

卫星高度计及其应用

关 福 民

(青岛海洋大学)

传统的遥感技术,都是利用地物的电磁波谱特征来提取物质的分类、数量或状态信息。由于海水的导电性,电磁波在海水中被强烈吸收,除了极狭窄的可见波段能透入表面几米至几十米外,其余的红外、微波段电磁波只能透入极表层、 μm — mm 深度。同时,由于海洋表层状态是一系列海洋、大气过程综合作用的结果,要对这种遥感信息有效地进行主因素分离十分困难。可见光及红外波段的遥感器在云盖地区不能工作,这就影响了对小尺度海洋现象的连续观测。

卫星遥感方法虽然在实时性、大尺度上对传统方法有根本性突破,但究其测量精度,仍不足与船测数据相抗衡。

正是由于这些表层信息在研究大洋环流时显得不够有力,海洋学家至今仍只能依靠船只和各种海洋台站来获取各种深度的水文资料,从而推算这种洋流的存在和规模。

为了解决上述困难,1974年 NASA 发射的 SKYLAB 开始了一项新的试验,采用了新型的海洋遥感器——卫星高度计(ATL)。这种仪器在随后的 GEOS-3 和 SEASAT 卫星上逐步地得到改进。

SEASAT 装载的高精度计(ATL)所提供的数据,使人们第一次获得一张全球海面高度图。海洋学家据此第一次实际地测出了大中尺度的海洋环流。目前 ATL 已被认为是用遥感方法研究海洋的必备手段。美国宇航局打算在 80 年代末发射一个以高精度的高度计为中心的 TOPEX 卫星,以作为 90 年代开始的全球大洋环流研究计划的核心设备,揭示近年来频繁出现的、影响全球气候变化的海洋厄尔尼诺

现象产生的机制。

海面从来不是平静的,除了波浪以外,潮汐运动使海面周期性起伏。此外还存在一些更重要的起伏变化。这些起伏不平反映了海洋水体的流动,反映着海底的地形、大气压及风场对海洋的影响、全球冰川的变化等。如果能及时得到精确的海洋表面高度图,就能从中提取出上述极为重要的信息。

一、星载高度计——ATL

星载高度计从海洋上空 1000km 处向海面发送出一系列极其狭窄的雷达脉冲,然后检测从海面反射后回到卫星上的电磁波脉冲,精确计算其时间间隔而得出高度值。电磁波的传播速度为 $3 \times 10^{10} \text{cm/s}$, 如果高度测量的精度达到 5cm, 时间的测量就要准确到 0.2ns, 这就要求计时年误差在 1s 以内。

为了使输出脉冲携带足够的能量,星载 ATL 上采用了一种脉冲压缩技术。大致过程是,先用一个尖脉冲,经色散滤波器展扩为一群长脉冲,再经放大,使之达到要求的幅度,然后向海面发射。电磁波经海面反射返回卫星系统时,长脉冲群经过一个反向的滤波器重新形成尖脉冲。

在 ATL 测距方面另一个困难是决定测距精度的尖脉冲所要求的带宽远超过国际公允的频带宽度。为此采用一种精确检测返回脉冲前沿波形的方法。其原理如图 1 所示。从卫星高度向海面发射一脉宽为 τ 的矩型脉冲电磁波,波面以卫星为中心呈球面向下传播。在 $t = 0$ 时起,球面波前表面与海平面的作用以切点开始,逐渐扩展,当 $t > \tau$ 时作用面积变为圆环,

表 1 几种星载高度计的特征比较

卫星名	频率(GHz)	带宽 (MHz)	高程分辨率(m)	脉冲压缩比	测浪精确度
SKYLAB	13.9	100	1	1 或 13	1—2m
GEOS-III	13.9	80	0.5	30	$\pm 25\%$ (4—10m)
SEASAT	13.5	320	0.1	1000	$\pm 10\%$ (1—20m)
ERS-1	13.5	300	0.05~0.1	/	/
TOPEX	13.5	~	0.01	/	$\pm 10\%$

环的直径随时间而不断扩大,环宽逐渐变窄,圆环面积则保持不变。当球面电磁波束的边沿到达海面时,圆环外径不再扩展,内径继续扩大,环面积逐渐减小,直至最后消失。经海面反射,回到卫星上的电磁波幅度和上述电磁波与海面作用的过程相应,形成了一个展宽的波型。精确地测量脉冲传输时间和返回脉冲的波型,就可以得到高精确度的高度值。这种波型检测的方法大大放宽了对发射脉宽的严格要求。例如,SEASAT 卫星上的 ATL 发射脉冲宽为 3ns,用这种方法测得高度却可以达到误差为 10cm 的高精度。

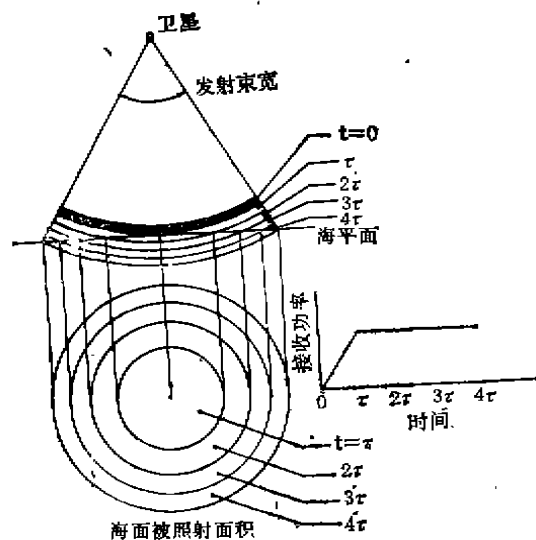


图 1 高度计工作原理

通常海面由于有波浪而起伏不平,到达海面的球面电磁波先由浪峰作用被反射,尔后才与浪谷水面相遇,这一延时会使回波脉冲的上升和下降沿变缓。此外,从浪谷的散射要比浪峰要强一些,这也使回波前沿产生一定的变形。

这种回波前沿的畸变携带着海面有效波高的信息。SEASAT 所载 ATL 在用这种方法测量有效浪高大于 1m 的大洋风浪时的精度可达 10%。图 2 为有效浪高对高度计回波前沿影响的示意图。

为了精确测定接受脉冲波形,可采用多次的重复脉冲采样平均的方法。ATL 可以每秒向海面发射数千个脉冲,而每秒中给出几个平均高度值。表 1 给出了当前几种星载高度计的主要特征。

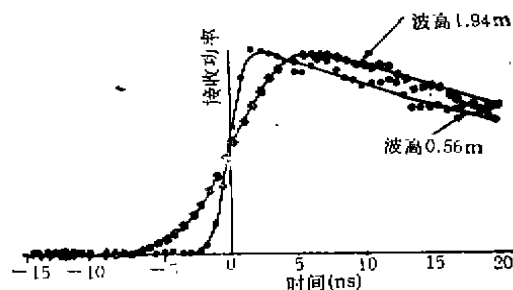


图 2 根据接收到的脉冲平均值(测点所示)得出的平滑曲线,可以测几分之一 ns 的延时,从波型的变化得出有效波高

二、海面高度的测量

要精确测量实际海平面对平均海面的偏离和起伏,取决于卫星的轨道高度、卫星离海面的距离以及平均海面的高度。其关系如图 3 所示。这三者的测量精度,将共同决定 ATL 的精度,目前的 ATL 技术已可保证达到 10cm 以内的精度。要提高其余两个因素的精确度,相对就要困难些。

卫星轨道的测量和海洋平均水平面的测量是相辅相成的。最先科学家们是根据地球表面

的重力测量数据和许多早期的人造卫星轨道计算制作出的平均海面高度图, 然后通过后期发射的星载高度计所积累的数据为上述平均海平面图提供了修正和补充。但是, 从总体来看高度计的测量结果与以前计算得出的平均海平面, 普遍相差 5—10m。这一结果似乎是由于卫星轨道的测定误差所造成, 但亦不能排除以前测定的平均海平面存在着误差。因为卫星轨道的计算很大程度上又取决于平均海平面的数据准确性, 因此两者是既独立又互相制约的。

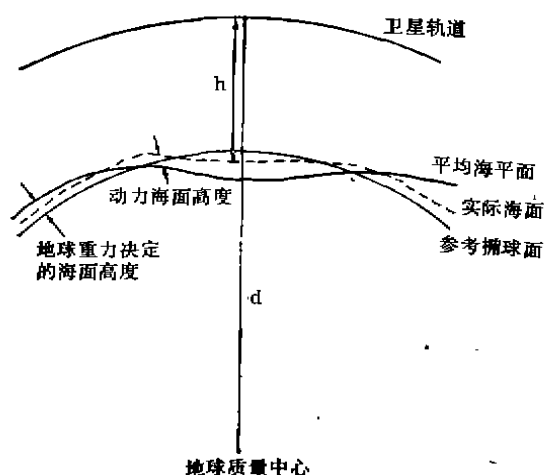


图 3 从卫星离海面的高度 h , 卫星轨道离地心的高度以及已知的平均海平面就可以推算出海面的偏离

目前的短期预测, 水平方向精度为 10m, 垂直方向精度为 2m。在靠近卫星测试站的地区, 近期预测精度可以再高出一个数量级左右, 显然这种预测精度并不令人满意。

卫星的实时高度主要利用跟踪站进行实测 (使用无线电测量或用激光测距), 测距精度以激光方式最准, 可达 $\pm 5\text{cm}$ 。但这种测量方式受天气条件限制, 并且很难用几个跟踪站共同对星位作三角测量。无线电测距网在测量轨道速度时可以达到 $\pm 0.02\text{cm/s}$ 的精度。基于这种测量, 对跟踪站附近 1000—2000km 内的短弧轨道的计算精度目前有可能达到几十厘米之内。

在卫星站附近, 利用高精度的轨道参数和

高度计的测量结果, 再根据熟知的主要海洋物理过程, 人们完全有可能从测得的实际海面高度上推算平均海平面的数值, 而对平均海平面测量范围的逐步扩大和精确度逐步提高, 反过来又大大改进对卫星轨道的精确定位。高度计测量数据的积累本身也可以改进对轨道的测定精确度。在卫星连续的扫描运行中, 星下点轨道存在着大量重复的交叉测点。由于在较短的周期内, 海表面平均高度变化是极小的, 或者是可以推算的 (如潮汐)。因此高度计在任何交叉点上测得的数据的差异, 完全可以认为是由于轨道推算的误差所引起。根据这些数据, 调整轨道参数, 可使在全球数百个轨道交叉点上测量结果的均方偏差达到极小。这种方法为提高轨道推算精度提供了有效的途径。

利用全球海洋平均水平面和卫星轨道数据的反复互校, 轨道高度推算精度完全有可能达到 dm 级水平。

随着卫星轨道参数的精确度提高, 海面高度数据的积累, 平均海平面的测量精确度必然也会逐步提高。随之而来, 从实际海面相对于平均海平面的偏离和起伏中提取的海洋动态的潜在优势将日益显露。用卫星高度计绘制实际海面高度图, 这种测量方法所具有的系统自协性也是使科学家们寄予厚望的原因之一。

三、应 用

至今进入卫星轨道的 ATL 大都属于试验性的, 但所获得的有限数据资料已经证明了这种遥感方法现实应用的可能性。

首先, 根据 SEASAT-ATL 测量结果制成的海面高度图, 清楚地显示出海洋上的平均海平面有较大的起伏。在大西洋中脊上部, 海水堆积高度达 5m。在菲律宾海沟地区, 海面下陷达 60m 之多。在太平洋和印度洋海面上显示的几处异常的隆起, 第一次向人们提供了地壳下存在熔岩上升羽的直接证据。此外, 高度计获得的数据在细节上也比目前已知的重力分布图详细得多。

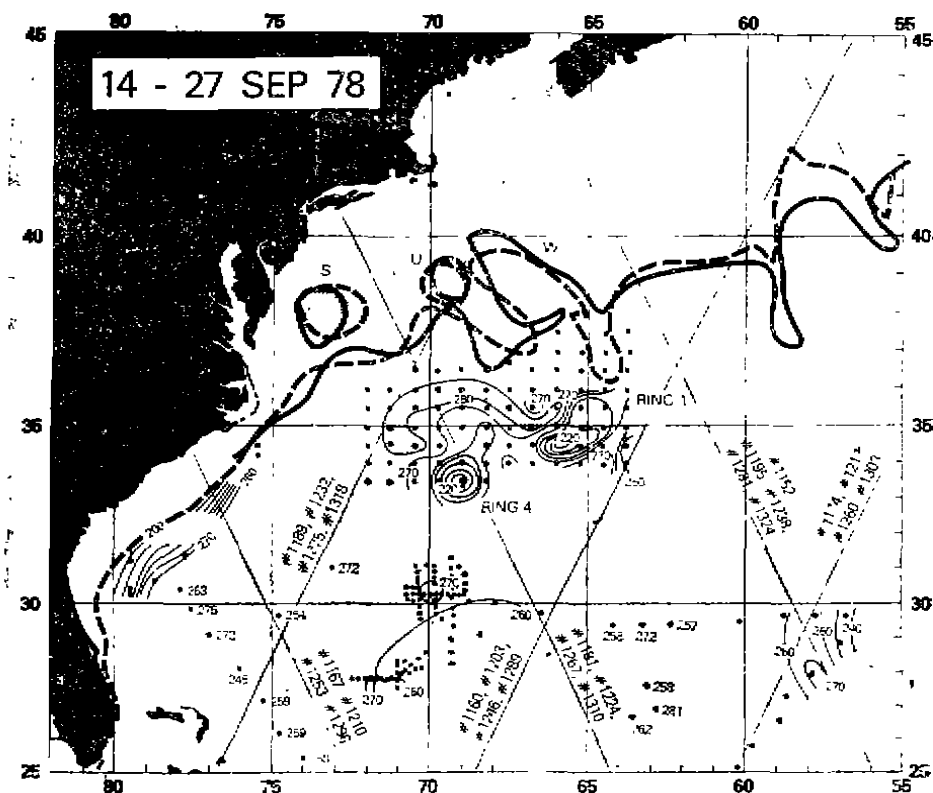


图 4 SEASAT 卫星在美国东南沿海湾流区附近的星下点轨迹

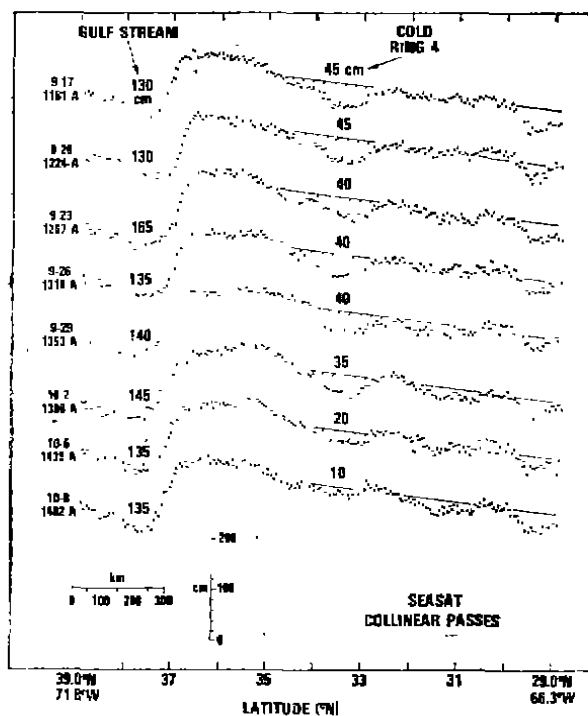


图 5 根据高度计在途经冷涡的路线上所测得的数据显示了 20 多天周期内湾流和冷涡的发展变化

在实际海面对平均海面的偏离或起伏方面，目前的测量精确度已经足以显示大尺度的洋流和较强的中尺度涡的存在。由于平均海平面是稳定不变的，利用卫星数据的连续观测，可以逐日跟踪这些重要的动力海洋学现象的强弱变化和位置迁移。图 4、5 是 SEASAT 高度计应用的一个实例。

现有的星载 ATL 系统，已经有可能用于计算两极地区覆盖冰场。如果精确度再提高一步，并逐年进行重复测量，就可以精确地确定覆冰量的年变迁。这一结果对冰川学和气候学有着重大的意义。

此外，海面散射回波的波形变化和散射功率都包含着有用信息。前者可以用来估测海面波浪的有效波高，精确度可以达 0.5m 以内。后者可用于观测极地冰场的边沿、海面风场、海流边界和冰原上雪的堆积。

参考文献(略)