

航空微波遥感观测海水表层盐度的研究进展

王永红^{1, 2}, M L Heron², Peter Ridd²

(1 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 詹姆斯库克大学 数学和物理科学学院, 昆士兰州汤斯维尔, 澳大利亚 4811)

摘要 盐度是海水的基本特征之一。在开敞海和海岸带进行长期的盐度测量具有重要的意义。利用航空微波技术观测海水盐度的研究始于 20 世纪 60 年代末, 经过 20 多年的不断探索, 近 10 年来这一技术研究有了较大的进展。将被动式微波辐射计装在小型飞机上对海水表层盐度进行观测, 可以获得同步、快速和大面积的海水表层盐度。目前, 已有多种微波辐射计在不同国家和地区的河口海湾和海洋得到使用, 如 ESTAR、SLFMR、STARRS、PALS 和 PLMR。使用航空遥感辐射计对海水进行观测, 目前, 校正后的盐度当分辨率为 1 km² 时数据准确度和精度都可以达到 1 psu。利用最新研发的双偏光微波航空遥感技术有望使校正后的盐度数值精度和准确度控制在 1 psu 以内。

关键词 海水表层盐度 航空遥感 进展

中图分类号: P716.12

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2007)01-0139-07

在海岸和海洋环境对盐度变化进行监测可以进一步地了解全球热量循环、海洋和大气环流、海平面变化等, 并且能更好地认识海岸和河口生态环境以及物理过程, 因此, 海岸和海洋环境的盐度测量工作显得极为重要。常用的方法如取水样在实验室进行分析, 或通过使用 CTD 来获得盐度, 都能获得较为准确的数据, 但是这些方法不能够同步快速地获取大面积的海水表层盐度数据。近 10 年来, 国外利用航空微波传感器来测量海水表层盐度的方法得到了发展, 使用这种方法可以弥补上述观测方法的不足。

1 航空微波遥感测量盐度的原理

所有的物体都发射电磁波。海水的微波辐射穿透能力较弱, 对海水的亮度温度有影响的是表层几毫米水深的海水。亮度温度的表达如下:

$$T_B = eT \quad (1)$$

发射率 e ($0 < e < 1$) 常被定义为品质因数, 用来表示辐射的有效率。如果 $e = 1$, 则发射体为黑体。如果假设热辐射体是个边界定义良好的半平面空间, 如大气和海水界面, 那么这时就可以通过解电磁波入射到两种不同电介质界面的边界值问题得到发射率:

基金项目: 国家自然科学基金项目(40406015); 河口海岸国家重点实验室开放基金项目(2005-3); 国家海洋局海底科学重点实验室开放研究课题基金(2004-1)

作者简介: 王永红(1969—), 女, 博士, 副教授, 主要从事河口海岸沉积动力和沉积环境研究, E-mail: yonghongw@hotmail.com

收稿日期: 2006-06-30, 改回日期: 2006-11-30, 文凤英编辑

$$e_{HV} = 1 - R_{HV} \quad (2)$$

这里下标 H 和 V 是指水平极化和垂向极化, R_{HV} 指界面反射系数, 表示为:

$$R_H = \frac{[\cos\theta_i - (\epsilon - \sin^2\theta_i)^{1/2}][\cos\theta_i + (\epsilon - \sin^2\theta_i)^{1/2}]}{2} \quad (3)$$

$$R_V = \frac{[\epsilon\cos\theta_i - (\epsilon - \sin^2\theta_i)^{1/2}][\epsilon\cos\theta_i + (\epsilon - \sin^2\theta_i)^{1/2}]}{2} \quad (4)$$

这里 ϵ 是介电常数, θ_i 是入射角。介电常数 ϵ 由 Debye^[1] 给出:

$$\epsilon = \epsilon_\infty + (\epsilon_s \epsilon_\infty) / (1 + i\omega\tau) - i\sigma / \omega\epsilon_0 \\ = [(\epsilon_\infty + \epsilon_s \epsilon_\infty) / (1 + i\omega^2\tau^2)] - i[\sigma / \omega\epsilon_0 + (\epsilon_s \epsilon_\infty) \omega\tau / (1 + i\omega^2\tau^2)] \quad (5)$$

这里 $\omega = 2\pi\nu$, 为辐射频率; ϵ_∞ 是频率无限大时的介电常数; ϵ_s 是静态介电常数; τ 是弛豫时间; σ 是电导率; ϵ_0 是自由空间的介电常数。如果从仪器正下方的地面向上看, 则反射系数 R 可以用边界值的解法表示:

$$R = \frac{|n - 1|^2}{|n + 1|^2} \quad (6)$$

其中 n 是发散体的复折射率, 是相对介电常数的平方根。

复介电常数的虚部主要由海水的欧姆传导率与电磁频率的比值决定, 如果电磁频率较低, 则导电性的效果(也就是盐度)就会显著。但是这种关系是较为复杂的, 因为 ϵ_s 、 σ 与 τ 都与温度和盐度有关。1977 年 Klein 和 Swift^[2] 发展了一种模式可以得到亮温和表面盐度之间的关系, 也就是亮度温度(T_B)和频率(f)、入射角(θ)、极化(p)、表面温度(T)以及盐度(S)的关系:

$$T_B = \Phi(f, \theta, \rho, S, T) \quad (7)$$

当其他参数已知时,即可以获得表面盐度。

2 影响因素和参数选择

对于采用航空遥感的方法观测海面,目标区的辐射能量包括海水本身的微波辐射、大气辐射、来自外层被海水表面反射的辐射等。对于一个较为平滑的海表面,可以用下面的方程描述亮度温度 T_B :

$$T_B(\theta) = \varepsilon(\theta)T_S + \sec(\theta) \int_0^h T_A(z)\alpha(z)(z, h, \theta)dz + (1 - \varepsilon)(\theta) \sec(\theta) \int_0^h T_A(z)\alpha(z)(\theta, \rho, z)dz + (1 - \varepsilon)^2(\theta)T_{ext} \quad (8)$$

这里 θ 是垂向视角 $(a, b, \theta) = \exp\left\{-\sec(\theta) \int_a^b \alpha(s)ds\right\}$ 是从高度 a 到 b 的大气透射率 $\varepsilon(\theta) = \varepsilon(\theta, h, \theta)$ 是从海水表面反射到天线中的大气透射率 $\alpha(z)$ 是由于吸收和散射造成的大气衰减 $(1 - \varepsilon)$ 是从海面的反射 $T_A(z)$ 是不同高度下的温度 T_S 是海洋表面温度 T_{ext} 是从外层的空间辐射,包括宇宙辐射 T_{cos} 、银河辐射 T_{gal} 、太阳辐射 T_{sun} 等,即

$$T_{ext} = T_{cos} + T_{gal} + T_{sun} \quad (9)$$

为了获得精确的海洋辐射亮度温度,也就是盐度,需要考虑所有对亮温有贡献的因素。

2.1 外层空间的影响

在(9)式中,宇宙射线项 T_{cos} 是各向同性的,表现为对亮度温度的固定贡献值 2.7 K(表1),因此并不影响观测的精度。银河辐射项 T_{gal} 在沿银河延伸方向是最强的,在银河的两端和中心之间的大小差值为 0.8~16 K。一般在计算时对银河的噪声估算值取平均值 0.98 K。如果选择合适的辐射计进行观测,可以将银河噪声减小到最小。太阳反辉辐射 T_{sun} 控制着海水表层向上的辐射,必须选择合适的时间和位置进行测量才能避免对亮温的影响,如果海水表面起伏较大,太阳光被发散到各个方向,将会影响到亮度温度的测量。

2.2 大气的影响

微波辐射在穿过大气时会由于大气的吸收和发散而衰减。微波辐射和电离层相互作用时,其极化平面发生旋转。由于对流层中氧和水蒸气等的含量较高,吸收和发散较为强烈。大气中氧的含量基本

是固定的,而且氧的吸收系数也是已知的,因此,相对来说可以较为直接地校正这一项。另外,尽管水蒸气的含量较高,但是在 L 波段被水蒸气吸收的微波较少,通常可以忽略。

表1 从仪器正下方观察的外层空间和大气对于亮温的贡献(据文献[3])
Table 1 The outer space and atmosphere contribution to the Brightness Temperature (observed underneath the instrument)

对亮温有贡献的因素	$T_{2.65\text{GHz}}/\text{K}$	$T_{1.43\text{GHz}}/\text{K}$
宇宙辐射 T_{cos}	2.7	2.7
银河辐射 T_{gal}	0.2	1.0
向下的大气温度 T_{DN}	2.2	2.1
波束的有效校正	0.4	0.14
总的大气透明度	0.009 1	0.008

由于在观测区内,光的极化平面在到达辐射计前会受到磁场的影响而发生法拉第旋转现象,旋转的程度取决于发射器和辐射计的位置以及地球磁场,频率为 1.4 GHz 时旋转的角度为 8.7° [4]。

2.3 海水状态的影响

对于一个较为平滑的海水表面,可以用方程(2)~(5)计算发射率,对于不平整的海水表面,必须使用经验公式。另外,当风速小于 7 m/s 时,表层泡沫的发射就会变得重要。Stogrn 和 Cardone[5]曾对海面泡沫的发射率作过模拟,也用飞机作过飞行试验,试图建立海面有泡沫部分的发射率和表层风速之间的方程,但是这个方程并不是很有效。这一问题仍然吸引着大量的研究。对于风速的校正 T_{WSP} ,可使用 Gabarro 等人[6]的公式:

$$T_{WSPV} = 0.24(1 - \theta/48)w \quad (\theta \leq 55^\circ, \mu \leq 15 \text{ m/s, 垂直极化})$$

$$T_{WSPH} = 0.25(1 + \theta/94)w \quad (\theta \leq 55^\circ, \mu \leq 15 \text{ m/s, 水平极化}) \quad (10)$$

其中 w 是风速, θ 为入射角。

2.4 参数的选择

考虑到以上的影响因素,在选择盐度遥感频率时,应该选择亮温对盐度较为敏感的波段。但是由于亮温同时受到温度和盐度的影响,因此,选择在一一定的频率下的波段使亮度温度随盐度的变化率应该比亮温随温度的变化率显著。基于这种考虑,一般都选择较低频波段。在大洋中观测时,由于盐度变

化范围窄(32~35 psu),从减小温度影响的角度考虑,微波频率一般选择 1.2~1.8 GHz。海岸带由于人为干扰信号较多,一般选择 1.4 GHz 波段,因为 1.413 GHz 为中心,宽度为 10 MHz 的波段预留给无限点天文学,并且受到保护。另外,极化和入射角也影响到亮温对于盐度的观测。一般来说,垂直极化好于水平极化。在垂直极化的方式下,入射角越大越好,但是一般不超过 45°。使用双极化的方法可以提高盐度的反演精度。

3 实验分析

3.1 航空遥感实验的发展历程

将被动微波辐射计与飞机相结合进行盐度等数据的观测研究始于 20 世纪 60 年代末。60 年代后期 Sirounian^[7]和 Paris^[8]认识到,在海洋表层 1~3 GHz 波段观测到的微波散射对海洋表层的盐度变化非常敏感,并开始探寻海洋表层微波散发和盐度之间的关系。Droppleman 和 Mennella^[9]报道了由 1.4 GHz 的微波辐射仪和 11 μm 的红外辐射计组成的实验系统。这个系统利用一个简单的固定横梁将仪器装在飞机上来观测密西西比河口大梯度的盐度变化。1973 年 Thomann^[10]使用一个相似的系统在墨西哥湾观测了海洋表层盐度变化。但是这些仪器在使用时,必须将 12~16 s 的所有数据进行平均才能获得可接受的盐度值,而且由于需要消除由飞行引起的噪声,因而空间分辨率无法达到可以接受的程度。

20 世纪 70 年代早期,热带风暴 Agnes 袭击了美国 Chesapeake 湾,由于连续不断的降雨,湾内盐度急剧降低,使贝类和甲壳类养殖业遭到了毁灭性的打击^[11]。虽然以前都是由海洋研究者为了研究的需要而采集水样和测量盐度,但是这次为了获得同步和大面积的盐度,大量的人力,包括渔民都动员起来在湾内大面积快速同步采集水样和测量盐度。正是这一原因促使 NASA Langley 发展了一种可以快速对大面积海洋表层盐度和温度进行遥测的仪器。

1977 年 NASA Langley 重新组建了上述用飞机测量盐度的系统,对于平均数据的时间可以控制在 1 s 以下^[3]。这个系统是由 1.4 和 2.65 GHz 的辐射仪组成,用于测量 Chesapeake 湾的表层盐度。另外一个重要的原因是 1977 年 Klein 和 Swift^[2]在研究中发现海洋表层的亮度温度和表层盐度以及温度的

运算关系,NASA 研究小组正是利用这一运算关系从亮度温度获得了盐度。

之后的整个 80 年代人们一直没有停止对这一方面的探索^[12],但是由于技术上的困难一直没有突破。直到 20 世纪 90 年代初,麻省理工学院(Institute of Massachusetts)微波遥感实验室、Quadrant Engineering、美国国家航空航天局空间飞行中心(NASA Goddard)以及美国国家海洋与大气管理局(NOAA, National Oceanic & Atmospheric Administration)共同联合,发展并测试了两种新的多波束成像仪器用来遥测表层海水电导率。同时,为了测量土壤的湿度,人们又设计了电子扫描系数天线阵辐射仪(the Electronically Scanning Thinned Array Radiometer(ESTAR))^[13]。后来人们将这一仪器装在 NASA P-3 型飞机上,对 Delaware 海岸盐度进行了测定^[14]。

20 世纪 90 年代中期,利用航空遥感进行海水表层盐度测定进入了快速发展时期。利用 L 波段微波信号从飞机上遥测海岸和河口表层的盐度可以提高盐度观测的分辨率和精确度。1993 年,由美国海军研究实验室(NRL, Naval Research Laboratory)、麻省理工学院、威廉马利大学海洋科学学院(College of William and Mary School of Marine Science)、老道明大学(Old Dominion University)、美国国家海洋和大气管理局环境卫星数据和信息中心(NOAA National Environmental Satellite Data and Information Service)共同开发的扫描式低频微波辐射计(the scanning low frequency microwave radiometer(SLFMR))装在直升机上在 Chesapeake 湾进行了测试飞行^[15]。1996 年 SLFMR 正式应用于由美国 NOAA 和 NRL 资助的有关 Chesapeake 湾的锋面研究,并第一次获得了航空海洋表层盐度分布图^[16]。用 SLFMR 所获得的数据经过校正后所获得的海洋表层盐度值的误差为 1.5。如果使用多个平均值进行盐度校正,可以将盐度的误差控制在 1~1.5 psu 之内^[12]。

20 世纪 90 年代末期,由上述单位为美国海军研制了敏感度更高的 STARRS(Salinity, Temperature and Roughness Remote Scanner)可以提供更为精确的飞机观测数据。1999 年 ESTAR 和 SLFMR 被同时应用在墨西哥暖流的研究中^[17]。随后对 PALS(the Passive/Active L/S-band Airborne Sensor)也进行了测试飞行^[16, 18-19],SLFMR 被应用于 Charleston 海港、南 Carolina 和附近的海岸区域,获得了 2 km 分辨率的盐度图^[20]。这些盐度数据的恢复需要现场实测盐度数据的校正。2000 年人们将 SLFMR 用

于澳大利亚大堡礁区域的河口羽状流的研究^[21], 获得了清晰的羽状流的界面。2004年新一代的仪器, 偏光 L 波段多波束辐射计(Polarimetric L-Band Multibeam Radiometer(PLMR))在澳大利亚多个大学联合使用。PLMR 有 6 个接收频道, 用推帚式(代替 SLFMR 的扫描式)模式, 6 个频道同步进行接收。希望可以更进一步提高所获数据的精度。2005 年这一仪器被用来对澳大利亚大堡礁海区泻湖进行了海洋表层盐度观测。

3.2 两种微波辐射计的介绍

3.2.1 扫描式低频微波辐射计 SLFMR

SLFMR 的工作原理主要是根据 Blume 等^[3]和 Ulaby 等^[5]的研究结果。接收机的设计主要由 NOAA/NESDIS 完成, 1993 年由 Quadrant Engineering 公司完成组装。SLFMR 使用的是迪克(Dick)开关技术。辐射计在 1.413 GHz 波段进行操作, 带宽 24 MHz, 使用 64 偶极天线, 排成 8×8 矩阵。应用 Bulter 矩阵形成 6 波束, 在横穿机身方向依次扫描形成锯齿状排列。每一个波束大约宽 15° , 从仪器下方向上看, 波束所形成的角度为 $\pm 8^\circ$ 、 $\pm 22^\circ$ 、 $\pm 37^\circ$ 和 $\pm 61^\circ$ 。可以通过计算机和相连的接收机控制每个波束的位置和扫描顺序。

系统的组件一般都安装在飞机外, 组件装载在一个受到热控制和空气动力状态的箱式装置内(图 1), 体积为 $1.5 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$, 重 52 kg。系统的其他组件放置在飞机内, 包括电力供应, IBM 可兼容式计算机, 用来进行 SLFMR 控制, 并从 SLFMR 获得数据, 还有红外辐射计和 GPS 接收机。计算机、GPS 和电力供应系统放在一个架式设备上, 这一架式设备的尺寸为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$, 重 32 kg。红外辐射计也放置在飞机内部, 通过一个在飞机底部切开的孔(直径为 0.15 m)观测下面的海水表层。红外辐射计尺寸为 $0.2 \text{ m} \times 0.15 \text{ m} \times 0.08 \text{ m}$, 重 2.3 kg。系统的操作为标准的 115 V AC 的电力供应, 在常规的飞行操作中, 电力要求最大为 320 W, 其中 200 W 用于计算机, 其他 70 W 用于 SLFMR 电子元件的热控制。

天线被安装在飞机上, 波束朝向下方, 当飞机飞行高度为 300 m 时, 每个波束大约是每测量 3.5 s 覆盖区为 1 000 m。用最小飞行速度为 70 m/s 的飞机进行飞行, 每进行下一个点测量时, 飞机就会飞行 250 m。沿着飞行轨迹, 每 1 000 m 得到 4 个样, 那么平均每获得 4 次样品的数据就可以得到 1 km 的空间分辨率。Prytz 等^[22]2002 年证实, 经过仔细校

正 SLFMR 观测到的单个样品的亮度温度可以达到 $\pm 0.5 \text{ K}$, 相应的盐度误差为 1 psu。除了微波辐射计, 有 6 个红外辐射计被用来观测海洋表层温度, 也就是每个波束对应一个横穿轨迹的轴点。6 个红外辐射计安装在 SLFMR 的后侧, 每个辐射计的波束宽 15° , 以便配合 SLFMR 的波束宽度。温度误差为 0.1° , 从而可以进行表层盐度的分析。



图 1 SLFMR 安装在机身下示意图

Fig. 1 SLFMR installed underneath the fuselage

3.2.1 推帚式低频微波辐射计 PLMR

PLMR 使用与 SLFMR 同样的观测方法。PLMR 所搭载的飞机飞行高度为 150 m 时, 分辨率为 50 m。飞机上同时还有热红外图像仪(飞行高度为 150 m 时分辨率为 1 m)、三频道扫描仪(NDVI, 飞行高度 150 m、分辨率为 1 m)、一个雷达高度计(150 的飞行高度, 0.1 m 的垂向和 1 m 的水平分辨率)和飞机姿态记录仪。另外, 还有数字摄像机和用于观测植物的蒸腾、热感应等的仪器, 可进行 4~8 h 或 800~1 500 km 的连续观测。PLMR 相对于 SLFMR 改进的地方是: PLMR 包括水平极化和垂向极化, 包含 6 个独立的接收频道, 信号通过接收机输出, 而不是通过天线输出, 而且 PLMR 使用的是推帚式观测, 而不是扫描式观测。PLMR 装在飞机上, 在陆地应用时主要测量土壤湿度, 在海上应用时用来测量海洋表层盐度。PLMR 的整套设备更轻, 可以安装在小型 Diamond Aircraft HK36TTC-ECO Dimona 型飞机上。机型小可以节约花费, 实速速度较低, 航测时飞机飞行速度较慢(40 m/s)。这样可以在同样空间分辨率内获得很多的数据, 根据现在正在进行的数据分析, 使用 PLMR 所获得盐度数据经过校正后精度可以控制在 1 psu 以内。

3.3 应用实例和校正分析

2000 年 3 月使用 SLFMR 在澳大利亚 Herbert 河口进行了羽状流的观测。Herbert 河流是一个间歇性河流, 受雨季的影响, Herbert 河口羽状流在落

潮期间流入大堡礁泻湖,除使用 SLFMR 进行观测外,还使用船进行了现场盐度观测。

飞机使用 GPS 进行导航,在翼部和尾部区使用 GPS 差分的方法,这些导航频道每一秒都进行记录,在实地观测时,河流正好处于小型洪水季节。图 2^[21]显示的是 2000 年 2 月 27 日使用 SLFMR 获得的 Herbert 河口的一个小型洪水事件。观测时海面较为平静,因而盐度为 24 psu 的羽状流持续了较长的时间。河口羽状流界线清晰可见,羽状流从其源区 Cape Upstart 到 Cairns 北侧长 380 km,使用 SLFMR 4 次飞行组成一个马赛克的区域,每次飞行平均需要 3.8 h。

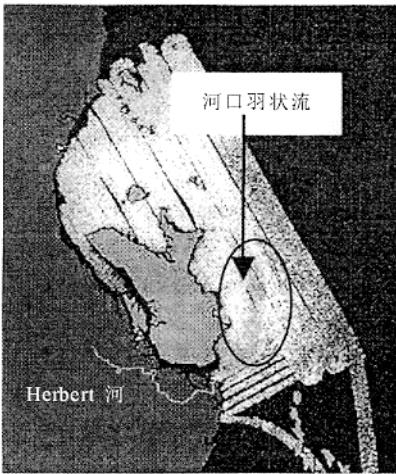


图 2 2000 年用 SLFMR 所获得的澳大利亚大堡礁区域海水表层盐度分布
(图中圈内较暗部分为 Herbert 河口羽状流)^[19]

Fig. 2 Sea surface salinity obtained by SLFMR in the GBR of Australia in 2000

SLFMR 输出的微波亮度温度和现场观测数据有一定的偏差,这是由于在仪器 SLFMR 内部,有一些热敏电阻测量仪器不同位置的温度。5 个热敏电阻测量偶极后面的天线板的温度,其中 4 个用来测 4 个角的温度,另一个测中心部位的温度,这样可以获得 5 个有关天线的温度值 T_{ant} 。在仪器内有一个加热器,以确保天线的温度保持在 40 °C。另有一个热敏电阻在天线屏蔽器左侧以测量外面空气的温度 T_{shell} 。在观测过程中如果飞行高度为 3 000 m,那么 T_{shell} 可以降低到 10 °C^[22]。

还有一个热敏电阻是用来观测 Butler 矩阵和波束转换器的温度 T_{but} ,另一个用来测量接收机背面尾端的温度 T_{RF} 。热敏电阻也用来观测内部校正噪声来源温度 T_{noise} 和 Dicke 开关负载的温度 T_{ref} 。辐

射计的设计原理表明,表面亮度温度 T_A 主要依赖于 T_{ref} 、 T_{noise} 和 T_{ant} 及辐射计内部的输出电压 V 。校正方程就包含这些参数(按照出厂公司的方程):

$$T_A = aV + bVT_{noise} + cT_{ref} + dT_{ant} + e \quad (11)$$

其中 a 、 b 、 c 、 d 和 e 指的是每个波束的校正系数。一般在出厂前厂家都会对仪器进行校正, a 、 b 、 c 和 d 是固定的系数,在正式飞行任务前需要进行飞行试验来调整 e ,以确保在使用 Klein 和 Swift 的公式时 T_A 经过转换获得表层温度为 0。这样在飞行任务结束后就可以现场使用 CTD 所获得的数据对飞行数据进行校正。在 Herbert 河口进行羽状流观测时使用当天的飞行数据和 CTD 数据进行校正效果较好 ($r^2 = 0.9$)。

4 讨论和结语

4.1 观测精度

目前航空遥感在 1 km² 的范围内所获得的盐度的精确度和准确度大约为 1 ~ 1.5 psu。全球海洋数据模拟试验(GODAE)有望在利用星载遥感所获得的 200 km × 200 km 范围内,其精度和准确度达到 0.1 ~ 0.2。虽然从目前所获得的数据精度来看达到这一精度仍然是一个挑战,但是如果盐度恢复的准确度不是很高,那么提供较高的时间和空间分辨率(如 50 km, 3 天的间隔,校正后盐度的精度误差为 0.5)对于大多数地区来说所获得数据就极为有意义,而且从目前的技术来看也是非常可行的。因此利用航空遥感所获得的盐度精度和准确度可以与卫星数据从分辨率上互相补充。应该注意的是为了在校正时获得高精度的数据,尽量在每次飞行前后都进行仪器的校正。

4.2 影响因素

影响因素包括元件的老化、大量的空间辐射、每一次飞行中周围和内部温度变化等。如果升温不足,仪器在飞行早期由于内部温度不平衡将会引起误差。另外,在较湿的热带空气中,天线屏蔽器上出现的水珠也可以引起校正的误差。观测平台的效果也是需要考虑的。轻型的飞机(无论是单引擎或是双引擎)飞行时间的选择、天气情况都会影响到最后数据的效果。

4.3 应用前景

航空遥感测量方法所获得结果与 CTD 以及水

样结果相比在精度和准确度上稍差,但是相对于CTD的点法测量结果来说,空中测量可以测定一个综合的区域如 3 km^2 的平均数据,这样随着遥感器观测精度的提高,平均值的精度也会逐渐提高,而且航空遥感可以对海水表层进行同步的实时观测,而用其他方法则无法进行。这种方法明显提供了一种可以对海岸海洋特征和过程进行观察和解释的重要方法。欧洲太空局准备在2006年发射第一颗卫星用于观测土壤湿度和海洋盐度(The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS));美国NASA计划于2008年发射卫星“水瓶号(Aquarius)”用来提供全球海水表层盐度的变化观测,从而揭示海洋环流和全球水循环的关系,帮助人们理解大尺度的海洋气候变化以及对全球气候的影响。随着航空和卫星遥感器发展的日益成熟,结合现场的CTD或者水样测定,三者从分辨率上来说互相补充,从数据上来说可以相互校正,从而对海岸和海洋的盐度分布提供更为准确、快速、同步的实时观测,因此,对于航空遥感器来说会有广阔的发展和应用前景。

参考文献(References)

- [1] Debye P. Polar molecules[M]. New York :The Chemical Catalog Co ,1929.
- [2] Klein L A ,Swift C T. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering ,OE ,1977 ,2(1):104-111.
- [3] Blume H J C ,Kendall B M ,Fedors J C. Measurement of ocean temperature and salinity via microwave radiometry[J]. Boundary-Layer Meteorology ,1978 ,13 :295-308.
- [4] Hollinger J P ,Lo R C. Low Frequency Microwave Radiometer for N-ROSS[R]. NRL report ,1981 ,481-27.
- [5] Ulaby F T ,Moore R K ,Fung A K. Microwave Remote Sensing : Active and Passive[M]. Dedham : Artech House , Inc. , 1986 : 21-62.
- [6] Gabarro C J , Font A C , MVall L. Retrieved surface salinity and wind speed from L-band measurements for WISE and EuroSTARRS campaigns[C]//Proceedings of the First Results Workshop on EuroSTARRS , WISE , LOSAC Campaigns. EAS , SP-525 , 2003 : 163-171.
- [7] Siroumian V. Effect of temperature , angle of observation , salinity , and thin ice on microwave emission of water[J]. Journal of Geophysical Research ,1968 ,73 :4 481-4 486.
- [8] Paris J F. Microwave radiometry and its applications to marine meteorology and oceanography[C]//In : Texas : College Station (Texas A & M Project 286-13) ,1969 :120-129.
- [9] McPhaden M J ,Frietag H P ,Shephard A J. Moored salinity time series measurements at 0-140 W[J]. J. Atmos. Ocean. Tech. , 1990 ,7 :569-575.
- [10] Thomann G C. Remote measurement of salinity in an estuarine environment[J]. Remote Sensing of Environment ,1973 ,2 : 249-259.
- [11] Goodberlet M A ,Swift C T ,Kevin K P , et al. Microwave remote sensing of coastal zone salinity[J]. Journal of Coastal Research , 1997 ,13(2) 363-372.
- [12] Skou N. Microwave Radiometer Systems : Design and Analysis [M]. Norwood , MA : Artech House , 1989.
- [13] Le Vine D M ,Griffis A ,Swift C T , et al. ESTAR : a synthetic aperture microwave radiometer for remote sensing applications [C]//Proc. IEEE. ,1994 ,82(12):1 787-1 798.
- [14] Le Vine D M ,Kao M ,Garvine R W , et al. Remote sensing of ocean salinity : results from the Delaware Coastal Current experiment[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology , 1998 ,15 :1 478-1 484.
- [15] Goodberlet M A ,Swift C T. A remote sensing system for measuring estuarine and coastal ocean surface salinity[R]. Progress Report #2 prepared for NOAA under contract 50-DKNA-1-00119 to US Dept. of Commerce ,1993 ,111 (Quadrant Engineering , Hadley , MA).
- [16] Lagerloef G S E. Preliminary Assessment of the Scientific and Technical Merits for Salinity Remote Sensing from Satellite[R]. Report of the 1st SSIWG Workshop held in La Jolla , California , 1998 7-8. <http://www.esr.org/lagerloef/ssiwg/ssiwgprep1.v2.html>.
- [17] Lagerloef G S E. Field Programs and Algorithms , Satellite and Science[R]. Report of the 3rd SSIWG Workshop held in San Antonio , Texas ,2000 22-23. http://www.esr.org/ssiwg3/SSIWG_3.html
- [18] Wilson J W ,Simon H Y ,Steven J D , et al. Passive active L- and S-band(PALS)microwave sensor for ocean salinity and soil moisture measurements[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing ,2001 ,39(5):1 039-1 049.
- [19] Wilson J W ,Simon H Y ,Steve J D , et al. High-stability L-band radiometer measurements of saltwater[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing ,2004 ,42(9):1 829-1 835.
- [20] Miller J L ,Goodberlet M A ,Zaitzeff J B. Remote sensing of salinity in the coastal zone[J]. EOS ,Transactions of AGU ,1998 ,79(14):3.
- [21] Burrage D M ,Heron M L ,Hacker J M , et al. Structure and influence of tropical river plumes in the Great Barrier Reef : application and performance of an airborne sea surface salinity mapping system[J]. Remote Sensing of Environment ,2003 ,85 : 204-220.
- [22] Prytz A ,Heron M L ,Burrage D M , et al. Calibration of Scanning Low Frequency Microwave Radiometer[R]. IEEE Oceans 2002 ,CEROM ,2 003-2 007.

PROGRESS IN MEASURING SEA SURFACE SALINITY BY USING AIRBORNE MICROWAVE REMOTE SENSING SYSTEM

WANG Yong-hong^{1 2}, Heron M L², Ridd Peter²

(¹ College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

² School of Mathematical and Physical Science, James Cook University, Townsville 4811, Australia)

Abstract Salinity is a fundamental property of seawater. It plays an important role in measuring the sea surface salinity in the open ocean and coastal zone. At present, salinity is routinely measured by traditional methods of collection of water with bottles and analyses done with a laboratory salinometer, or by direct in situ CTD measurements, and by airborne microwave remote sensing system.

The study of airborne microwave remote sensing technology began in 1960s, and great progress has been made in the past 10 years. The passive L-band microwave radiometer is mounted underneath the fuselage of an airplane and used to measure the sea water surface salinity and therefore the surface salinity can be obtained rapidly and synchronically in a large area. At present there are various microwave radiometers applied in different countries and areas such as ESTAR, SLFMR, STARRS, PALS, and PLMR. The accuracy and precision of surface salinity data obtained by the airborne microwave radiometers can reach 1 ~ 1.5 psu in a resolution of 1 km². It is expected that the accuracy and precision of the new microwave radiometer PLMR will be within 1 psu.

Key words: coastal ocean environment, airborne microwave remote sensing, progress