

文章编号: 1007-4619 (2000) 02-0112-06

# 无源微波遥感技术在海冰测厚中的应用研究

郭凤莲, 赵仁宇, 王维滨

(中国科学院 长春地理研究所, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 从理论上分析了海冰厚度的微波测量原理,介绍了测量海冰厚度的理论模型,给出了海冰介电常数的计算公式,微波辐射计测量海冰厚度的计算机自动处理系统及方法,并且将理论数据与实际测量数据进行比较,两者基本一致。

**关键词:** 微波遥感; 海冰厚度; 应用研究

**中图分类号:** TP79/P731.15 **文献标识码:** A

## 1 前言

严重的海冰冰情是自然界中重要灾害之一,海冰的产生对于海上交通运输、海洋资源开发、全球气候的变化等都有重大的影响。因此,世界发达国家对海冰监测的研究十分重视,采用各种手段进行监测研究。1969年,中国的渤海曾发生严重冰灾,50余艘船被困,石油钻井平台被推倒等灾害,造成重大经济损失<sup>[1]</sup>。为此,中国十分重视海冰监测及研究,并列入国家攻关项目。中国科学院长春地理研究所(简称长春地理所)从1986年与国家海洋局海洋技术研究所(简称海洋技术所)合作,用自行研制的多频段微波辐射计,在海岸边、破冰船上,飞机上对不同厚度、不同厚度的海冰进行大量测量,利用计算机自动遥感监测海冰厚度,从理论上对海冰微波辐射机理进行研究,建立了实用的理论模型,十多年来对海冰无源微波遥感进行了应用研究。

## 2 微波辐射理论

根据普朗克黑体的辐射定律,理想黑体的热辐射功率是波长和温度的函数,当黑体的温度增加时,辐射功率也增强,随着频率的降低,辐射量减小。在微波波段,其辐射功率与温度基本上是线性关系。普朗克定律可以用瑞利-琼斯关系表示:

$$P_B = \frac{2KT}{\lambda^2} \quad (1)$$

式中  $P_B$  代表黑体单位面积、单位频宽、单位立体角内辐射的总功率,  $K$  为波耳兹曼常数,  $T$  为物体的物理温度,  $\lambda$  为辐射波长。

如果物体是非理想黑体,其微波辐射功率,与物体表面粗糙度、复介电常数、温度、频率、极化方式以及入射角等参数有关<sup>[2]</sup>。我们把辐射系数  $e$  小于1的辐射体称为灰体。对于灰体可以用辐射亮温来表征它的辐射能力。辐射亮温的物理意义为,当灰体的辐射功率等于某一黑体的辐射功率时,被称为灰体的亮温  $T_B$  与其物理温度  $T$  的关系可表示为:

$$T_B = eT \quad (2)$$

## 3 海冰微波测厚理论模型

### 3.1 海冰测厚原理

利用分层介质电磁辐射模型可以分析海冰的微波辐射特性(图1)。电磁波从自由空间进入介质层,每层的特性由每层介质的复介电常数  $\epsilon$  和厚度  $d$  描述,其中  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  分别代表空气、海冰、海水的复介电常数。当电磁波入射到介质时,一部分被反射,而另一部分进入介质继续传播。设  $r$ 、 $e$  分别为反射率和辐射率,则:

$$e = 1 - r \quad (3)$$

收稿日期: 1998-10-23; 修订日期: 1999-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49276276)。

作者简介: 郭凤莲(1953—),女,1978年毕业于中国科学技术大学电子系微波专业,一直从事微波遥感专业研究工作,现任高级工程师。曾获国家科技进步一等奖等5项奖,发表论文10篇。

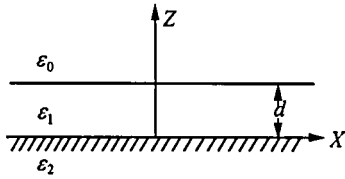


图 1 电磁波入射分层介质的几何模型

Fig. 1 Geometry model of electromagnetic waves in meadium

根据 Apinib 和 Peoke 的计算得:

$$e = (1 - r_i)(1 - Ar_w)/(1 + Ar_i r_w) + 2\sqrt{Ar_i r_w} \cos 2\beta d \quad (4)$$

式中:  $r_i$  为空气到海冰的反射系数,  $r_w$  为海冰到海水的反射系数,  $\beta$  为相位常数,  $d$  为海冰厚度,  $\alpha$  为衰减系数。

由(4)式可以看出海冰的辐射率  $e$  与其厚度  $d$  有着较复杂的函数关系。通过用微波辐射计测量出亮温  $T_B$  值和物理温度  $T$  可求出发射率  $e$ , 再用公式(4)计算出海冰的厚度  $d$ 。

由前面微波辐射理论可知, 物体的辐射亮温主要决定于它的发射率。不同物体的发射率不同, 海冰的发射率要大于海水的发射率。由微波辐射计测得的辐射亮温主要由两部分组成, 一部分是由海冰辐射形成的辐射亮温, 另一部分是由海水辐射形成的辐射亮温。海水的辐射要经过海冰的衰减, 海冰越厚, 衰减量越大, 海水的辐射对整体亮温的影响越小, 海冰的辐射对整体亮温的影响越大, 整体亮温值越高。反之, 海冰越薄, 整体亮温值越低。由此原理, 根据辐射计测得的整体辐射亮温值, 可以反推出海冰厚度值。但当冰层厚度超过某一厚度值时, 海水辐射绝大部分被衰减, 透过冰层的能量很少, 已不足以被辐射计识别。  $\delta$  为穿透深度,  $\lambda$  为辐射计波长,  $\epsilon'$ 、 $\epsilon''$  分别为介电常数的实部和虚部。

$$\delta = \frac{1}{\pi} \lambda \frac{\sqrt{\epsilon'}}{\epsilon''} \quad (5)$$

### 3.2 海冰介电常数的计算模型

文献[3]给出了海冰介电常数的计算公式:

$$\epsilon' = 4.9 + \frac{\epsilon_0 - 4.9}{1 + (2\pi f \tau)^2} \quad (6)$$

$$\epsilon'' = 2(\pi f \tau) \frac{\epsilon_0 - 4.9}{1 + (2\pi f \tau)^2} + \frac{\sigma_b}{2\pi f \epsilon_0} \quad (7)$$

### 3.3 海冰微波辐射模型

采用上述方法可以探测海冰的厚度, 但计算起来十分复杂, 有些参数不好计算, 难以实用。为了简

便、实用, 以达到用户定量遥感的要求, 我们研究出以下海冰微波辐射模型及计算方法。

分层媒质辐射模型:

无源遥感辐射方程为[2]:

$$\begin{aligned} \cos \theta \frac{d}{dz} \bar{I}(\Omega, Z) = & \bar{J}e - \bar{K}ab \cdot \bar{I}(\Omega, Z) \\ & - \bar{K}e \cdot \bar{I}(\Omega, Z) \\ & + \int d\Omega' \bar{P}(\Omega, \Omega') \\ & \cdot \bar{I}(\Omega', Z) \end{aligned} \quad (8)$$

当我们仅考虑对  $Z$  轴水平对称情况(此对称包括确定的对称关系和统计上的对称), 此时第三和第四斯托克斯参量为零, 其头两个分量已经足够, 因为  $I_v$  和  $I_h$  与  $\Phi$  角无关, 所以式(8)中  $d\Phi$  的积分可以进行。其结果为如下两个方程:

$$\begin{aligned} \cos \theta \frac{d}{dz} I_v(\theta, Z) = & K_{wv}(\theta) \cdot C \cdot T(Z) - K_{ev}(\theta) I_v(\theta, Z) \\ & + \int_0^\pi d\theta' \sin \theta' [(v, v') I_v(\theta', Z) \\ & + (v, h') I_h(\theta', Z)] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \cos \frac{d}{dz} I_h(\theta, Z) = & K_{wh}(\theta) \cdot C \cdot T(Z) - K_{eh}(\theta) I_h(\theta, Z) \\ & + \int_0^\pi d\theta' \sin \theta' [(h, v') I_v(\theta', Z) \\ & + (h, h') I_h(\theta', Z)] \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $v, h$  表示极化方式,  $T(Z)$  表示温度,  $I_v(\theta, Z)$ ,  $I_h(\theta, Z)$  为辐射强度,  $K_{wv}(\theta)$ 、 $K_{wh}(\theta)$  总损耗系数,  $K_{ev}(\theta)$ ,  $K_{eh}(\theta)$  为背景介质吸收系数。

对于层状散射体, 散射仅有两个方向耦合, 上行强度  $I(\theta, Z)$  和其镜面反射下行波在同一角度  $\theta$  时的强度  $I(\theta, Z)$ , 该两个极化是不耦合的, 则方程(9)、(10)可简化为方程(11), 即得到海冰的微波辐射亮温值  $T_B$  与海冰厚度  $d$  的关系式:

$$T_B = a - be^{-cd} \quad (11)$$

其中  $a, b, c$  为系数, 其计算方法及推导过程见文献[4]。

### 3.4 理论模型的计算步骤

理论模型的计算分为 3 个步骤: (1) 介电常数的计算[5,6]; (2) 矩阵系数的计算; (3) 求解矩阵方程。整个计算程序用 FORTRAN-77 高级语言编写, 并在计算机上调试通过。具体程序框图见文献[4]。

## 4 微波辐射数据的测量与处理

### 4.1 微波辐射计定标

为了定量的分析微波辐射遥感数据,必须对微波辐射计进行精确的定标,建立精确的定标方程。

我们所研制的微波辐射计,线性较好,相关系数  $R \approx 1$ ,所以辐射计所输入亮温值  $T_B$  与输出电压值  $V$  之间是线性关系,可写为:

$$T_B = A + BV \quad (12)$$

在此采用整机定标即把辐射计主机与天线作为一个整体,用专门研制的高精度噪声发生器,通过对高、低温二点的输入亮温  $T_B (T_h, T_L)$  值及输出  $V (V_h, V_L)$  值的测量,可求出:

$$A = \frac{V_h \cdot T_L - V_L \cdot T_h}{V_h - V_L}$$

$$B = \frac{T_h - T_L}{V_h - V_L}$$

### 4.2 数据测

根据定标方程  $T_B = A + BV$ ,用辐射计可以对被测目标即对不同厚度的海冰测出其亮温值  $T_B$ ,获取大量的测量数据。

### 4.3 数据处

在获得大量不同冰厚及对应的亮温值的基础上,进行曲线拟合。曲线模拟关系式见公式(11)即  $T_B = a - be^{-cd}$ 。其中  $a, b, c$  的计算见文献[4]。

## 5 海冰厚度的计算机自动监测系统

利用微波辐射计、测量数据处理中的曲线拟合技术、计算机技术以及无线发射和接收装置,可以实现海冰厚度的自动监测。其框图见图 2。

计算机自动监测系统的工作过程:机载微波天线接收海冰微波辐射信号,经辐射计转化为电压信号  $V_i$ ,  $V_i$  经过 A/D 转换器由模拟量转化为数字量  $V(1)$ ,此数字信号通过定标方程的计算,转化为辐射亮温值  $T_B$ ,  $T_B$  再由拟合方程转化为冰厚值  $d_{(i)}$ ,  $d_{(i)}$  通过 D/A 转换器转化为模拟量,即可送到记录仪记录,也可以把冰厚值以及用 GPS 系统所测的飞机座标值同时送入机载微机,这样在机上就把机下点海冰厚度显示或打印出来。另外,也可以通过实时无线发射机把冰厚值及座标值同时传送到地面接

收机,再通过微机实现显示和打印。整个工作过程,从辐射信号接收到显示、打印冰厚值均由计算机编程实现,从而使海冰冰厚的测量、处理系统实现了自动化。此海冰自动监测系统可应用于航空遥感。

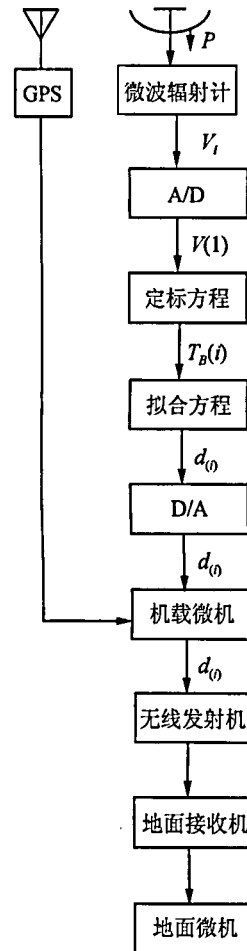


图 2 计算机自动监测系统图

Fig. 2 Computer automatical process system graphics

系统技术指标:天线口径:  $430 \times 320 \times 650$ ;波束宽度:  $16.5^\circ \times 18.5^\circ$ ;增益:  $> 30$  dB;中心频率:  $3.0$  GHz;频带宽度:  $> 400$  MHz;灵敏度:  $0.2$  K;动态范围:  $100-300$  K;线性相关系数:  $> 0.997$ ;A/D 转换器为  $12$  位;D/A 转换器为  $12$  位;传输距离:  $800$  km;数据有效接收率  $> 85\%$ ;测点位置精度  $< 100$  m

在计算机自动监测系统中,拟合方程的准确与否直接影响到系统的处理精度,为了保证拟合方程的准确,必须在大量实验的基础上,建立数据库。利用数据优化技术对测量数据进行优化<sup>[7]</sup>,删除不合理的测量数据,利用曲线拟合技术对测量数据进行处理<sup>[8]</sup>,即可得到较为准确的拟合方程。

## 6 遥感监测

无源微波遥感监测海冰厚度是一项比较复杂的

工作,至今世界上还没有解决海冰厚度的精确测量问题,这主要是由于海冰具有复杂的物理特性。我们通过在海岸边、船上、飞机上,对海冰的大量测量实验,进行分析处理,给出比较准确、实用的微波辐射监测海冰厚度的理论模型及方法。

### 6.1 海冰冰厚的测量

从1986年到1997年,长春地理所和海洋技术所的科研人员,使用长春地理所研制的多频段微波辐射计在辽东湾、渤海湾,对中国海冰进行了测量实验,获得了大量的微波辐射数据,下面给出部分实验曲线。

图3、4、5、6给出了辐射计波长分别为8 mm、5 cm、10 cm、21 cm时海冰的辐射亮温与冰厚的关系。对于8 mm辐射计来说,海冰辐射亮温  $T_B$  在冰厚  $d < 5$  cm,  $T_B$  变化量大;在  $d > 5$  cm,  $T_B$  变化量减小;当  $d > 15$  cm,  $T_B$  基本趋向饱和。当辐射计波长为5 cm时,  $T_B$  与  $d$  呈指数关系,随着  $d$  的增加,  $T_B$  的变化量逐渐减少。对于10 cm辐射计,  $T_B$  与  $d$  也呈指数关系,但相对于同样的  $d$  变化量,  $T_B$  的增量比波长为5 cm时要小。当辐射计的波长为21 cm时,  $T_B$  与  $d$  基本呈线性关系,随着  $d$  的增加,  $T_B$  线性增加。

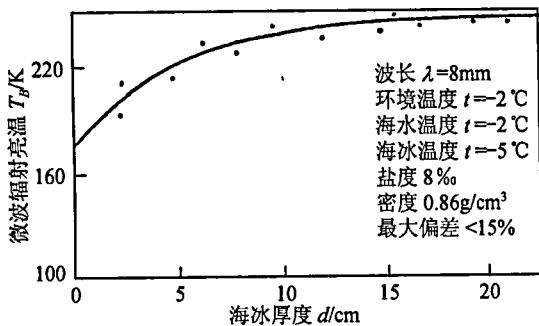


图3 海水微波辐射亮温与冰厚的关系

Fig. 3 Brightness temperature of ice VS thickness

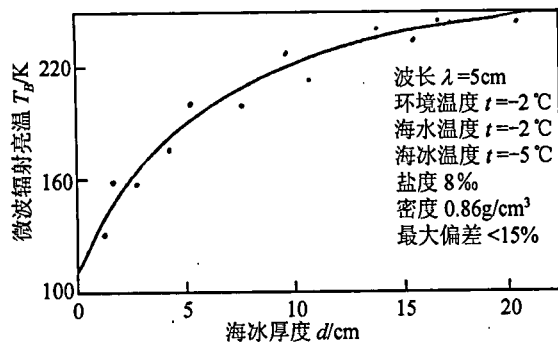


图4 海冰微波辐射亮温与冰厚的关系

Fig. 4 Brightness temperature of ice VS thickness

运用数据处理中的拟合技术对图3、4、5、6进行

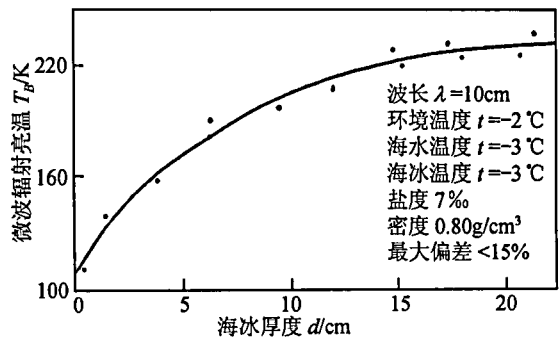


图5 海冰微波辐射亮温与冰厚的关系

Fig. 5 Brightness temperature of ice VS thickness

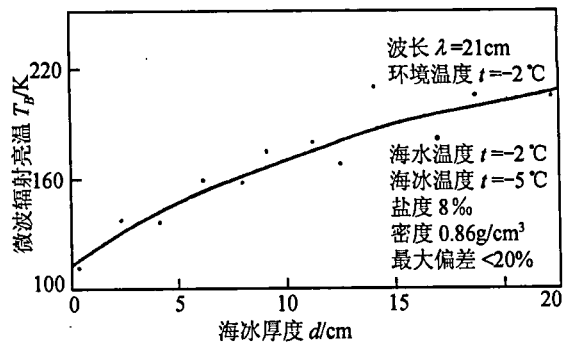


图6 海冰微波辐射亮温与冰厚的关系

Fig. 6 Brightness temperature of ice VS thickness

处理,可以得到海冰亮温和海冰厚度的拟合曲线其拟合方程为:

$$\lambda = 8 \text{ mm}: T_B = 242.79 - 66.12e^{-0.263d}$$

$$\lambda = 5 \text{ cm}: T_B = 250.25 - 147.95e^{-0.18d}$$

$$\lambda = 10 \text{ cm}: T_B = 239.30 - 132.61e^{-0.138d}$$

$$\lambda = 21 \text{ cm}: T_B = 219.76 - 119.66e^{-0.89d}$$

以10 cm微波辐射计测海冰为例,说明利用海冰亮温和海冰厚度的拟合方程  $T_B = 239.4 - 132.61e^{-0.138d}$  探测的海冰厚度与实际测量海冰厚度的误差见表1。

表1 计算的海冰厚度与实测海冰厚度的比较

Table 1 Comparison between computed and measured sea ice thickness

亮温值 $T_B/K$	按公式计算冰		实际测量冰 厚值 $d_2/cm$	误差/%
	厚值 $d_1/cm$			
134.9	1.73	2.0	13.5	
171.5	4.86	5.7	14.7	
206.3	10.19	9.5	7.2	
226.7	17.05	16.0	6.5	
228.0	17.86	19.7	9.3	
233.3	22.47	24.5	8.3	
236.5	27.9	29.8	5.3	
237.9	33.0	35.0	5.7	
238.6	38.39	39.8	3.5	

通过以上分析,可以得到如下结论:(1)随着海冰厚度的增加,海冰辐射亮温呈上升趋势,并逐渐趋于饱和。(2)在相同冰厚的情况下,对于波长不同的辐射计,海冰的辐射亮温不同。辐射计波长越小,海冰辐射亮温值越大。

这一规律与穿透深度相对于辐射计波长的变化规律相同。从中我们可以得到:在不考虑其它因素的情况下,要测海冰的厚度,尽量选择波长较大的辐射计为好。

## 6.2 该系统的应用实例

1993年1月,长春地理所和海洋技术所的科研人员在辽东湾进行了航空遥感飞行实验,使用10 cm微波辐射计,飞机飞行高度1500 m,飞行速度60 m/s,计算机自动给出遥感监测海冰厚度。

图7给出了飞机飞行中所得到的海冰辐射亮温与冰厚的关系图。图中点为多次飞行的测量数据,曲线(1)为飞行测量数据的拟合曲线。

曲线(2)为根据分层理论计算而得的海冰辐射亮温曲线。当 $d$ 较小时,理论曲线与拟合曲线相差较大,但随着 $d$ 的增加,两条曲线逐渐接近。可以得出结论:在海冰冰厚值大于10 cm时分层理论模型的计算值与实际测量值有较好的吻合。对海冰灾害的监测是实用的。

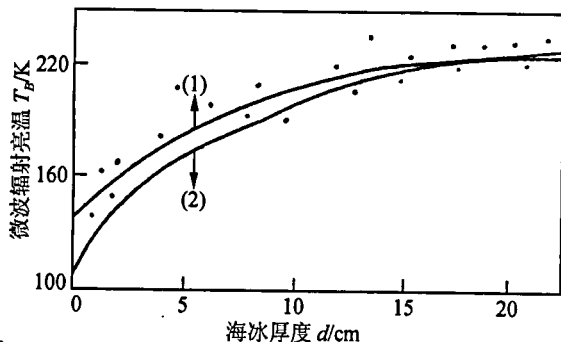


图7 海冰微波辐射亮温与冰厚的关系

Fig. 7 Brightness temperature of ice VS thickness

1996年2月5日起我们利用5 cm、8 mm微波辐射计以中国海军破冰船为平台,在北纬38°28′—40°38′,东经118°01′—121°58′的海域对海水、海冰进行微波辐射测量,其破冰船航行图见参考文献[9]。在1996年2月6日,我们用5 cm、8 mm微波辐射计,

以中国海监3808号飞机为平台,在北纬38°54′—40°38′,东经118°20′—121°58′的海域上空进行飞行。在多点与破冰船同步或准同步对有关海水海冰进行微波辐射测量,其航线见参考文献[9]。测量结果:从飞机上测量的海水亮温为109.69K,从破冰船上测量的海水亮温值为108.19K,误差为1.5K,整机定标系统精度达到2K。由于本次试验飞机与破冰船完全同步测量站点较少,所以只在几个站点检验测冰厚的精度。对于站点E利用机上测量系统测得冰厚值为17.8cm,破冰船上实测冰厚值为15.1 cm,对于站点F利用机上系统测量冰厚为23.4cm在破冰船上测量冰厚值为20.2 cm。其误差小于20%。实践证明该项研究在微波遥感监测海冰厚度中是实用的。但尚需进一步研究提高其探测精度。

## 参考文献 (References)

- [1] Wu Peizhong. Study on Sea Ice Remote Sensing and Application [M]. Beijing: Ocean Press, 1992. [吴培中. 海冰遥感研究与应用[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.]
- [2] Wang Baofa. Theory of Microwave Remote Sensing [M]. Beijing: Spaceflight-Aviation University Press, 1989. [王宝发. 微波遥感理论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989.]
- [3] Jin Yaqiu, Zhang Junrong, Zhao Renyu. Remote Sensing of Sea Ice by Multifrequency Microwave Radiometers and Numerical Modeling of Radiative Transfer [J]. *Remote Sensing Environment*, 1992, 7(1): 33—38. [金亚秋, 张俊荣, 赵仁宇. 海冰微波辐射的数值模式和遥感实验测量[J]. 环境遥感, 1992, 7(1): 33—38.]
- [4] Wang Weibin. Study of Passive Microwave Remote Sensing To Sea Ice Thickness Measurement [D]. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, 1994. [王维滨. 被动式微波遥测海冰厚度的研究[D]. 长春光学精密机械学院, 1994.]
- [5] M. R. Vant. *et al.* The Complex-dielectric Constant of Sea Ice at Frequency in the Range 0.1—40GHz [J]. *Appl. Phys.*, 1982, 49 (3): 78—82.
- [6] F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung. Microwave Remote Sensing [M]. Vol. 3. Artech House, 1986.
- [7] Department of Mathematics Nankai University. Optimal method [M]. Beijing: Science press, 1978. [南开大学数学系. 最优化方法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.]
- [8] Zhang Chenying, Liu Zhijing. Data processing of measurement [M]. Beijing: Science press, 1987. [张臣英, 刘智敬. 测量实践的数据处理[M]. 北京: 科学出版社, 1987.]
- [9] Aerial Simulation Test Group, State Oceanographic Bureau. Aerial Simulation Test [R]. 1995. [国家海洋局航空模拟试验组. 航空模拟试验[R]. 1995.]

## Application of Passive Microwave Remote Sensing to Sea Ice Thickness Measurement

GUO Feng-lian, ZHAO Ren-yu, WANG Wei-bin

(*Changchun Institute of Geography Academia Sinica, Changchun 130021, China*)

**Abstract:** In recent years, microwave radiometry has been developed as a powerful technique for remote Sensing of Sea ice in China. Since 1986 the thermal emission from sea ice in Liaodong Bay and Bohai Bay has been measured by multi-frequency microwave radiometers designed by Changchun Institute of Geography, Academia Sinica.

The paper analyzes the microwave measurement principle of sea ice thickness, introduces the model of theory about its measurement and provides the calculation formulation for sea ice radiation constant as well as the process of microwave radiometer data. The relationship between brightness temperature and sea ice thickness, salinity, temperature, frequency, polarization, etc, has been experimentally obtained. In the end, it introduces the Computer automatical process system of measurement of sea ice thickness, compares the result of theoretical calculation with the ones of practical measurement, and almost obtains the same result.

**Key words:** microwave remote sensing; measurement of sea ice thickness; applied research