

海洋卫星测高技术的新进展

董晓军 黄 瑜

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

主要介绍90年代发射的新一代海洋测高卫星: TOPEX/POSEIDON卫星和ERS-1卫星的情况。在简要说明这两颗测高卫星的主要任务和星载科学研究仪器之后,叙述了轨道选择的原理和精密轨道确定的情况,并介绍最近国外利用TOPEX/POSEIDON资料进行的海洋学研究和成果以及未来的测高计划。另外,还简要讨论了TOPEX卫星的摆动漂移改正错误及其影响。利用NASA提供的摆动漂移改正的修正值,我们得到了全球海平面的上升速度为 $1.0\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ 。

关键词 空间飞船 — 地球 — 技术: 雷达天文

1 海洋卫星测高技术的发展

占据地球表面71%的是广阔的海洋,然而由于条件的限制,长期以来人类只能使用验潮站、测量船和浮标来观测海洋。利用这类方法得到的数据数量少、精度低而且大多集中于北半球和近陆地区,不足以对全球的海洋作出全球背景下的整体描述,也不能对大尺度和中等尺度的海洋动力学和海洋运动学现象作出高精度的动态描述。为克服传统海洋测量方法的缺陷,从70年代中期开始,美国等西方国家先后发射了一系列的测高卫星,获取了大量的海洋信息,如海平面高度、海水表面温度、波高等。这些数据精度高、数量大而且均匀覆盖了全球海洋,大大丰富了人类对海洋的认识。表1给出了已发射的测高卫星的概况:

表1 海洋测高卫星系列

| | 发射日期 | 平均高度 /km | 测高仪精度 /cm | 径向定轨精度 /cm | 主要研究领域 |
|--------|---------|-------------|--------------|---------------|---------|
| SKYLAB | 1973.11 | 425 | 100 | 1000 | 试验 |
| GEOS-3 | 1975.04 | 840 | 25-50 | 120 | 海洋大地水准面 |
| SEASAT | 1978.06 | 800 | 5-7 | 50 | * |
| GEOSAT | 1985.03 | 800 | 3-5 | 15 | 海洋大地水准面 |
| ERS-1 | 1991.07 | 870 | 5-7 | 6-7 | 环境监测 |
| TOPEX | 1992.08 | 1334 | 2-3 | 2.8 | 洋流及其变化 |
| ERS-2 | 1995.04 | 774 | 5-7 | 6-7 | 环境监测 |

*SEASAT 仅观测三个月

根据卫星测高技术原理^[1],测高的精度主要取决于测高仪精度、径向定轨精度和对测高值进行地球物理改正(如大气延迟、电离层改正等)的情况。其中,测高资料的各种误差源所引起的误差的空间尺度一般都大于 1000km,而中尺度海洋现象的波长小于 1000km,因而上述误差对其影响较小,容易被探测到。而对于大尺度(指波长尺度大于 1000km)的海洋变化相对较难探测。在卫星测高技术发展的早期阶段,卫星精密定轨水平较低,轨道精度一般为几十厘米,因此,难以探测到洋流、中尺度涡旋等变化幅度不超过几十厘米的海洋现象的变化,而主要用于研究海洋大地水准面和大尺度的洋流的描述,这些海洋现象的尺度一般为几十厘米到几十米。直至 90 年代,随着卫星精密定轨技术的发展,海洋卫星测高技术进入了一个新的发展时期,美国、法国和德国等国先后发射了 ERS-1、TOPEX、ERS-2 三颗测高卫星,并且将继续发射一系列测高卫星。这些卫星的定轨精度达到了厘米级,特别是 TOPEX(ocean TOPography EXperiment)卫星利用其轨道精度上的优势,成为测高卫星中的典范。在本文中着重介绍 TOPEX 卫星。

TOPEX 卫星是由美国宇航局(NASA)和法国国家宇航中心(CNES)联合研制的一颗测高卫星,因为除了 NASA 的雷达测高仪外,还搭载一个法国 CNES 提供的 POSEIDON 测高仪,所以又称为 TOPEX/POSEIDON 卫星,简称为 T/P。它于 1992 年 8 月 10 日发射升空,并在 9 月 23 日进入日常工作状态。其主要任务是测量全球性洋流及其变化,同时监测海平面的变化,为海洋学家、地球物理学家和气象学家的研究提供依据^[2]。与 GEOSAT 等测高卫星相比,T/P 使用多种方法以改进定轨精度,如使用 SLR(Satellite Laser Ranging)和 DORIS(Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)跟踪技术^[3],选择合适的轨道高度及倾角等,同时搭载微波辐射计测量电离层改正。这些措施取得了明显的效果。T/P 卫星预计可以工作到 2000 年。

发射 ERS(the European Remote Sensing satellite)系列卫星的目的是为了给全球气候研究项目 TOGA(Tropical Ocean and Global Atmosphere)和 WOCE(World Ocean Circulation Experiment)进行环境研究提供数据,具体包括天气预报研究、海洋状态和海洋冰区变化、污染监测等^[4]。第一颗 ERS 卫星 ERS-1 于 1991 年 7 月由欧洲空间局发射升空,其严格重复周期为 3d、35d 和 268d,且主要周期为 35d,轨道倾角为 98°,因此与 T/P 相比具有覆盖面大、覆盖密度高的优点,但由于用途上的限制,它的高度和倾角并不很适合于精密定轨的需要,因此其定轨精度不如 T/P 卫星。第二颗 ERS 卫星也于 1995 年升空,主要是为了与 ERS-1 的观测连接,以提供一个较长时间尺度的连续观测。

2 星载主要科学仪器

1. T/P 卫星搭载了 6 台科学仪器^[5],下面逐一介绍:

- 双频 NASA 雷达测高仪 NRA(NASA Radar Altimeter)

它是卫星上仅次于微波传送装置和天线的科学仪器,也是第一台使用双频方法计算电离层延迟效应的雷达测高仪。它同时使用 13.6GHz(Ku 波段)和 5.3GHz(C 波段)测量卫星到海平面的距离,其仪器噪声为 1.7cm。利用其观测值可解算卫星相对于海平面的高度、海面风速、波高和电离层改正。

- 多频 T/P 微波辐射计 TMR(T/P Microwave Radiometer)
在 18GHz、21GHz 和 37GHz 三个波段同时观测海面的微波亮度温度, 从而计算出大气层中水蒸汽对雷达波的延迟量。其中 21GHz 为主要工作波段, 18GHz 和 37GHz 用来消除云层和海面风的影响。
- 激光后向反射器阵 LRA (Lasrer Retro-reflector Array)
主要跟踪设备。NASA 利用 10—15 个地面激光观测台站对它的跟踪数据确定卫星的位置。
- 双频多普勒跟踪系统接收机 (Dual-frequency Doppler tracking system receiver)
也称 DORIS 接收机。使用 1401.25MHz 和 2036.25MHz 接收全球 40—50 个发射台站的 Doppler 信号。该数据被 CNES 用来计算卫星的精密星历表和电离层延迟改正。
- 单频固态测高仪 SSALT(Solid State AL Timeter)
使用 13.65GHz(Ku 波段) 测量卫星到海面的距离, 仪器噪声为 2.0cm。与 NRA 相比具有重量轻、耗能低的优点, 此次作为试验性项目来验证其有效性, 以便今后能搭载在其它卫星上, 用以长期观测海平面的变化。它与 NRA 合用一个天线, 故不能与 NRA 同时使用。SSALT 的使用时间约占全部时间的 12%。
- GPS 接收机 GPSDR(Global Positioning System Demonstration Receiver)
试验项目。工作频率为 1227.6MHz 和 1575.4MHz, 用来验证利用星载 GPS 技术进行精密定轨的可能性。

2. ERS-1 星载仪器主要包括以下科学研究仪器^[4]:

- 动态微波仪 AMI (Active Microwave Instrument)
主要科学仪器, 它可以使用三种不同的模式进行工作:
 - (1) 综合孔径雷达成像模式 (Sythetic Aperture Radar Image Mode) 以获取大范围的海区、极地冰帽和陆地的图像;
 - (2) 综合孔径雷达测波模式 (Sythetic Aperture Radar Wave Mode) 产生沿轨迹方向等间距的 5km×5km 的图像, 利用这些图像可以求出海波的波长和传播方向;
 - (3) 散射仪测风模式 (Wind Scatterometer Mode) 测量海面 and 地球表面的风速和方向。
- 雷达测高仪 (Radar Altimeter)
精密测定海面地形、有效波高、海面风速和几种海冰参数;
- 沿迹扫描辐射计和微波声纳 (Along-Track Scanning Radiometer and Microwave Sounder)
在红外波段和微波波段联合测量海面温度、云顶温度、云的覆盖率和大气水蒸气含量;
- 精密测速测距仪 PRARE (Precise Range and Range-Rate Equipement)
试验性定轨项目, 利用卫星接收全球 26 个地面站发送的无线电信号精密定轨;

• 激光后向反射器 LRR (Laser Retro-Reflector)

用于地面激光站跟踪, 以提供卫星的精密轨道。

3 轨道

卫星径向定轨误差是卫星测高技术中的最大的误差源^[6], 因此轨道的选择和精密确定便非常重要。T/P 卫星和 ERS-1 卫星与 GEOSAT 等以前的卫星相比, 能在海洋学研究中发挥更大作用的一个非常重要的原因就是定轨技术有了很大提高。T/P 配备了三套定轨设备, ERS-1 配备了二套定轨设备, 这样就不会由于某种定轨设备的意外故障而导致整个计划的失败。而且, 不同技术的使用也有利于各技术的改进提高。

日益成熟的 SLR 技术仍然是海洋测高卫星的主要跟踪手段。T/P 和 ERS-1 卫星都使用全球激光跟踪网的资料确定卫星的精密星历表, 其径向定轨精度分别为 2.8cm 和 6—7cm^[7]。除 SLR 技术以外, T/P 还安装了 DORIS 接收机和 GPS 接收机。DORIS 系统利用星载 DORIS 接收机接收全球 40—50 个地面站发送的 Doppler 信号来确定卫星的精密轨道, 实际使用表明其径向定轨精度可以达到 3.5cm^[2]。T/P 卫星定轨的另一特色是试验了星载 GPS 定轨技术。GPS 技术在最近几年得到了很大的发展, 与 SLR 技术相比具有使用方便、费用低的特点, 在大地测量、卫星定轨等领域得到了广泛的应用, 星载 GPS 技术以其费用低、精度高和全天候的优点而具有很大的应用潜力。星载 GPS 试验表明当执行 SA 和 AS 政策时, 其定轨精度为 4—5cm; 无 SA 和 AS 影响时, 定轨精度可达 3cm^[2]。这说明星载 GPS 技术在未来的卫星精密定轨领域将发挥很大作用。ERS-1 卫星定轨则使用了 SLR 和 PRARE 技术。ERS-1 使用星载 PRARE 接收机接收地面 26 个台站发送的无线电信号进行精密定轨, 与 SLR 相比, PRARE 的地面台站在全球的分布更为均匀^[4], 但由于 ERS-1 卫星在轨道选择时的限制, ERS-1 难以达到更高的定轨精度。

卫星定轨的主要误差源是地球引力场模型误差和大气阻力摄动误差, 为了提高径向定轨精度, 在选择卫星轨道时应选用合适的倾角和高度^[6], 但同时又必须考虑卫星的应用目标。T/P 轨道的选择主要考虑了定轨的要求, 因此使用 SLR 技术得到的轨道精度可以达到 2.8cm, 而 ERS-1 由于要监测冰区和地面污染的情况, 其高度和倾角都受到应用目标的限制, 因此只能使用较为合适的 98° 倾角和 800km 高度, 其径向定轨精度与 T/P 比较尚有一定的差距。

为了改进 T/P 和 ERS-1 卫星的定轨精度, 研究人员进行了大量的工作, 其主要成果是结合卫星的观测资料提出了一系列新的地球引力场模型(如 JGM-2, JGM-3), 这些模型的采用大大改进了卫星精密定轨的能力, T/P 预定的定轨精度为 13cm, 在采用了 JGM-2 模型后达到了 3—5cm 的精度, 最近 NASA/JPL 使用 JGM-3 重新归算了 T/P 轨道, 其精度得到了进一步的提高^[7], 达到了 2.8cm 的水平。

为了解决 ERS-1 卫星的定轨问题, 一种非动力学方法——双星交叉点方法被用来改进 ERS-1 的定轨精度。卫星的地面轨迹相交叉的点被称为交叉点, 双星交叉点方法即利用一个时间段内两颗卫星在交叉点处测得的海面高度值的均方偏离应为最小的原理, 对其中的某颗卫星的轨道进行调整。利用该方法得到的 ERS-1 轨道可以达到 T/P 的内部符合精度^[8]。需

要注意的是这种方法有可能丢失一部分波长较长的海洋信息。

卫星轨道的另外一个问题就是轨道的维持。卫星测高技术要求严格重复轨道, 即每隔一定时间, 卫星的地面轨迹将重复, 对 T/P 卫星的要求是地面轨迹的偏差不超过 1 km。大气阻力会导致卫星缓慢下落, 同时地球引力场和太阳辐射也将造成卫星轨道的长周期变化, 这些都会影响测高资料的质量。因此, 每隔 40—200 天将对卫星的姿态进行调整。姿态调整期间卫星采集的科学数据不提供给一般用户。当用于姿态调整的燃料用完时, 卫星的使命也将结束。

4 卫星测高资料的应用

除了上述的轨道调整和轨道精密确定外, 卫星测高资料还将用来改进测量模型和进行它的最终目标——海洋学领域的研究工作。

卫星测高的精度取决于卫星的定轨精度、仪器测距精度和测量改正的误差, 所以 T/P 的测高资料首先被用来改进卫星定轨的主要摄动源和测量改正模型。美国 Texas 大学空间研究中心 (UT/CSR) 利用 T/P 等测高卫星的测高资料, 结合其它资料给出了新的地球引力场模型 JGM-3 和海潮模型 CSR3.0, 利用这些模型确定的 T/P 卫星径向轨道精度达到了 2.8cm^[7], ERS-1 径向轨道精度为 6—7cm^[9]。

由于 T/P 卫星的精密定轨取得了意外的成功, 其径向定轨精度远远好于预定的 13cm 的要求, 测量误差中的海潮模型误差便成为最主要的误差源。目前使用的海潮模型其精度一般为 5—10cm, 特别是在对人类活动有很大影响的近陆地区, 其误差要大得多。利用 T/P 卫星的测高资料结合以前的测高资料和验潮站资料可以重新估计潮汐模型的系数, 在 1994 年至少提出了 12 个新的海潮模型, 这些模型都利用了 T/P 卫星的高精度的测高资料。Anderson 等人对这些海潮模型与传统的海潮模型进行了比较, 与全球 95 个验潮站资料比对的结果表明, 这些模型的均方误差 (RMS) 都好于 Cartwright-Ray 模型和 Schwiderski 模型, 其中, Schrama-Ray 模型的均方误差为 2.69cm^[10]。

卫星测高具有良好的测量海面高度的能力。Nerem 等人利用 73 个验潮站 (其中 46 个位于海岛上, 27 个在大陆上) 资料比较了验潮站海面高度序列和 T/P 卫星测得的验潮站处的海面高度序列, 发现对于大多数海岛验潮站这两个序列的相关系数大于 0.6, 两序列差的均方误差小于 4cm。海岛验潮站的平均均方误差为 0.38cm, 大陆验潮站的平均均方误差为 6.5cm, 这一差别主要原因是由于沿岸地区的测高资料较少, 同时海潮模型在沿岸地区存在较大的误差。Mitchum 的研究得到了类似的结果^[11]。卫星测高资料和验潮站资料的比对结果, 显示了卫星测高资料对海洋运动学和海洋动力学研究方面具有广泛潜力。

T/P 卫星是目前唯一的主要用于监测全球洋流的海洋卫星, 在利用卫星测高资料监测全球洋流方面得到了一定进展。Tapley, Nerem 等人都利用 T/P 测高资料确定了全球的海面地形图, 与利用验潮站资料解算的海面地形的差别为 4cm (RMS) 左右^[12,13]。在分析洋流变化的过程中, 研究人员观测到了和 ENSO (El Niño-Southern Oscillator) 紧密相关的年际尺度的海洋表面波动现象。从 1992 年 12 月 21 日开始, 在太平洋赤道地区出现了三个持续约两周的东向的风团, 这一大气异常导致了海面出现一个东向运动的海面地形异常, 即赤道 Kelvin 波。Tapley 等人利用 T/P 的测高资料观测到赤道 Kelvin 波正以约 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度向东传播, 这一

结果与理论的 $2.2\text{--}3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 相吻合^[13]。Hughes 利用一年 (Cycle 11—Cycle 46) 的 T/P 测高数据分析了南方海 (Southern Ocean) 的中尺度涡旋, 发现在环极洋流 (Circumpolar Current) 中的涡流随洋流一起向东运动, 而在其他地区则向西运动, 这一结果与 FRAM 模型的 Rossby 波相吻合^[14]。其他的一些研究人员也利用测高资料观测到了 Kelvin 和 Rossby 波^[15,16,17,18]。

T/P 卫星测高资料在海洋学方面的另一利用是监测全球海平面的变化。长期以来, 全球海平面的变化一直是公众关注的话题, 利用验潮站和浮标虽然可以观测到局部的海平面变化, 但由于验潮站在全球范围内分布不均匀, 同时台站本身也存在高度升降的问题, 使得根据验潮站资料得到的全球海平面变化之间存在着很大的差异^[19], 甚至有人认为海平面变化根本无法测量^[20,21,22]。T/P 卫星测高资料显示了在解决这一问题上的巨大潜力。Nerem 等人首先利用 1992 年 12 月到 1994 年 9 月的 T/P 测高资料得到了全球海平面上升速度约 $5\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ 的初步结果^[23], Chency 和 Wang 等得到了类似的结果 (分别为 $4.8\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ ^[24] 和 $4.5\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ ^[25])。最近, NASA 发现在进行 T/P 仪器校正时, 其中的摆动漂移改正 (算法 S1034) 出现了错误。该错误的特点是对在 10 天的一个重复周期内的影响不超过 1mm, 但它随时间而变化。在 1993—1994 年影响较小, 在 1995—1996 年急剧上升。因此, 对大多数的研究结论影响较小, 但对利用 T/P 测高值得到的全球平均海平面变化的影响很大。目前, NASA 和 CNES 合作重新处理 T/P 的测高数据, 新的数据采用了 JGM-3 地球引力场模型和 CSR3.0 海潮模型, 并作正确的摆动漂移改正, 这套数据将于 1997 年初提供给研究人员使用, 在这之前, 临时提供一套摆动漂移改正的修正值。利用 NASA 提供的修正值, 我们重新处理了 T/P 卫星 1993 年 12 月—1996 年 4 月的测高资料, 得到的结果是: 在这期间全球海平面的上升速度是 $(1.0\pm 0.7)\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ 。由于资料序列较短, 这一结果并不能说明全球海平面在长时间尺度上的变化。随着新的测高卫星的升空, 人们可以得到一个较长时间尺度上的高精度的海平面变化系列, 从而能对全球海平面的变化及其对全球气候的影响作更为确切的描述。

与海平面长期变化和年际变化有关的研究是海平面变化和海水表面温度的关系的研究。Chency 等人对得到的约 $5\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ 这一明显高于模型预测值的海平面上升速率进行了分析, 发现 1994 年下半年在北半球出现了一个异常的海平面上升, 在比较了全球的海温资料后, 认为海面变化和海温变化在时间和空间上都是一致的^[24]。另外, Minster、Picaut 等人的研究也表明, 海水表层的温度与海面的高度存在一定的关系^[26,17]。

另外, 利用测高资料研究局部的海洋变化方面也取得了一定进展^[27,28,29]。例如, Crout 等人研究了黄海地区的暖流和黑潮^[27], Mey 等人利用 T/P 和 ERS-1 的测高资料研究了地中海地区的海面地形^[28], Verstraete 等人研究了非洲西海岸几内亚湾 Sao Tome 岛的海平面变化^[29], 不过, 要得到一个对全球或局部海面地形及其变化的较为精确的描述, 尚需要积累更长时间的资料和进行更多的研究工作。

5 未来的发展

继 T/P 和 ERS-1 之后, 美国和欧洲国家又着手发展新的海洋测高卫星, 如 ERS-2、GFO-1、GFO-2 和 JASON 系列卫星。下面简要介绍这些卫星的情况。

ERS-2 是欧洲空间局 ERS 系列卫星的第二颗, 已于 1995 年 4 月发射升空。使用与 ERS-1 类似的轨道, 主要是监测全球的环境变化。卫星载有一个多频雷达测高仪, 与 ERS-1 的资料

相结合可以提供一个较长时间尺度上的海洋动态信息序列。ERS 系列卫星测高资料与 T/P 的资料相结合, 可以弥补后者在空间分布上的不足。

GFO-1 和 GFO-2(GEOSAT Follow On 1, 2) 是 GEOSAT 卫星的后续星。美国海军为了测量全球大地水准面和海面地形及其变化而发展 GEOSAT 系列卫星的计划包括两个阶段: 第一阶段是测量海洋大地水准面的阶段 (Geodetic Mission, 简称 GM), 其轨道特点是较密地覆盖全球海洋, 这一阶段的资料是保密的。第二阶段是测量海洋变化的阶段 (Exact Repeat Mission, 简称 ERM), 其轨道特点是地面轨迹严格重复, 重复周期是 17.05d, 高度约 800km, 倾角为 108° , 这一阶段的资料是开放的。GEOSAT 卫星于 1985 年发射升空, GM 阶段开始于 1985 年 3 月 30 日, ERM 阶段开始于 1986 年 11 月 8 日, 卫星持续工作到 1990 年 1 月。GFO-1 计划于 1996 年底发射, GFO-2 计划在本世纪末发射。目前国外的科学家正争取使 GM 阶段的资料公开。

JASON 系列卫星是 T/P 卫星的后续星, 使用与 T/P 类似的轨道, 计划于 90 年代后期发射 JASON 系列卫星中的第一颗—JASON-1。预计 JASON 系列卫星和 T/P 卫星的观测资料结合可以提供一个较长时间高精度的海洋表面地形观测序列。

利用这些测高卫星的资料, 预计在研究全球性的洋流及其变化、全球性和区域性海平面上升的监测、海潮模型的修正和中尺度涡旋等领域会取得某些突破性的进展, 并最终解决全球性海-气相互作用和长期天气预报等世界性难题。

参 考 文 献

- [1] Born G H, Wunch C. EOS Trans., 1984, 65(28): 1
- [2] Fu L L, Christensen E, Lefevre M et al. J. Geophys. Res., 1994, 99(C12): 24369
- [3] AVISO. AVISO CD ROM user manual: merged T/P product, AVI-NT-02-100 -CN, 1994
- [4] ERS-1 laser tracking support requirement, ERS-D-Lsr-31300, 1990
- [5] Benada R. PO.DAAC merged GDR(T/P) users handbook, D1107 JPL, 1993
- [6] Rosborough G W. Satellite orbit Perturbation due to the geopotential. CSR-86-1, Austin: The University of Texas at Austin, 1986
- [7] Tapley B D, Born B, Chelton D et al. Report of the ASG to NASA Headquarters and the EOS Payload Panel, 1994
- [8] AVISO. AVISO user handbook: sea-level anomaly files, AVI-NT-011-312 -CN, 1995
- [9] Shum C K, Tapley B D, Kruzinga G et al. EOS Trans, Suppl. 1995, 75(44): 152
- [10] Anderson O B, Woodworth P L. J. Geophys. Res., 1995, 100(C12): 25261
- [11] Mitchum G T. J. Geophys. Res., 1994, 99(C12): 24541
- [12] Nerem R S, Schrama E J, Koblinsky C J et al. J. Geophys. Res., 1994, 99(C12): 24565
- [13] Tapley B D, Chambers D P, Shum C K et al. J. Geophys. Res., 1994, 99(C12): 24605
- [14] Hughes C W. J. Geophys. Res., 1995, 100(C8): 15933
- [15] Chelton D B. EOS Trans. Suppl., 1995, 75(44): 152
- [16] Busalacchi A. EOS Trans. Suppl., 1995, 75(44): 152
- [17] Picaut J, Iouaiaien M, Menkes C et al. EOS Trans. Suppl., 1995, 75(44): 153
- [18] Rogel P, Minster J F, Blayo E et al. EOS Trans. Suppl., 1995, 75(44): 153
- [19] Douglas B C. Rev. Geophys. Suppl., 1995, 1425
- [20] Barnett T P. J. Geophys. Res., 1984, 89(C5): 7980
- [21] Emery K O, Aubrey D G. Sea levels, land levels and tide gauges. New York: Springer-Verlag, 1991
- [22] Pirazzoli P A. Global and Planetary Change, 1993, 8: 135
- [23] Nerem R S, Rachlin K E, Beckley B D. EOS Trans. Suppl., 1995, 75(44): 158

- [24] Chency R E. EOS Trans. Suppl., 1995, 75(44): 151
 [25] Wang Y W, Nerem R S. EOS Trans. Suppl., 1995, 75(44): 156
 [26] Minster J F, Echevin V, Brossier C et al. EOS Trans. Suppl., 1995, 75(44): 151
 [27] Crout P, Teague W. EOS Trans. Suppl., 1995, 75(44): 157
 [28] Mey P, Ayoub N, Benkiran M. EOS Trans. Suppl., 1995, 75(44): 153
 [29] Verstraete J M, Park Y Y. J. Geophys. Res., 1995, 100(C12): 25129

(责任编辑 舒似竹)

Recent Progress in Satellite Altimetry

Dong Xiaojun Huang Cheng

(Shanghai Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

This paper mainly introduces two altimeter satellites—TOPEX and ERS-1 which were launched in early 1990's. The contents include research object, onboard instruments, orbit determination and the preliminary result. The future mission and an error in TOPEX oscillator drift correction (TOPEX Algorithm S1034) are also introduced. After correcting S1034 error, we get a global sea surface rising of $1.0 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$.

Key words space vehicle—Earth—techniques: radar astronomy