定轨的误差
Fig.3 The orbit determination error of the satellite IGSO1 for three combinations of stations

4 国外测控站的布设

从前面的轨道确定仿真结果中可知,利用国内的测控站对目前建设的局域导航卫星星座进行定轨,能基本上满足对导航卫星的跟踪观测要求。因此,目前考虑在国外布设少量测控站以达到以下效果:第一,增加卫星可观测弧段长度;第二,改善国内测控站的观测几何结构强度,进一步提高卫星轨道确定的精度。

为满足上述要求,根据前面得出的结论,在组合 2 的基础上,考虑在澳大利亚的珀斯布设一个测控

站,定义为组合4。所布设的测控站可同时观测到导航星座中的5颗GEO卫星,另外还增加了IGSO和MEO卫星的可观测弧段;由于它分布在南半球,与国内测控站经纬度跨度较大,较好地改善了观测几何。如图4所示,组合4观测IGSO卫星的PDOP值大大降低。

同时,在同弧段对卫星定轨,IGSO卫星批处理定轨误差如图4所示。采用组合2和组合4分别对GEO和MEO卫星定轨的误差如图5所示和图6所示。

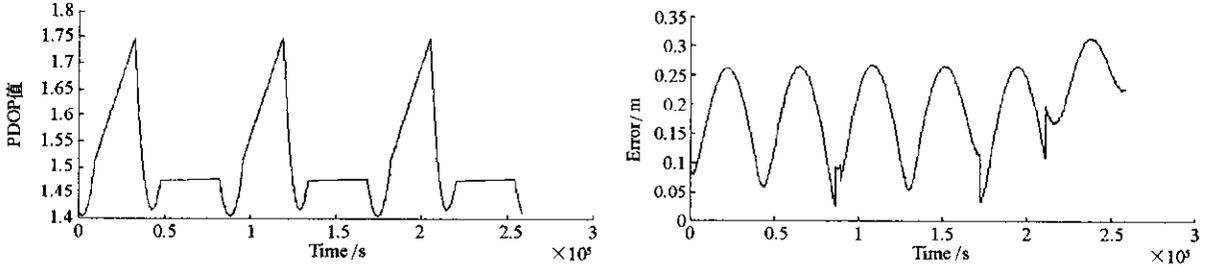
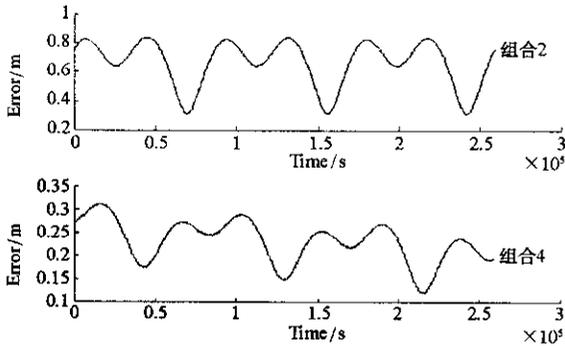


图4 组合4对IGSO卫星观测的PDOP值和定轨误差

Fig.4 PDOP of the satellite IGSO and orbit determination for the stations' combination 4



5 组合2和组合4对MEO卫星轨道确定误差
fig.5 MEO satellite orbit determination error for the stations' combination 2 and combination 4

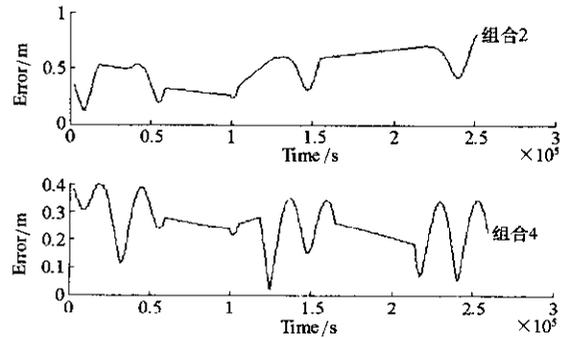


图6 组合2和组合4对GEO卫星轨道确定误差
Fig.6 GEO satellite orbit determination error for the stations' combination 2 and combination 4

可见,国外测控站的加入改善了国内测控站的不足,定轨精度得到较大改善,证明组合4是一组较优的组合。事实上,若条件允许,为增加MEO卫星的可见弧段长度,可考虑在组合4的基础上增加我国周边地区以及南半球的布站。

5 结论

区域导航卫星的特殊性和混合轨道的复杂性对测控站的布局提出了新的要求,从测控站对导航卫星的可见性、观测几何强度以及跟踪定轨精度等几方面来看,在国内布设测控站能满足卫星导航系统的基本测控要求,但各测控站应尽量拉开,基线越长测控站几何条件越优。在国外布设测控站能明显改善国内观测网的性能,提高导航卫星的轨道确定精度和卫星导航系统的性能。

参考文献:

[1] 魏子卿. 关于建立我国导航卫星系统的初步意见[J]. 世界科技, 1998(3).
 [2] Galileo System Simulation Facility Algorithms and Model[CP]. http://www.esa.int/gssf/, 2005.
 [3] 刘林. 航天器轨道理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
 [4] 李济生. 航天器轨道确定[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
 [5] 郑大钟. 线性系统理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
 [6] Yang Y X, Wen Y L. Synthetically Adaptive Robust Filtering for Satellite Orbit Determination[J]. Science in China, Ser. D, Earth Science, 2004, 47(7): 585-582.
 [7] 许其凤. 空间大地测量学——卫星导航与精密定位[M]. 北京: 解放军出版社, 2001.
 [8] 赵业福. 卫星测控网的技术发展[J]. 飞行器测控学报, 2002, 21(3): 1-4.

