

# 海冰微波辐射传输模式和实验研究

吴明钰 罗 贤

(国家海洋局海洋技术研究所 天津 300111)

**摘 要** 海冰是影响地球热循环的重要因素。以海冰和海水的微波热辐射为源,并通过位于海面遥感海冰的3层分层介质系统的分析,取得中间介质厚度与所接收到的辐射亮温有如下模式:  $T_B = A + Be^{-CD}$ 。其中  $A, B, C$  与遥感系统的极化,使用角度和角频率有关,可以通过实际地面的海冰测试试验获得。该模式符合电磁场在有损介质中的传播特性,反映出被动微波遥感所接收到的能量与传播距离的关系。近几年来,根据该模式,使用4个频段微波辐射计在地面进行实测(入射角为 $0^\circ$ ),在飞行中使用3个频段,结果空中和地面基本符合。实践证明其模式是正确的可行的。文中给出在辽东湾测得航线上的冰厚度分布和亮度温度与冰厚度的统计曲线。最后指出影响测量并限制对厚度识别的几种因素。

**关键词** 海冰,被动微波遥感,模式

## 1 前 言

随着电磁波理论的发展,微波遥感优越性更加突出,微波遥感也得到更加广泛的应用。利用微波遥感对海冰进行研究是一种既有基础性又有实用性的工作。

海冰是海洋的重要参数之一,它的厚度说明吸收热量的多少,不仅对气候有巨大影响,对海上交通和海上工程均有重大的影响,如1969年渤海石油平台受海上流冰的挤压,造成巨大的损失。了解海冰的厚度对作好灾害性冰情预报是十分重要的,对大气的热交换研究也是很重要的。

微波被动遥感是利用处在绝对零度以上的物体都会在整个电磁波谱上向外辐射电磁能量的原理来探测物体的基本特性。本研究是以海水和海冰的热辐射为波源,通过接收透过冰层后的热辐射能量探测冰层厚度。

本文主要通过模拟实验测试系统的非相干分层介质微波传输的分析,导出对海冰厚度识别的基本物理模式,指出对厚度识别的限制因素。

通过几年来在渤海和黄海北部海冰航空遥感实践,验证了模式正确性。

## 2 理论基础

### 2.1 热辐射

海冰厚度的被动微波遥感是以海冰和海水的微波段热辐射为电磁波源,分析这些热辐射通过冰层后的关系。微波段热辐射可用量子物理学的普朗克(Planck)电磁辐射定律说明。

根据量子物理学的普朗克电磁辐射定律,对于黑体来说,其谱亮度为

$$B_f = 2hf^3/[c^2(e^{hf/kT} - 1)]$$

其中:  $h$  为 Planck 常数( $6.634 \times 10^{-34}$  Js);  $k$  为 Boltzman 常数( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K);  $T$  为物理学温度(单位为绝对温度 K);  $f$  为频率(Hz);  $c$  为光速(m/s)。

在微波频段,因  $hf/kT \ll 1$ ,利用近似公式,  $e^x - 1 = (1 + x + x^2/2 + \dots) - 1 \approx x$  ( $x \ll 1$ ),则上式可以简化为瑞利-琼斯(Rayleigh-Jeans)电磁辐射定律,波长为  $\lambda$  处辐射功率谱亮度为:

$$B_f = 2kT_B/\lambda^2$$

对黑体:  $T_B = eT, e = 1$ ;

对非黑体:  $T_B = eT, 0 < e < 1$ ;

其中:  $e$  为辐射率;  $T$  为物体的物理温度(单位以 K 表示)。

物体的辐射,作为被动遥感中的电磁波源来分析。

### 2.2 电磁波在有损介质中的传播特性

根据麦克斯威尔电磁波动方程

$$\Delta \times H = J_f + \partial D / \partial t$$

$$\Delta \times E = -\partial B / \partial t$$

$$\Delta B = 0$$

$$\Delta D = \rho_f$$

电磁波在有损介质中传播,其介电常数  $\epsilon$  为复

数,传播速度:  $V = 1 / \sqrt{\mu\epsilon}$ ; 波阻抗:  $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ ,  $\gamma^2 = -\omega^2 \mu\epsilon$ 。

为讨论方便,我们取电场方向作为坐标  $X$  方向,因此电场只有  $X$  分量,磁场只有  $Y$  分量,可以解出传播常数:  $\gamma = \alpha + j\beta$

$$E_x = E_1 e^{-\gamma z} = E_1 e^{-\alpha z} \cdot e^{-j\beta z}$$

$$H_y = (E_1 / \eta) e^{-\gamma z} = (E_1 / \eta) e^{-\alpha z} \cdot e^{-j\beta z}$$

则电磁场瞬时值:

$$E_x(z, t) = E_1 e^{-\alpha z} \cdot \cos(\omega t - \beta z)$$

$$H_y(z, t) = (E_1 / \eta) e^{-\alpha z} \cdot \cos(\omega t - \beta z - \phi)$$

电磁场的能量功率流用坡印廷(Poynting)矢量表征

$$\begin{aligned} P &= E \times H \\ &= E_1 e^{-\alpha z} \cdot \cos(\omega t - \beta z) \cdot (E_1 / \eta) e^{-\alpha z} \\ &\quad \cdot \cos(\omega t - \beta z - \phi) \\ &= (E_1^2 / \eta) e^{-2\alpha z} \cdot \cos(\omega t - \beta z) \\ &\quad \cdot \cos(\omega t - \beta z - \phi) \end{aligned}$$

可见电场强度的振幅沿有损介质的纵深按指数衰减,其功率也沿纵深按指数衰减<sup>[1]</sup>。

以上理论分析指出,在有损介质中,由于电磁波在传播方向上波的功率按指数规律减少,因而所接收到的辐射能量一定与传播距离(中间介质厚度)有关。这是利用辐射测量冰厚度的基本原理。

在海洋中冰层厚度是不断变化的,它本身具有热辐射,同时对辐射传输产生衰减,它们的具体关系需要用模拟遥感系统的分析方法求出。

### 3 辐射传输物理模式的导出

海冰位于大气和海水之间,有明显分界面,可运用分层介质非相干的分析方法<sup>[2,3]</sup>研究。在处理过程中考虑到冰层是由气泡、盐泡和冰晶组成,对于一年冰,可以认为在结构和成分上是均匀的。

对于辐射计位于冰面上空气层的检测海冰厚度的遥感系统,可以看成是由空气、海冰和海水构成的有分层界面的 3 层介质系统(图 1)。

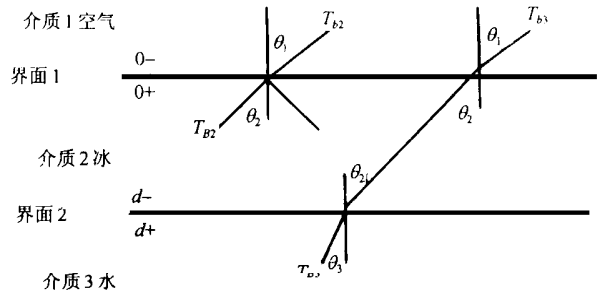


图 1 辐射计测得亮温为冰层和水层二者发射的总和  
Fig. 1 Brightness temperature measured by radiometer is the sum of two kinds of emission from ice layer and water layer

冰层厚度的遥感,是研究冰体和水体的辐射在穿过冰层之后,其能量与路径(冰层厚度)的关系。当辐射计测量天线位于海面状态时,我们就可不考虑大气所造成的影响,只考虑由冰层透过来  $\theta$  角度和  $P$ (H 或 V 极化)极化的能量。

为简单起见,我们设第 2 层介质海冰为均匀各向同性的状态,利用辐射传输理论计算入射到媒质 1,即到空气中的最终发射,其亮度温度  $T_B(\theta, P)$  由两部分组成:

$$T_B(\theta, P) = T_{B2}(\theta, P) + T_{B3}(\theta, P)$$

其中  $T_{B2}(\theta, P)$  为第 2 层介质(海冰)发射在第 1 层介质上产生最终视在温度贡献;  $T_{B3}(\theta, P)$  为第 3 层介质(海水)发射在第 1 层介质上产生最终视在温度贡献。

然而,第 2 层贡献还因为辐射的各向同性,要考虑其向上部分和向下部分通过第 2 层界面 1 和界面 2 之间多次反射透过界面 1,而进入第 1 层的部分的总和(图 2)。

$$T_{B2} = T_{2u} + T_{2D}$$

第 3 层辐射也要考虑其透过界面 2,在层 2 中多次反射后透过界面 1,而进入第 1 层的值(图 3)。

设在层 2 中有一薄层  $\xi$ ,在  $\theta_2$  方向上发射到边界 1 的微分能量,表示为:

$$dT_{s2}(\theta, \xi) = \sec \theta_2 k_{a2} T_2 d\xi$$

式中  $k_{a2}$  和  $T_2$  是层 2 的吸收系数和温度计测量温度(物理温度)。根据前面设定的均匀性,结果在  $\xi = 0$  处(刚好在界面 1 的下面),所接收到的该层的发射能量是:

$$dT_{s2}(\theta_2, 0^+) = dT_{s2}(\theta_2, \xi) e^{-k_{a2} \cdot \xi \cdot \sec \theta}$$

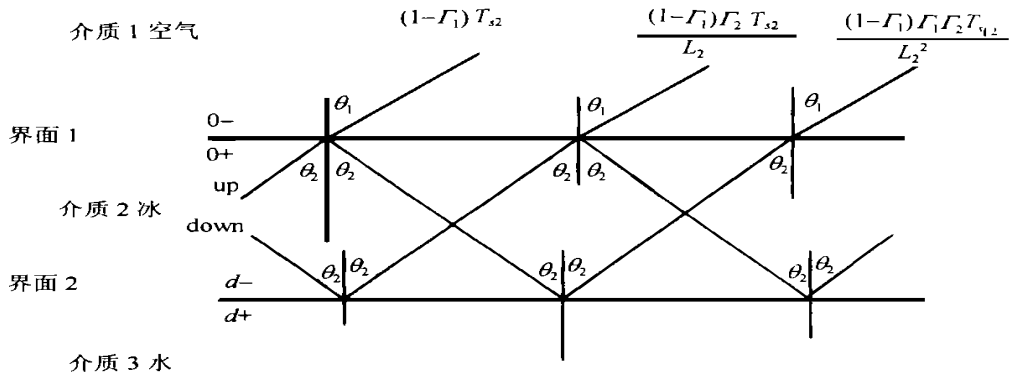


图 2 第 2 层向上和向下的发射

Fig. 2 Upward and downward emission from layer 2

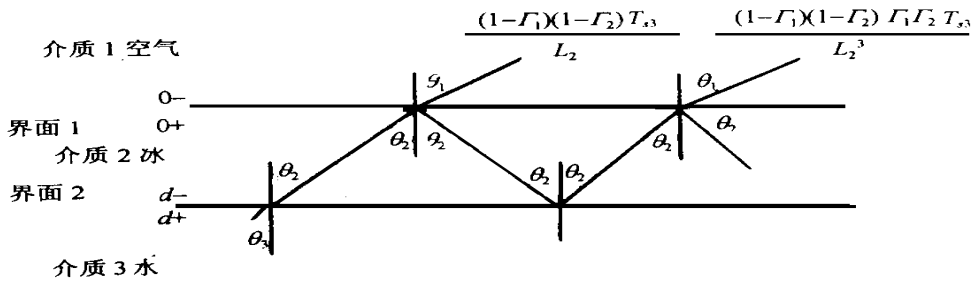


图 3 第三层的向上发射

Fig. 3 Upward emission from layer 3

式中指数项表示在传播路径上电磁场能量路径损耗,被称为消光。由于同时包含着吸收和散射,采用消光系数  $k_{e2}$  表示。

$$k_{e2} = k_{a2} + k_{s2} = (1 + a_2)k_{a2}$$

第二项  $a_2$  表示单次散射反照率。

如果  $a_2 = k_{s2}/k_{a2}$  相当小,漫散射可以忽略,在  $\xi^{0+}$  处,

$$T_{s2}(\theta_2, 0^+) = \int_0^d dT_{s2}(\theta_2, 0^+)$$

将上式代入积分得:

$$T_{s2}(\theta_2, 0^+) = (1 - a_2)T_2(1 - 1/L_2)$$

其漫散射忽略不计,当  $a_2 = 0$  时,

$$L_2 = e^{k_{a2} \cdot d \cdot \sec \theta}$$

$$T_{s2} = T_2(1 - 1/L_2)$$

当边界 1 的反射系数为  $\Gamma_1$ , 边界 2 的反射系数为  $\Gamma_2$  时,在边界 1,  $T_{s2}$  的一部分穿过边界 1 为  $T_{s2}(1 - \Gamma_1)$ , 一部分被反射为  $\Gamma_1 T_{s2}$ , 被反射的部分在它传输到边界 2 的过程中,损耗因子为  $L_2$ , 然后在边界 2 上一部分反射回边界 1, 即为:  $(\Gamma_1 T_{s2}/L_2) \cdot [(\Gamma_2(1 - \Gamma_1))]$ , 另一部分透到第 3 层。

第 2 层向上部分的总和为

$$T_{2u} = (1 - \Gamma_1) T_{s2} + (1 - \Gamma_1)(\Gamma_1 \Gamma_2/L_2^2) T_{s2} + (1 - \Gamma_1)(\Gamma_1 \Gamma_2/L_2^2)(\Gamma_1 \Gamma_2/L_2^2) T_{s2} + \dots$$

$$= (1 - \Gamma_1) T_{s2}(1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots)$$

式中  $x = \Gamma_1 \Gamma_2/L_2^2$ 。

由于  $\Gamma_1 \leq 1, \Gamma_2 \leq 1, L_2 \geq 1$ , 所以  $\Gamma_1 \Gamma_2/L_2^2 \leq 1$ , 结果上式可以看成二项展开式:

$$T_{2u} = (1 - \Gamma_1) T_{s2}/(1 - \Gamma_1 \Gamma_2/L_2^2)$$

因为第 2 层各向同性的辐射在  $\xi = d$  处(恰好在边界 2 之上)的总量,按级数收敛为:

$$T_{2D} = [\Gamma_2(1 - \Gamma_1) T_{s2}]/[L_2(1 - \Gamma_1 \Gamma_2/L_2^2)]$$

于是两个分量相加为

$$T_{B2} = T_{2u} + T_{2D} = [(1 + \Gamma_2/L_2)(1 - \Gamma_1) T_{s2}]/[1 - \Gamma_1 \Gamma_2/L_2^2] = \{[(1 + \Gamma_2/L_2)(1 - \Gamma_1)]/(1 - \Gamma_1 \Gamma_2/L_2^2)\} \cdot (1 - 1/L_2) T_2$$

通过类似方法可以看出第 3 层贡献  $T_{s3}$ , 因海水具有半无限空间, 则  $T_{s3} = T_3$

$$T_{B3} = [(1 - \Gamma_1)(1 - \Gamma_2) T_3] / [L_2(1 - \Gamma_1 \Gamma_2 / L_2^2)]$$

把所有的量代入, 结果:

$$T_B(\theta, P) = [(1 - \Gamma_1) / (1 - \Gamma_1 \Gamma_2 / L_2^2)] \times [(1 + \Gamma_2 / L_2)(1 - 1 / L_2) T_2 + [(1 - \Gamma_2) T_3 / L_2] \quad (1)$$

由于  $L_2 = e^{k_{a2} \cdot d \cdot \sec \theta}$

可以看出在界面 1 上测得辐射亮温与冰面和界面有复杂的关系。  $T_B$  对观察角  $\theta$  和极化类型  $P$  的依从关系, 包括在  $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$  和  $L_2$  的表达式中,  $T_B$  对第 2 层的厚度关系, 包括在  $L_2$  的表达式中; 在忽略高次反射部分和设冰温和海水温度相等时就可以得到:

$$T_B(\theta, P) = (1 - \Gamma_1) [(1 + \Gamma_2 / L_2)(1 - 1 / L_2) T_2 + (1 - \Gamma_2) T_3 / L_2] / (1 - \Gamma_1 \Gamma_2 / L_2^2) = [(1 - \Gamma_1) / (1 - \Gamma_1 \Gamma_2 / L_2^2)] [(1 + \Gamma_2 / L_2 - 1 / L_2 - \Gamma_2 / L_2^2) T_2 + (1 / L_2 - \Gamma_2 / L_2) T_3] = [(1 - \Gamma_1) / (1 - \Gamma_1 \Gamma_2 / L_2^2)] (1 - \Gamma_2 / L_2^2) T \quad (\text{当 } T_2 = T_3 = T).$$

因  $\Gamma_1 < 1, \Gamma_2 < 1, L_2 > 1$  所以  $0 < \Gamma_1 \Gamma_2 / L_2^2 < 1$ 。

根据  $\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots$  当  $0 < x < 1$ 。

上式可简化为模式:

$$T_B(\theta, P) = (1 - \Gamma_1)(1 - \Gamma_2 / L_2^2) T (1 + \Gamma_1 \Gamma_2 / L_2^2 + (\Gamma_1 \Gamma_2 / L_2^2)^2 + \dots) = (1 - \Gamma_1)(1 + \Gamma_1 \Gamma_2 / L_2^2 + (\Gamma_1 \Gamma_2 / L_2^2)^2 - \Gamma_2 / L_2^2 - \Gamma_1 \Gamma_2^2 / L_2^4 - (\Gamma_2 / L_2^2)(\Gamma_1 \Gamma_2 / L_2^2)^2) T = [(1 - \Gamma_1) - (1 - \Gamma_1)^2 \Gamma_2 / L_2^2 + (1 - \Gamma_1)(\Gamma_1 \Gamma_2 / L_2^2)^2 - \Gamma_1 \Gamma_2^2 / L_2^4 - (\Gamma_2 / L_2^2)(\Gamma_1 \Gamma_2 / L_2^2)^2] T$$

忽略高次项部分:

$$T_B(\theta, P) \approx [(1 - \Gamma_1) - (1 - \Gamma_1)^2 \Gamma_2 e^{-2 \cdot k_{a2} \cdot d \cdot \sec \theta}] T \quad (2)$$

化成一般形式为:

$$T_B(f, \theta, P) = A(f, \theta, P) - B(f, \theta, P) \times e^{-C(f, \theta, P) D} \quad (3)$$

其中  $A, B, C$  均与频率、观测角和极化方式有

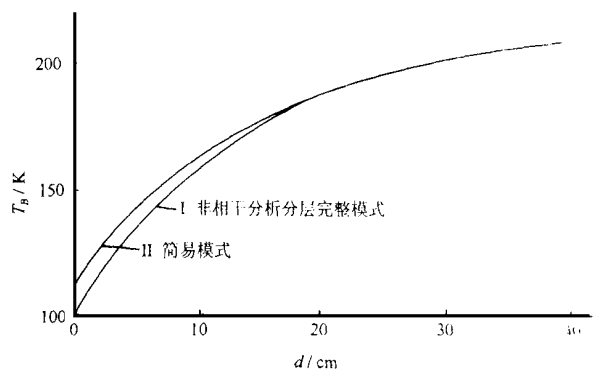


图 4 简易模型和完整模式的偏差比较  
设空气和冰界面的反射率  $\Gamma=0.2$ , 冰和海水界面反射率  $\Gamma=0.6$ , 消光系数  $k_e=0.345$ , 冰温为  $-5^\circ\text{C}$ , 海水温度为  $-2^\circ\text{C}$  时, 按简化公式 ( $t=-5^\circ\text{C}$ ) 和完整式计算结果

Fig. 4 Simple model in comparison with complete model  
I. complete model; II. simple model

关,  $D$  为冰厚。这个式子具有指数衰减项, 它符合电磁波在有损介质中传播的理论。

可以根据这个基本物理模式对实地测试数据进行分析处理, 统计拟合。由于不同的实验条件, 实际数据也会有所变化。图 4 给出简易模式和完整模式的偏差, 可以看出在条件不变的情况下, 简易模式 (II) 和完整模式 (I) 的符合程度。

## 4 实验验证

在 1988 年、1989 年和 1990 年 3 年的冬季采用频率为 1.4GHz (21cm), 3.09GHz (10cm), 5.4GHz (5cm), 36GHz (8mm) 的微波辐射计放置在地面和遥感车活动平台上对海冰的微波辐射特性进行测试。1995 年底到 1996 年 1 月, 使用频率为 6.6GHz (5cm), 13.9GHz (2cm), 37GHz (8mm) 的辐射计, 仪器放置在悬臂式高架固定平台上, 采用不同的观测角和极化方式对营口港港池海冰生长过程进行现场测试。通过这些地面实验的结果, 按照给出的数学物理模式进行统计分析, 拟合出模式的系数  $A, B, C$ 。

利用这几年的数据特别是 3.09GHz 的  $0^\circ$  参数建立的海冰辐射模式在最近几年的航测海冰速报中, 取得很好的效果。航测模式反演海冰厚度相对误差小于 30%<sup>[4,5]</sup>。1996 年 2 月又进行一次航空和海上实测准同步实验, 对地面和海上数据取得的 6.6GHz  $0^\circ$  模式进行验证, 航空遥感结果与海上站位船上实测的海冰厚度对比 (表 1)。

可以看出, 相对误差小于 30% 的数据占 66%。

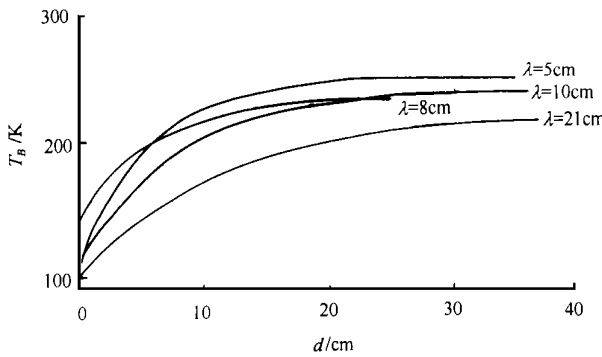
表 1 航空观测数据反演冰厚度与海上实测值比较

Table 1 Sea ice thickness derived from aerial observation data in comparison with the in situ measurements at sea

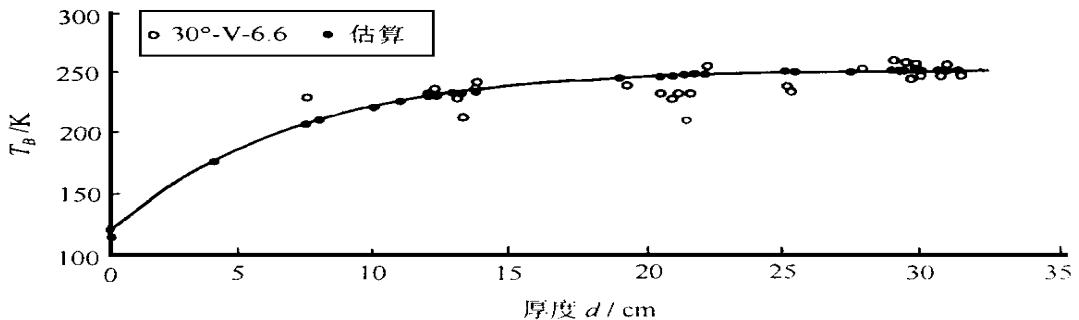
站 位	1	3	4	5	6	7	8	9	10
海上航空测数反演冰厚度/cm	2.6	1.0	3.1	2.7	4.7	7.3	7.6	5.8	9.7
海上实测海冰厚度/cm	2-3	2-6	4	3-4	6-8	4-9	18-22	10-11	9-12

这进一步证实了其模式用于遥感海冰厚度的可行性和真实性。其中有 3 点数据偏差较大,这可能与实际飞行日和船在冰区工作日相差有 3 日,属于准同步,又恰逢这几天风很大,冰体可能产生较大移动造成。

下面给出这几年实验的部分结果:(1) 3 年地面实验 21cm, 10cm, 5cm, 8mm,  $0^\circ$  统计曲线(图 5); (2) 5cm 波段 1996 年 1 月实验  $30^\circ$  的统计曲线(图 6); (3) 1992 年 1 月辽东湾测得的航线冰厚度

图 5 海冰亮温与厚度关系地面统计曲线( $0^\circ$ )Fig. 5 Statistical curves of sea ice brightness temperature relative to ice thickness ( $0^\circ$  observation on ground)

分布(图 7); (4) 1995 年 12 月到 1996 年 1 月,地面实验(6.6GHz)  $30^\circ$  角垂直极化与水平极化亮温差与厚度关系曲线图(图 8); (5) 1996 年 1 月,测得 37

图 6 5cm 波段 1996 年 1 月  $30^\circ$  的统计曲线(垂直极化,海冰亮温与冰厚度关系)Fig. 6 At  $30^\circ$  observation angle and vertical polarization, 5cm band statistical curve relating sea ice brightness

temperature to ice thickness based on ground experiment in January 1996

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

GHz 在 20cm 冰厚时垂直极化与水平极化亮温随角度的变化图(图 9)。

从图 8 的 5cm (6.6GHz)  $30^\circ$  的测得结果,我们可以看出  $T_{B(V-H)}$  与厚度  $D$  有明显的相关关系,可以通过高次方程回归给出其结果。也可以看出随厚度增加,垂直极化与水平极化偏差逐渐减少。数据的离散说明海冰表面特征对辐射亮温有影响,试验也还有误差,有待进一步研究。

1995 年 12 月到 1996 年 1 月的地面试验以及航空遥感和海上的对比实验进一步说明该模式基本上反映海冰从薄到厚的辐射亮温的客观状况。

## 5 结果与讨论

(1) 实验证明使用该辐射传输模式来遥感海冰厚度是符合实际的,有实用意义。几年来我们在中国冰区进行实验,表明使用 10cm 波段工作基本上可以满足中国一年冰厚度遥感的要求。

我们从 1989 年到 1996 年冬季作海冰监测航空遥感飞行,利用该方法取得的冰厚数据服务于渤海和黄海北部冰情数值预报取得较好的效果。

(2) 影响测量和识别的因素。

(a) 频率的限制。不同频率在相同介质中损耗不一样,较低的频率具有较大穿透深度,可以用于对

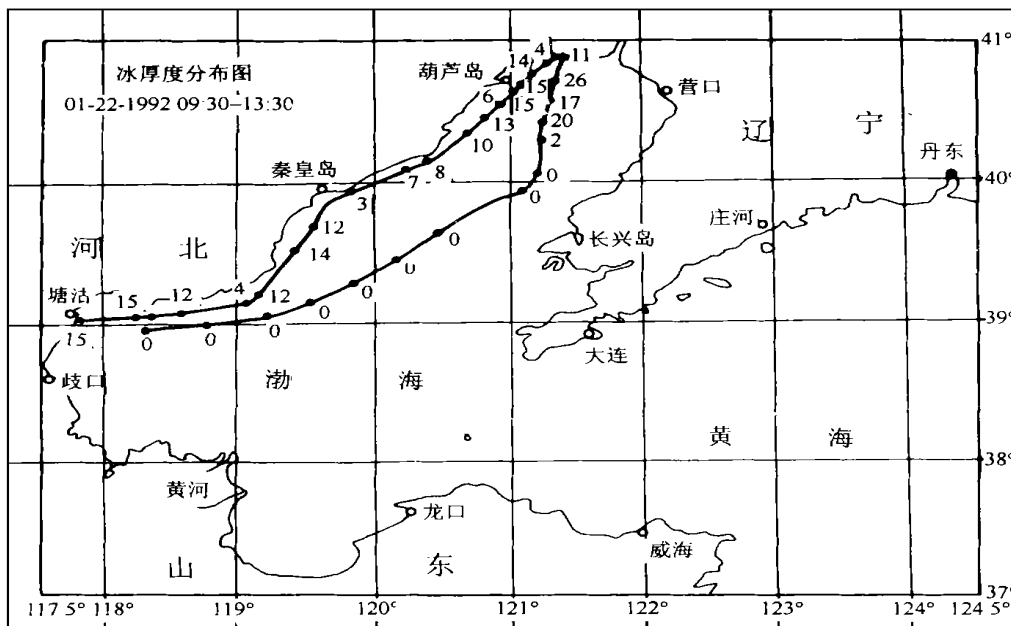


图7 1992年飞行航线及航线上冰厚度分布

Fig. 7 Flight line on Jan. 22, 1992 and the sea ice thickness distribution along the flight path

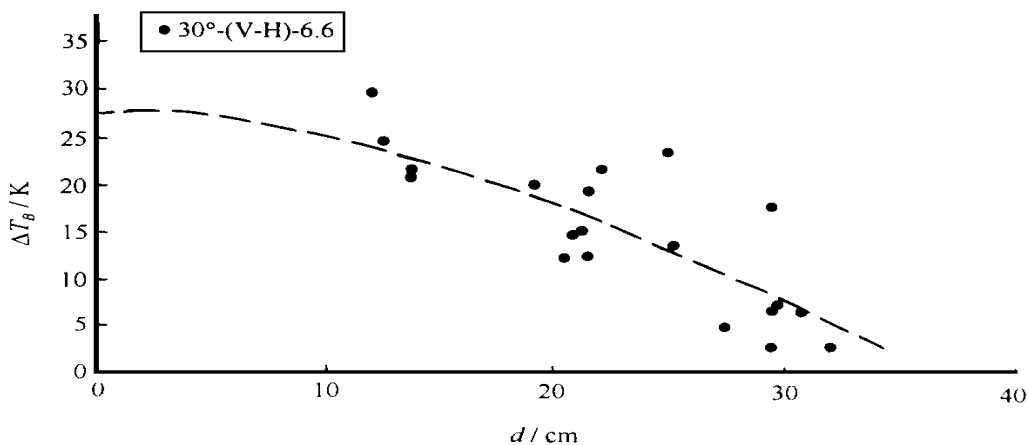


图8 6.6GHz 30°垂直极化和水平极化的亮温差与厚度关系

Fig. 8 Relation of brightness temperature difference between vertical polarization and horizontal polarization with ice thickness at 30° observation angle,  $f=6.6\text{GHz}$

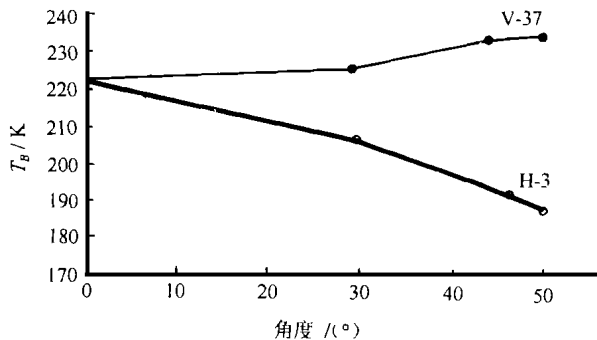


图9 37GHz 1996年1月测量

垂直极化和水平极化亮温与角度的变化图,  $d=20\text{cm}$   
Fig. 9 Variation of brightness temperature measured at different polarizations with observation angle in Jan. 1996. (ice thickness  $d=20\text{cm}$ ,  $f=37\text{GHz}$ )

较厚冰进行测量。

(b) 辐射计灵敏度的限制。

$$D_{\max} = (1/C)\ln(B/\Delta T_1)$$

其中： $\Delta T_1$ 为辐射计测量灵敏度。 $B, C$ 参数包含  $f, \rho, \theta$ 对测量结果的影响。(3) 冰面被污染，影响冰的辐射亮温和测量结果。

### 致谢

实验中使用的微波辐射计由中国科学院长春地理研究所微波室研制，并协助进行试验。在此，向该所微波室赵凯、刘宝江等同志表示感谢！

## 参 考 文 献 (References)

- 1 Bi Dexian. Theory of Electromagnetic Field. Beijing, Electric Industry Press. (In Chinese) [毕德显. 电磁场理论. 北京: 电子工业出版社, 1985.]
- 2 F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung. Microwave Remote Sensing. Vol 1. Translated into Chinese by Hou Shichang, Ma Xiguang. Beijing: Science Press, 1988. (In Chinese) [(美) F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung. 微波遥感, 第 1 卷. 侯世昌, 马锡冠译. 北京: 科学出版社, 1988.]
- 3 F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung. Microwave Remote Sensing. Vol 2. Translated into Chinese by Huang Beikang, Wang Yifei. Beijing: Science Press, 1987. (In Chinese) [(美) F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung. 微波遥感, 第 2 卷. 黄培康, 王一飞译. 北京: 科学出版社, 1987.]
- 4 Du Bilan, Tan Shixiang, Zang Hengfa, Wu Mingyu. Research on sea ice remote sensing technique. Paper selections on sea ice remote sensing research and application. Beijing: Ocean press, 1992. (In Chinese) [杜碧兰, 谭世祥, 臧恒范, 吴明钰. 海冰遥感技术研究. 海冰遥感研究与应用论文集. 北京: 海洋出版社, 1992.]
- 5 Marine Forecast Center, Institute of Ocean Technology. Institute of Geography, China Academy of Science. Sea ice aerial remote sensing images in Bohai. Beijing: Ocean press, 1990. (In Chinese) [海洋预报中心, 海洋技术研究所, 中国科学院地理研究所. 渤海航空遥感冰情图集. 北京: 海洋出版社, 1990.]

## 作 者 简 介

吴明钰, 男, 高工, 1945 年生, 1967 年毕业于重庆大学无线电系无线电技术专业。1985 年开始从事海洋微波遥感研究。

## Study on Sea Ice Microwave Radiating Propagation Model and Experiment

WU Ming-Yu LUO Xian

(Institute of Ocean Technology, SOA Tianjin 300111)

**Abstract** Sea ice is an important element affecting heat circulation of the earth.

Based on the heat emission of sea ice and sea water, the paper analyzes a 3-layer medium at sea surface used to sense sea ice and derives the following model relating intermediate medium to the received emission brightness temperature:  $T_B = A + Be^{-CD}$  where  $A$ ,  $B$  and  $C$  all depend on polarization, observation angle and frequency of the remote sensing system, they can be deduced from sea ice in situ measurement on ground. The model agrees with propagation features of electromagnetic wave in loss medium and reflects the relationship between the received energy by passive microwave remote sensing system and the propagation distance.

In recent years, 4 bands of microwave radiometers were used to measure sea ice on ground ( $0^\circ$  degree observation angle) and 3 of them were used in aerial remote sensing, two results are basically in agreement. The fact shows that the model is correct and feasible.

Sea ice thickness distribution along the flight line over Liudongwan Gulf and statistical curve relating brightness temperature to ice thickness are given.

Several factors affecting measurement and limiting ice thickness identification are pointed out.

**Key words** Sea ice, Passive microwave remote sensing, Model