

# 卫星测高定轨技术的发展及其应用

康莹 何妙福

(中国科学院上海天文台)

## 提 要

本文对国外10年来测高卫星的发展、观测原理、模型及各种解算方法进行了分类介绍和概要评述。对开展 TOPEX/POSEIDON 卫星的研究和应用提出了一些想法和建议。

## 一、测高卫星及观测原理

卫星测高技术出现,为卫星动力学及卫星大地测量学的发展与应用开辟了一个新领域。并为海洋学、海洋动力学、板块构造学、海洋大地测量学的研究和量测提供了崭新的手段。

卫星测高最大的特点,就是能够快速得到丰富、高精度而又全球均匀覆盖的海洋动态信息(这是该技术出现前无法想象的),进而可求定大地水准面、海洋重力异常、海洋垂线偏差、海面模型;并对板块构造及运动、洋流动力学进行深入地量化研究;同时测制洋流图、潮汐图、海底地形图、海面地形图及其变化等。因此,卫星测高技术的发展是当前国际卫星应用与研究领域的热点<sup>[10]</sup>。

美国近10年来已发射了几颗测高卫星,如 Geos-3, Seasat, Geosat 等。欧洲最近也发射运行了 ERS-1, 美法即将联合发射 TOPEX/POSEIDON 卫星。表1列举了四颗测高卫星的主要指标<sup>[1,7,10]</sup>。

表 1

卫星	发射运行日期	测高仪精度	跟踪方式	重复轨迹周期	轨道高度	工作寿命	备注
Seasat	1978.6	3—5cm	激光USB	3d	约800km	三个月	仪器三个月后发生故障
Geosat	1985.3	3.5cm	多普勒 (TRANET OPNET)	17d	800km	五年	单频辐射计
ERS-1	1991.7	小于10cm(?)	激光 PRARE	3d	777km	(预计)三年	PRARE 不能工作
TOPEX	1992.8	2.0cm	激光, GPS, 多普勒 (TRANET, DORIS)	10d	1330km	(预计)五年	有两台测高仪

测高卫星上均载有雷达测高仪、湿分量辐射计以及多普勒跟踪仪,可得到精密的卫星至海面距离,波高和风速,且每隔一定时间重复以前的星下轨迹,从而可为研究海洋的动态变

化提供丰富的信息。

Seasat 以及 Geosat 的所有飞行观测数据(Geosat 除去 18 个月的 GM 观测数据)均按标准格式贮存在 GDR 中,并向全世界研究者开放。GDR 全称为 Geophysical Data Record,即地球物理数据记录,它提供卫星的标准轨道,以及经过预处理后的测高高程及各项误差改正。

如图 1, 卫星测高的基本方程<sup>[3]</sup>为:

$$A_{\text{range}} = R - (N + \zeta + T) + B \quad (1)$$

其中:  $A_{\text{range}}$  为测高观测值

$R$  为卫星所处的椭球面高

$N$  为大地水准面高

$\zeta$  为动力海面地形

$T$  为潮汐值

$B$  为总的观测误差

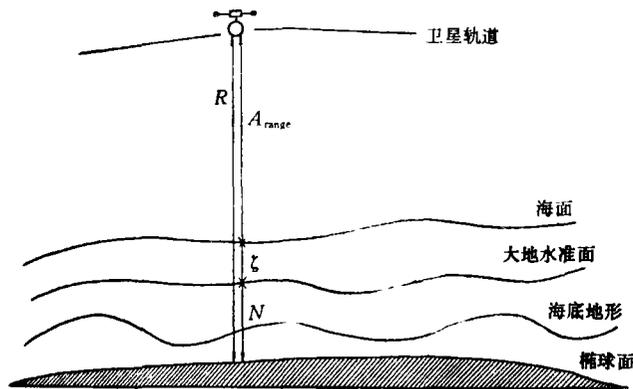


图 1

且有: 海面高(SSH) = 大地水准面高( $N$ ) + 动力海面地形( $\zeta$ )而动力海面地形又可分为<sup>[1]</sup>:

动力海面地形( $\zeta$ ) = 拟稳海面地形(季节或长期流)(QSST) + 短期扰动SSH。全称为 Sea Surface Height, 而 QSST 的全称为 Quasi Sea Surface Topography。动力海面地形  $\zeta$  量值约 1 米, 而正是这个大地水准面与海面的微小差值  $\zeta$  及其变化包含了全球洋面环流及洋流动力学的丰富信息。

卫星测高的观测模型为<sup>[1]</sup>:

$$h_e = h_{a1} + h_{sg} + h_i + h_a + h_s + h_g + h_t + h_o + \varepsilon \quad (2)$$

其中  $h_e$  为卫星质心到椭球面星下点的距离

$h_{a1}$  为测高仪测得的卫星相对瞬时海面的高度

$h_{sg}$  为测高仪偏心及指向改正

$h_i$  为总的仪器迟延

$h_a$  为大气对流层(干、湿分量)改正及电离层改正

$h_g$  为大地水准面高

$h_n$  为 EM 偏差(海面与雷达脉冲作用时间改正)

$h_t$  为固体潮与海潮改正

$h_o$  为动力海面地形

$\epsilon$  为观测噪声

GDR<sup>[21]</sup>中包括有上述的各项改正。

## 二、测高卫星轨道的精密确定及解算<sup>[11,19]</sup>

由卫星测高的基本方程可以看出, 卫星轨道的径向精度直接影响到测高数据丰富信号的提取。因此, 测高卫星径向轨道精度与测高数据精度匹配是测高卫星效益充分发挥的关键(见表 2)。

表 2

卫 星	测高精度	径向定轨精度	备 注
SEASAT	3—5cm	[22] 40cm	
GEOSAT	3.5cm	[2] 20cm	目前定轨能达到的最好精度
ERS-1	<10cm?	[8] 1m?	
TOPEX	2.0cm	[7] 13cm	要求达到的径向定轨精度

影响测高卫星定轨的主要因素有重力场模型、太阳辐射压模型以及大气阻力模型不完善误差, 还有跟踪数据的地理、时间分布以及软件系统等。目前, 国外一般从三个方面着手提高轨道的径向精度:

1. 应用效果及意义显著的交叉点技术;
2. 综合测高数据及交叉点数据求定新的重力场模型;
3. 面力(大气阻力、太阳辐射力)的进一步改正。

### (1) 交叉点及有关公式

如图 2, C 点称为交叉点, 即由地球自转引起的测高卫星星下轨迹相交之点。

设卫星飞过  $j'$  及  $i'$  点的时间分别为  $t_j$ 、 $t_i$  以及对应的海面高度为  $h(t_j)$ 、 $h(t_i)$ , 则<sup>[11]</sup>:

$$\text{交叉点观测值} \quad \Delta h(t_i, t_j) = h(t_i) - h(t_j) \quad (3)$$

于是由(2)、(3)两式可得:

$$\Delta h(t_i, t_j) = \Delta h_o - \Delta h_{nl} = \Delta h_i + \Delta h_a + \Delta h_s + \Delta h_t + \Delta \epsilon \quad (4)$$

因此, 理论上的交叉点观测值仅包含有海面对地心的短时变化, 但实际上轨道模型与海洋地形模型均不完善。因此, 实际的交叉点观测值:

$$\Delta h^*(t_i, t_j) = h^*(t_i) - h^*(t_j) \quad (5)$$

同样含有卫星径向未模型力摄动影响以及海洋地形模型不完善引起的变化。

Rosborough<sup>[4]</sup>提出的重力场对近圆轨道卫星径向摄动的零阶项公式(忽略高阶项)为:

$$\Delta r^{(0)} = \gamma + V \quad (6)$$

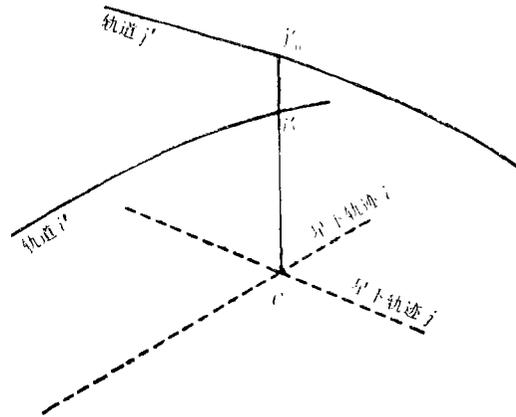


图 2

其中:

$\gamma$  为地理相关的重力场平均径向摄动,

$V$  为地理变化的重力场摄动, 升段时取正, 降段时取负。

因此, 交叉点观测值的误差可表示为:

$$\Delta x = 2|V| \quad (7)$$

测高资料的交叉点观测值能够反映出重力场对卫星摄动的地理变化部分的影响, 对地理相关部分的影响则反映不出, 且交叉点处消去了大地水准面的误差。上述特性使交叉点观测值在测高数据的处理与应用中发挥着重要作用。

### (2) 轨道确定及其解算<sup>[20,22-29,30,32,34,40]</sup>

利用测高数据进行解算有两类途径, 一是动力方法, 二是非动力方法。动力方法即测高数据处理与测高卫星轨道确定同时一并综合解算; 而非动力方法则是利用 GDR 标准轨道处理测高数据(不定轨)。

动力方法大致有三种, 一是综合利用各种卫星观测与跟踪数据包括激光测距、多普勒测速、卫星测高及交叉点数据等确定最新重力场模型<sup>[18,19,20]</sup>。这些最新得到的重力场模型有: GEM-T1、GEM-T2、GEM-T3 系列; PTGF-3、PTGF-4 系列; GRIM3、GRIM4 系列等。由于测高卫星的贡献, 使这些重力场模型的精度明显提高。

二是用获得的最新重力场模型, 加上交叉点约束及其他力学模型改正来对测高卫星轨道进行精密确定<sup>[21]</sup>。目前, 获得 GEOSAT 卫星径向定轨精度最高的是德克萨斯大学奥斯汀分校空间研究中心(CSR)的 20 厘米<sup>[21]</sup>。采用交叉点观测资料用于定轨可使卫星轨道径向误差减少一半左右, 同时他们在定轨中还采用了大气阻力改进公式:

$$\begin{cases} \rho = \rho_m \cdot \Delta \rho \\ \Delta \rho = [C_D + \bar{S} \sin(\omega + M) + \bar{C} \cos(\omega + M)] \end{cases} \quad (8)$$

这样, 17 天轨道计算精度与 5 天的结果精度相同, 且  $\bar{S}$  与  $\bar{C}$  主要吸收了非引力摄动力<sup>[21]</sup>。

第三种是目前最流行的方法, 即将重力场、轨道以及拟稳海面动力地形(QSST)同时求解<sup>[51]</sup>。采用最小二乘配置, 按照:

$$A_{\text{range}} = R - (N + \zeta + T) + B \quad (9)$$

求解量      求解量  
 QSST      测高仪偏差  
 ↑      ↑  
 $A_{\text{range}} = R - (N + \zeta + T) + B$   
 ↓      ↓      ↓      ↓  
 卫星轨道高度    大地水准面高    潮汐  
 (重力等位面)    (也可为求解量)  
 ↓      ↓      ↓  
 求解量    求解量    求解量  
 ↓      ↓      ↓  
 已改正的测高值

进行解算。

目前, 对测高卫星径向定轨精度评估有以下几种:

- (1) 跟踪数据残差  $\text{rms}^{[2]}$
- (2)  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  的交叉点残差  $\text{rms}^{[8]}$
- (3) 共迹测高残差  $\text{rms}^{[1,2]}$
- (4) 测高残差的低频部分 ( $<1.5\text{cpr}$ )<sup>[8]</sup>
- (5) 第(2)项与重力场地理相关误差合并考虑<sup>[8]</sup>

第(2)项标准表明用收敛的轨道, 计算的距离变率与跟踪距离变率的拟合程度。与跟踪站拟合好, 在其他地域则可能相反; 第(2)项标准只能反映一部分径向轨道误差(重力场的地理变化部分摄动的影响), 而地理相关部分的重力平均摄动则不能反映出来; 第(3)项标准只能反映较少部分的轨道误差(重力场摄动影响基本反映不出); 而第(4)项标准受到高噪声水平的大地水准面影响。因此, 比较合理的径向轨道精度评估方法是第(5)项, 即将  $1/\sqrt{2}$  的交叉点残差  $\text{rms}$  与重力的地理相关部分摄动合并考虑, 从而得到比较可信的结果。

### 三、测高数据处理的非动力方法<sup>[23-29,31,33-39,41,42]</sup>

贮存在 GDR 中的标准轨道或重新精密确定的轨道, 仍然不可避免地含有不小的误差, 影响海洋信息的提取。近几年来, 非动力方法进展迅速, 方法也多种多样。究其本质特点就是非通过动力法定轨而是采用其他方法或手段来抑制或消除星历径向误差, 从而更加有效地提取信息的一种处理方法。

非动力方法求重力场系数的方法<sup>[6]</sup>如下:

- (1) 根据测高资料得到 CDD's 的值  $\delta C$
- (2) 由公式

$$\delta C^{(k,m)} = 4 \left( \frac{\mu}{a} \right)^{1/2} \sin \chi_{km} \cdot \sin \left( \frac{ml'}{K'} \right) \cdot \left[ S_{km} \cos \left( \frac{m}{4} \theta'_s \right) - T_{km} \sin \left( \frac{m}{4} \theta'_s \right) \right] \quad (10)$$

解算出重力场的田谐项集合系数  $S_{km}$ ,  $T_{km}$ 。其中:

$$\chi_{km} = KM_1 + \frac{1}{2}m(\theta'_s - \theta'_i), \quad M_1 \text{ 为 } t_1 \text{ 时的轨道根数 } M(t_1)$$

$\theta'_i = \theta_i - \Omega_i$ ,  $\theta_i$  为  $t_i$  时刻之恒星时

$\theta'_s$  为两交叉点中四个历元时刻之  $\theta'_i$  的和

CDD's 为同一纬圈上交叉点观测值的互差。它与大气阻力独立, 且使太阳辐射压、初始状态矢量及长周期重力项影响比较小。因此, 它主要反映了纯周期性质的重力项。所以, 该方法不用定轨就能改进重力场模型系数。

求定海面模型 SSH 的方法也很多, 抑制误差的手段各异, 下面是一种典型方法<sup>[6]</sup>。

采用目前的测高卫星定轨方法, 即最新重力场模型加上交叉点观测值约束及大气阻力改正得到的轨道, 仍然无法消除重力的地理相关部分摄动的影响。因此, 在求定(SSH)海面模型过程中, 采用对测高观测值加权的处理方式可使(SSH)不受歪曲。

首先用二次曲面表示某( $j, k$ )区域的海面高, ( $j, k$ )区域中有  $m$  次测高观测值, 权为  $C^{-1}_{\delta h_{jk}}$ , 然后, 用带权为  $C^{-1}_{\delta h_{jk}}$  的  $m$  次测高观测值求出二次曲面的最小二乘系数。

$$\text{其中}^{[6]} C_{\delta h_{jk}} = M_{jk}^T P_G M_{jk} \quad (11)$$

非动力方法中还有一种处理测高数据的技术也具有较好效果, 即海面斜率(Slope)法。它最大特点就是海面斜率(Slope)受轨道误差影响很小, 而对海洋局部和区域性的变化敏感, 所以目前也正得到广泛应用<sup>[1,9]</sup>。

#### 四、TOPEX/POSEIDON 卫星的研究与应用<sup>[12-18,35]</sup>

TOPEX 卫星将于 1992 年 8 月发射, 下表是 TOPEX 卫星观测的误差分配情况。

可以看出, 要达到 TOPEX 卫星的定轨要求, 重力场模型的改进和精化是十分重要的。例如, GEM-T1 对卫星径向轨道误差影响约为 50cm<sup>[20]</sup>。有两种基本方法确定重力场模型对轨道的影响:

- (1) 用两个重力场模型计算同一个卫星轨道, 并比较结果。
- (2) 利用求定重力场模型时得到的协方差矩阵来估计其对轨道的影响。

第一种方法为纯数值方法, 要注意两重力场模型间的相关性对结果的影响。第二种方法为解析方法, 结果比较可靠。

TOPEX 对未模型的辐射压误差很敏感, 某些情况下, 太阳翼板定向差几度即可使径向轨道差 10cm, 只要有 75 瓦特的未模型热辐射不平衡即可导致 2500kg 的卫星有  $10^{-10} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  的误差<sup>[7]</sup>。因此, 要艰苦努力量化辐射力同时发展适于 TOPEX 精密定轨的实用辐射力模型。

目前国内由于各种卫星跟踪资料及测高资料获取困难, 因此缺乏条件发展如 GEM-T1, GEM-T2, GEM-T3 这样的全球重力场模型系列。但可以采用本文前述的动力方法中的第三种以及非动力方法求重力集合系数途径来求专门适用于 TOPEX 卫星的重力场模型, 并估价其对 TOPEX 测高数据导出的洋面地形的影响。

需要指出的是, 直接采用测高资料与采用交叉点资料求解重力场模型是有区别的, 前者把永久性洋面地形带入了重力解中。

最小二乘配置方法综合各类数据(如激光测距、测高资料、多普勒测速等)求解引力位系数及 QSST 系数, 是充分利用 TOPEX 卫星信息的一种十分重要和有发展前途的方法。但也

误差源 项目	未知量的标准差, cm	不相关距离, km
测高仪		
仪器噪声	2.0	20
飘移偏差	2.0	(许多天)
介质		
EM偏差	2.0	20—1 000
海浪扭曲	1.0	20—1 000
对流层, 干分量	0.7	1 000
对流层, 湿分量	1.2	50
电离层	1.3(2.0*)	20
轨道		
重力场	10.0	10 000
辐射压(太阳, 地球)	6.0	>10 000
大气阻力	3.0	>10 000
GM	2.0	10 000
固体潮与海潮	3.0	10 000
对流层	1.0	10 000
站位置	2.0	10 000
总的绝对误差	13.3	

\* 对只有一个频率的 POSEIDON 测高仪而言。

要充分注意对协方差函数及各类资料权重的选取适当, 使重力信号与海洋信号有效地分离。

非动力方法求海面模型, 采用前述对测高观测值加权的办法消除重力的地理相关部分摄动对导出的海面模型的影响, 是目前比较可取的直接求 SSH 的方法。由于 TOPEX 更高精度的观测数据要求更高更准确的海面模型(SSH), 如果在加权求解前, 首先按下面的公式(12)消去测高数据中大气阻力、辐射压、重力的地理不变部分以及初始状态误差的影响<sup>[6]</sup>。作者认为按这样的步骤和方法求解出的海面模型, 受到各主要误差源的影响将会大大减少, 从而得到比较可信的海面模型(SSH)。

$$O_p(t) = \sum_{k, m} \Delta r^{(k, m)} + c_1(t-t^*) \cos M + c_2(t-t^*) \sin M + c_3(t-t^*) \sin 2M + L_D(t) \quad (12)$$

这里  $O_p(t)$  为交叉点观测数据,  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  为待定系数,  $L_D$  为分段线性函数,  $t^*$  为长弧中点。

更进一步, 在这些改正以前即采用调整过系数的专门用于 TOPEX 的最新重力场模型, 则大地水准面误差影响会进一步减小, 从而最后得到比较真实的海面模型。

目前 ERS-1 正在正常运行, ERS-1 虽然精度没有 TOPEX 高, 但其覆盖的纬度范围比 TOPEX 要广。因此, TOPEX 今年升空后, 将有两颗卫星同时运行观测, 研究如何联合处

理两颗测高卫星共同观测数据的方法也提到了我们研究者面前。

致谢：本文得到黄城副研究员、朱文耀研究员的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢！

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Zhang Bohai, GEOSAT/ERM Altimeter Data Analysis for Determination of Global Oceanic Mesoscale Variability, Doctorial Dissertation, (1988).
- [ 2 ] Shum, C.K. et al., *J.G.R.*, 95 (1990), No.C3, p. 2887.
- [ 3 ] Marsh, J.G. et al., Dynamic Sea Surface Topography, Gravity and Improved Orbital Accuracies from the Direct Evaluation of SEASAT Altimetry, Draft, (1988).
- [ 4 ] Rosborough, G.W., Satellite Orbit Perturbations Due to the Geopotential, CSR-86-1, University of Texas at Austin, (1986).
- [ 5 ] Kelecy, T.M., Use of the Geopotential Error Covariance Matrix for Improving the Estimate of the Mean Sea Surface from Satellite Altimetry, (1988).
- [ 6 ] Moore, P. and Gray, R.D., *Advances in Space Research*, 11 (1991), No. 6, p.245.
- [ 7 ] Tapley, B.D. et al., *J.G.R.*, 10 (1990), No.3-4.
- [ 8 ] Zandbergen, R.C.A. et al., *J.G.R.*, 10 (1990), No.3-4, p.249.
- [ 9 ] Sandwell, D.T., U.S. National Report 1987-1990, p.132, 20th IUGG/IAG General Assembly, (1991).
- [10] Douglas, B.C. and Cheney, R.E., *J.G.R.*, 95 (1990), No.C3, p.2833.
- [11] Haines, B.J., et al., *J.G.R.*, 95 (1990), No.C3, p.2871.
- [12] Cheney, R.E. and Miller, L., *J.G.R.*, 95 (1990), No.C3, p.2977.
- [13] Wakker, K.F. et al., *J.G.R.*, 95 (1990), No.C3, p.2991.
- [14] Leben, R.R. et al., *J.G.R.*, 95 (1990), No.C3, p.3025.
- [15] Nerem, R.S. et al., *J.G.R.*, 95 (1990), No.C3, p.3163.
- [16] Tapley, B.D. et al., *J.G.R.*, 87 (1982), No.C5, p.3179.
- [17] Marsh, J.G. and Martin, T.V., *J.G.R.*, 87 (1982), No.C5, p.3269.
- [18] Lerch, F.J. et al., *J.G.R.*, 87 (1982), No.C5, p.3281.
- [19] March, J.G. et al., An Improved Model of the Earth's Gravitational Field: \*GEM-T1\*, (I)—(IV), (1987).
- [20] NAKAGAWA, I., Report of IAG Section III-Determination of the Gravity Field-During the Period from Sep. 1987 to Aug. 1991, 20th IUGG/IAG, Vienna, (1991).
- [21] Cheney, R.E. et al., Geosat Altimeter Geophysical Data Record(GDR) User Handbook, (1987).
- [22] Rapp R.H., *J.G.R.*, 84 (1979), No.B8, p.3784.
- [23] Watts, A.B., *J.G.R.*, 84 (1979), No.B8, p.3817.
- [24] Won, I.J. and Miller, L.S., *J.G.R.*, 84 (1979), No. B8, p.3833.
- [25] Douglas, B.C. and Gaboriski, P.D., *J.G.R.*, 84 (1979), No.B8, p.3893.
- [26] Lerch, F.J. et al., *J.G.R.*, 84 (1979), No.B8, p.3897.
- [27] Brown, G.S., *J.G.R.*, 84 (1979), No.B8, p.3987.
- [28] Chovitz, B.H. and Koch, K.-R., *J.G.R.*, 84 (1979), No.B8, p.4041.
- [29] West, G.B., *J.G.R.*, 84 (1979), No.B8, p.4056.
- [30] Tapley, B.D., *J.G.R.*, 84 (1979), No.B8, p.4061.
- [31] Born, G.H., Memorandum, Center for Space Research, University of Texas at Austin, (1984).
- [32] Williamson, R.G. and Marsh, J.G., Precision Doppler Data Processing, 8th TOPEX Gravity Model Development Meeting, (1987).
- [33] Eren, K., Spectral Analysis of Geos-3 Altimeter Data and Frequency Domain Collection, Report No. 297, Ohio State University, Dep. of Geodetic Science, (1980).
- [34] Tapley, B.D., Geophysical Parameter Determination Using Satellite Ranging, Center for Space Research, University of Texas at Austin, (1989).
- [35] Anderson, A.J. et al., in Proceedings of the IAG, ed. by R. Anderle, Vancouver, p.572, 19th IUGG/IAG, (1987).
- [36] PARKE, M.E., in Proceedings of the IAG, ed. by R. Anderle, Vancouver, p.597, 19th IUGG/IAG, (1987).
- [37] Arnold, P. and Koch, K.R., in Proceedings of the IAG, ed. by R. Anderle, Vancouver, p.598, 19th IUGG/IAG, (1987).

- [38] Knudsen, P. in *Proceedings of the IAG*, ed. by R. Anderle, Vancouver, p.617, 19th IUGG/IAG, (1987).  
[39] Lansard, E., in *Proceedings of the IAG*, ed. by R. Anderle, Vancouver, p.650, 19th IUGG/IAG, (1987).  
[40] Shum, C.K. et al., in *Proceedings of the IAG*, ed. by R. Anderle, Vancouver, p.629, 19th IUGG/IAG, (1987).  
[41] Bosch, W., in *Proceedings of the IAG*, ed. by R. Anderle, Vancouver, p.651, 19th IUGG/IAG, (1987).  
[42] Englis, T.L., in *Proceedings of the IAG*, ed. by R. Anderle, Vancouver, p.652, 19th IUGG/IAG, (1987).

(责任编辑 刘金铭)

## Satellite Altimetry: Development and Applications in Orbit Determination

Kang Ying He Miaofu

(*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences*)

### Abstract

The present paper gives a review of development and most applications of Satellite Altimetry for orbit determination for the latest ten years. Observational principals, mathematical models and a variety of estimation methods for Satellite Altimetry are introduced and classified. Some estimation methods and suggestions for the cooperate research on TOPEX/POSEIDON are also included.