

92, 9(1)

1-11

机载合成孔径雷达的海冰监测分析

杜碧兰

P731.15

(国家海洋局 海洋发展战略研究所, 北京)

摘 要

严重冰情是重要海洋自然灾害之一, 往往造成国计民生的重大损失。本文概要介绍了我国“七五”期间在海冰航空遥感技术研究方面的进展, 重点讨论了机载合成孔径雷达(SAR)的全天时、全天候、高分辨率、高信噪比和对云层的穿透能力强等特点, 以及使用机载地球资源侧视雷达(ERR)系统, 对渤海进行的首次SAR测冰试验结果。所获得的分辨率为 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 和成图比例为1:10万的辽东湾海冰相联图象, 清楚地给出了固定冰带、流冰冰型、流冰密集度、冰块大小、冰脊、冰间水域和流水区外缘线等参量。SAR监测和分析海冰的研究结果具有重要的科学和实用价值。

关键词: 海冰、航空遥感、合成孔径雷达。

一、引 言

海冰是中、高纬海洋上海-气相互作用的产物, 是全球气候变化的重要因素之一。由于结冰海域的流冰和冰山常常造成重大海难事故, 受到世界有关国家的重视。如1912年英国“泰坦尼克”号客轮与冰山相撞, 沉没于北美的纽芬兰东南海域, 使1517名乘客全部丧生。这一惨重事故发生后, 美国和加拿大等国及时组织了国际冰山巡逻队, 使用飞机、雷达、无线电设备等手段, 定时对冰山的位置和移动状况进行监测, 并发布冰山警报。多年来随着科学技术的进步, 其监测手段不断更新, 但该组织的工作一直持续至今, 可见海冰监测的重要性。

我国渤海和黄海北部处于北半球结冰海域的南缘, 每年冬季都有不同程度的结冰现象。虽不如高纬海域的“多年冰”那样严重, 但这种生消过程不长的一年冰, 也有很大的破坏作用。如1969年2~3月, 整个渤海几乎冰封, 海上流冰竟推倒了渤海石油公司的“海二井”平台, 还损坏了其他三个平台。海上交通完全中断, 58艘船只困于冰中。当时现场观测到的最大单层冰厚度为80cm, 最大海冰堆积厚度达9m。这种严重冰灾在我国历史上曾多次发生, 平均约十年左右一次。

六十年代以来, 科学技术的高速发展, 国际航空遥感测冰技术, 从可见光、红外发展到微波应用阶段。在主动式微波遥感中, 最引起世界先进国家极大重视的是合成孔径雷达。

本文于1991年10月收到。

(SAR),因为它能给出高分辨的地物图象,并具有全天时、全天候等优点,在军用和民用领域中都具有重要地位。合成孔径雷达的研制技术是一项多学科高技术的综合,因而目前世界上还仍被少数国家所掌握,美国处于领先地位,我国航空遥感一部曾从美国引进了地球资源侧视雷达系统(ERR)^[1],并开展了汛期防洪和矿产资源探查等方面的遥感试验,近年来我们使用该系统对渤海进行了我国首次SAR的海冰监测试验。我国合成孔径雷达研制工作起步较晚,始于七十年代后期,但现已由中国科学院电子学研究所等单位研制成功机载多测绘通道多极化合成孔径雷达系统^[2],已进行了洪水险情、地形地貌测绘和矿产资源探查等的试验飞行。

我国海冰航空观测始于七十年代初,但多年来一直以目测为主。为提高我国航空测冰的技术水平,国家海洋局所属单位于1985年2月在渤海首次进行了航空遥感测冰试验。在此基础上,国家“七五”重点科技攻关项目纳入了“渤海、黄海北部冰情航空遥感技术研究”专题。五年来(1986~1990)在对一年冰波谱特性和遥感方法研究的基础上,根据海冰要素的不同特点,进行了十余架次的海冰航空遥感监测试验飞行,使用了可见光、红外和微波波段的多种测冰传感器^[3],建立了我国的航空遥感测冰技术系统。其中机载合成孔径雷达(SAR)的遥感测冰试验,取得了良好的效果,并获得了辽东湾第一张SAR多通道海冰相嵌图象。其分辨率为 $3\text{m} \times 3\text{m}$,成图比例为1:10万。该图象给出了冰区的固定冰带、流冰冰型、流冰密集度、冰块大小、冰脊、冰间水域和流冰区外缘线等参量,达到了国外海冰同类监测的水平^[4]。SAR监测海冰的应用研究具有重要的科学和实用价值。

二、SAR的航空遥感监测特点

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar)是一种现代高分辨率成像雷达,它将合成孔径技术、脉冲压缩技术和数字(光学)信息处理技术三者结合运用,使用较短的天线,获得方位和距离两个方向的高分辨率。将其装在飞机或卫星上即能产生几十公里、几百公里外大面积的二维雷达图象,这是一般雷达和真实孔径雷达望尘莫及的。

SAR在国际上的研制工作始于五十年代初,六十年代达到实用水平,当时SAR系统的分辨率在10m量级,采用非实时光学处理和模拟电子处理。六十年代后期随着数字信号处理技术的发展,进一步提高了SAR的实用性,实现了非实时的数据处理,系统分辨率达到3m量级。七十年代出现了带运动补偿的实时数字式合成孔径雷达。七十年代后期SAR技术由机载向星载应用过渡。八十年代SAR技术向扩展频段和星载雷达数据的实时处理方向进展。

SAR之所以受到国际雷达界和遥感界的极大重视,其原因是由于它具有高分辨率、高信噪比和全天时、全天候及对云层的穿透能力强等特点,现简述如下:

1. 高分辨率

SAR在对地测量的方位向(沿飞机航向)和距离向(垂直于飞机航向)均具有很高的分辨率。距离向的高分辨率是采用了脉冲压缩技术,方位向则采用合成孔径技术。

1) SAR的地面方位分辨率

SAR的地面最佳方位分辨率取决于实际天线尺寸(d), 后者为一常数^[6], 可用下式表示:

$$\frac{\lambda}{2L_{max}} R_0 = \frac{d}{2} \quad (1)$$

式中, λ ——雷达发射的波长,

L_{max} ——SAR天线的最大综合长度,

R_0 ——目标到飞行航线的垂直距离,

d ——实际天线沿飞行方向(航向)的尺寸。

式(1)表明, SAR在地面的最佳方位分辨率为一常数是 $\frac{d}{2}$, 并与距离 R_0 (飞行高度)无关。实际天线方位孔径 d 越小, 方位分辨率越好, 因为实际天线越小, 目标受到照射的区间越长, 最大综合长度也越长, 从而分辨率越高。

2) SAR的地面距离分辨率

为了获得地面距离分辨率机载合成孔径雷达的天线总是侧视的^[6]。SAR的地面距离分辨率 ρ_r 取决于下式,

$$\rho_r = \rho_s \sec \varphi \quad (2)$$

式中, ρ_s ——雷达发射波形的距离分辨高,

φ ——波束的俯视角。

ρ_s 值在不同情况下是变化的, 当雷达发射时间带宽积(TBP)为1的简单脉冲时, 脉冲宽度为 τ , 则 $\rho_s = c\tau/2$ (c 为电磁波传播速度); 当雷达发射的TBP>1的波形时, 则 $\rho_s = c/2\Delta f$ (Δf 为发射波形带宽)。

SAR的方位和距离分辨率综合体现了其技术水平和监测能力。国际上代表七十年代机载SAR最高技术水平的是美国ERIM公司研制的X-L波段的双频双极化四通道雷达, 其图象分辨率(方位×距离)为 $2.1\text{m} \times 1.5\text{m}$ ^[4]。我国从美国引进的ERR系统中x波段的APD-10合成孔径雷达的分辨率为 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 。我国自行研制成功的四通道、多极化合成孔径雷达的图象分辨率为 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 。

2. 高信噪比

SAR比普通图象雷达在信噪比方面优越得多。因为普通图象雷达的信噪比与距离的4次方成反比, 而SAR的信噪比则只与距离的3次方成反比, 这可由它们的雷达方程清楚地看出^[6]。

1) 普通雷达方程

$$\frac{S}{N} = \frac{P_s G^2 \lambda_0^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 B F_{\text{NL}} L} \quad (3)$$

式中, $\frac{S}{N}$ ——末级中放信噪比,

P_s ——发射脉冲功率(W),

G ——天线增益,

λ_0 ——发射波长(m),

R ——雷达至目标的距离 (m),

k ——波尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} J/K$),

$T_0 = 290^\circ K$,

F_{n0} ——接收系统噪声系统,

L ——系统损耗。

2) SAR雷达方程

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{av} A_r^2 \rho_{rs} \sigma_0}{8\pi N_0 R^3 \lambda_0 v L} \quad (4)$$

式中, P_{av} ——发射脉冲的平均功率 (W),

A_r ——天线的有效面积 (m^2),

ρ_{rs} ——地面距离 (m),

σ_0 ——地面散射系数,

N_0 ——噪声功率谱密度 $W/(m^2 Hz sr)$,

R ——雷达至目标的距离 (m),

λ_0 ——发射波长 (m),

v ——雷达飞行速度 (km/h),

L ——系统损耗。

从式 (3) 中看出普通雷达的信噪比与 R^4 成反比, 而 (4) 式中 SAR 的信噪比则与 R^3 成反比, 故其信噪比较普通雷达为高, 满足了雷达发射功率小, 飞行体离地面远的要求。

3. 全天时、全天候和对云层的穿透能力强

SAR 不受黑夜或云、雨等天气条件的限制, 具有全天时、全天候的工作特点, 使其在军用和民用的许多领域中具有特殊的优势。SAR 还具有较强的穿透遮挡物的能力, 对大气层、大气湍流、云、雾、雨等都影响很小。为了对几种常用遥感器的全天候工作能力进行试验评估, 曾对相机、激光器、红外传感器及不同波段的 SAR, 进行了各种天气条件下的昼夜遥感飞行^[4], 其结果表明, 有源微波传感器 SAR 的全候能力最强, 其中 x 波段 ($3cm$) 的 SAR 对白天和黑夜中, 晴天、雾、霾、多云、毛毛雨、小雨、中雨和大雨的天气条件, 均能给出良好的地面遥感图象, 而 Ka ($8mm$) 和 Ku ($2cm$) 波段的 SAR 对多云、中雨和大雨的天气条件的适应能力则较差, 因而使用受到限制。其次具有一定全天候能力的传感器是红外扫描仪、红外辐射计和多波段扫描仪。最差的是高能相干脉冲激光辐射计和可见光照相机。

三、SAR 的海冰监测分析

1. SAR 的海冰监测试验

为了深入细致地研究我国渤海“一年冰”的类型、密集度、冰块、冰脊等主要海冰参量的分布特征, 在攻关研究中选用了现代化的先进测冰传感器——机载合成孔径雷达 (SAR)

于1989年2月3日对渤海结冰严重的辽东湾海域进行了海冰遥感监测试验。所用的地球资源侧视雷达(ERR)系统包括机载多通道,单极化成象合成孔径雷达 APD-10 型和地面 UC-3 型相关器两大部分。该系统的运用参数和图象参数如下:

1) 雷达运用参数

工作方式:

ERR系统具有两种工作方式(I, II), 每次只能使用一种, 在飞行的任何一侧均可获得图象。

方式 I 的飞行高度为3048~10668m, 作用距离为20.24~38.83km(斜距);

方式 II 的飞行高度为6096~13716m, 作用距离为37.84~56.43km(斜距);

飞行地速为450~750km/h;

极化型式为水平极化(HH);

侧视方向为左、右两侧;

测绘带宽度(四个通道)为18.52km, 每个通道宽为2.5海里即4.63km。

2) 雷达图象参数

图象分辨率为3m×3m;

图象比例尺为1:10万;

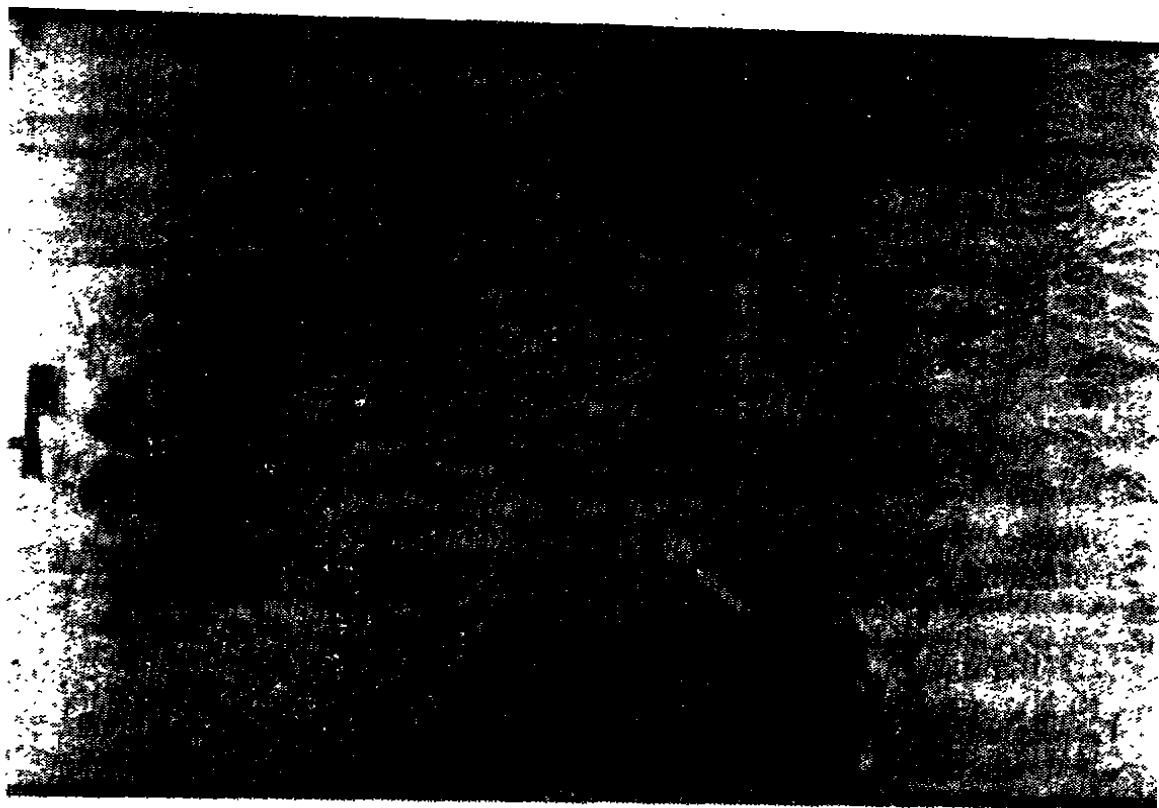


图1 辽东湾合成孔径雷达海冰图象(1989年2月3日)

图象标记为每5海里航程在距离方向上出现一系列间隔为0.5海里的参考标记。

1989年2月3日进行的SAR海冰监测飞行试验的时段是在一次冬季强冷空气过程之后的海冰发展期,所以其海冰类型比较齐全。选择的监测海域为辽东湾($39^{\circ}45' \sim 40^{\circ}00' \text{ N}$, $120^{\circ}30' \sim 122^{\circ}20' \text{ E}$),面积约23万平方公里。飞行高度为10,000m,飞行速度为750km/h,雷达工作为方式I,侧视方向由外海向岸滨,通道间旁向重叠率为10~20%,图象分辨为 $3\text{m} \times 3\text{m}$,成图比例尺为1:10万;所获SAR的海冰图象如图1所示。

由于APD-10型机载合成孔径雷达具有前述的各种优点,SAR的海冰图象信息丰富,层次分明、清晰易辨,给出了冰区的固定冰带、流冰冰型、流冰密集度、冰块大小、冰脊、冰间水域和流冰区外缘线等参量,对冰情监测很有代表性。为了与同期卫星云图海冰分析图象进行比较和定标,图2给出了NOAA卫星AVHRR数据的多通道组合并经过增强处理后辽东湾海冰分析图。因NOAA卫星AVHRR传感器的星下点分辨率为1.1km,周边约1.5km,故难以分辨出海冰的类型和流冰块的大小,只能给出固定冰和流冰的分布范围及其外缘线。在此图象的基础上若想得出冰区的各种细节需用同步航空遥感海冰资料进行定标。

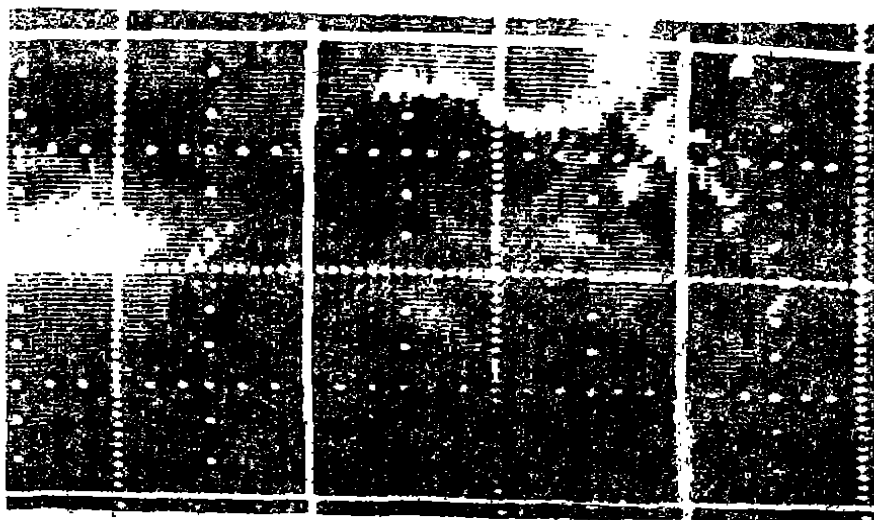


图2: 辽东湾NOAA卫星海冰分析图象(1989年2月3日)

2. SAR监测的海冰参量分析

1) 海冰类型分析

根据辽东湾SAR的海冰相嵌图象和“海滨观测规范”的海冰类型划分标准,可以较容易地分析出全海域海冰类型及其分布状况并可得出辽东湾高分辨率海冰类型分布图(图3)。

从图中清楚地看出,沿岸固定冰主要分布在小凌河至大凌河及辽河口至盖平角一带。

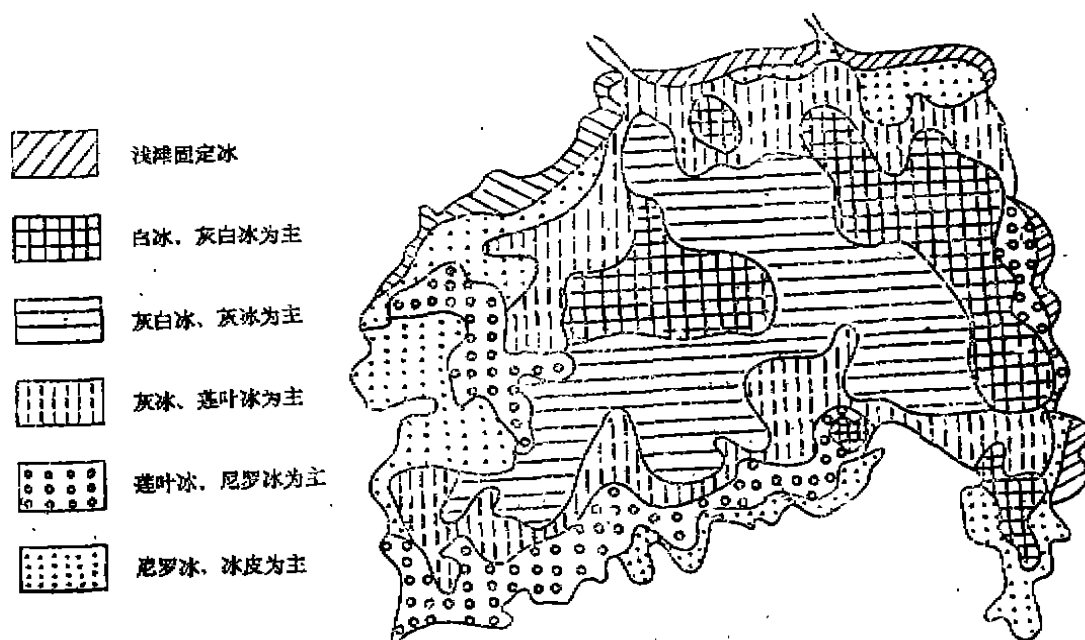


图3 辽东湾SAR的海冰类型分布 (1989年2月3日)

厚冰堆积区主要分布在湾底及中北部和东部近海, 以白冰和灰白冰为主。辽东湾中部的大面积流冰区为灰冰和灰白冰, 冰块较大, 基本无堆积和重叠现象。湾底固定冰与厚冰堆积区之间以冰皮为主。西岸近海则以尼罗冰、莲叶冰和冰皮相间。南部流冰边缘区多为冰皮、尼罗冰和莲叶冰等。从整个湾的海冰分布看, 西部冰情明显轻于东部。冰区的南部和西部近海都可能有初生冰存在, 但由于合成孔径雷达对水面和初生冰均无回波影象, 故难以区分, 而且合成孔径雷达系统在大面积水域上空飞行时, 雷达系统的自动增益加强, 往往会出现淡灰色的系统噪音, 并非真正的海冰图象。

2) 流冰密集度分析

流冰密集度是指流冰在整个监测海域内所占的成数。为分析方便起见, 将其分为5个级别, 即9~10成, 7~8成, 5~6成, 3~4成和小于2成。一般流冰密集度大于7成时, 即对海洋工程和船舶航行形成威胁。

辽东湾SAR的流冰密集度分布 (图4) 与SAR的海冰类型分布 (图3) 有一定的相似性。因为厚冰堆积区流冰密集度相对较大, 而薄冰区则密集度一般较小。图4给出的1989年2月3日的辽东湾流冰密集度分布情况大致为, 湾区北部、中部和东部除部分海域外, 流冰密集度都大于7成, 而西部和南部的密集度大多在6成以下。形成这种流冰密集度分布的主要原因是受来自西北方向的冷空气长时间作用的结果, 使大量流冰向离岸方向移动, 裸露出的海面在冷空气作用下又不断形成各种形式的薄冰。

试验研究证明, 采用机载合成孔径雷达研究分析流冰密集度分布, 具有独特的优点, 是目前航空和航天遥感中最为有效的途径, 与卫星遥感海冰结果相比优点更为突出,

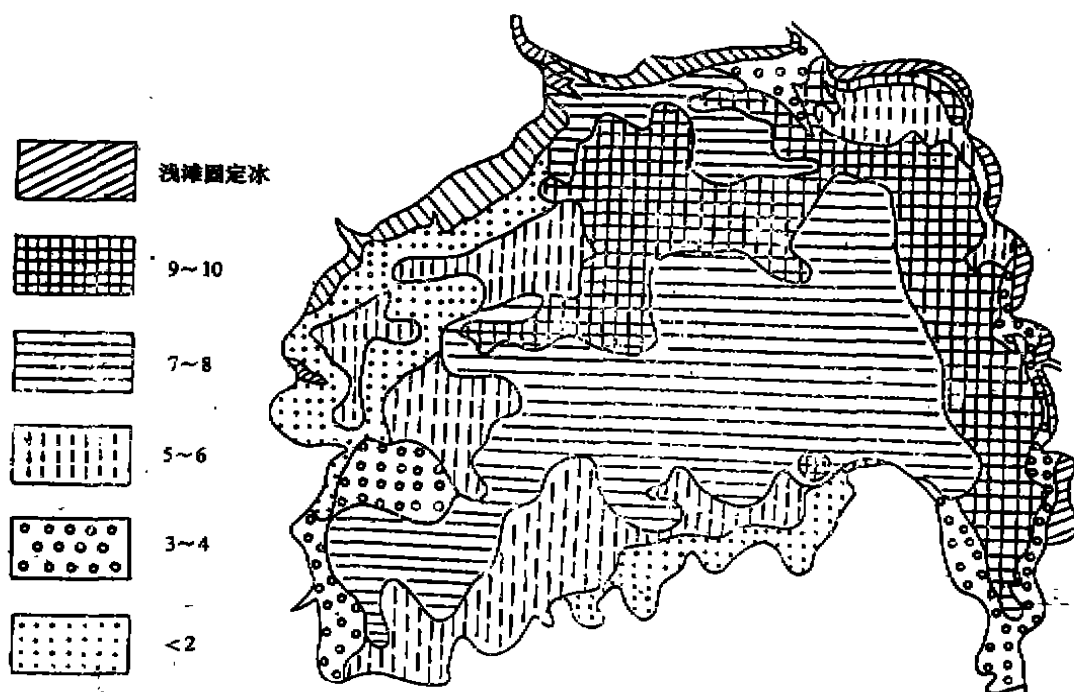


图4 辽东湾SAR的流冰密集度分布(1989年2月3日)

APD-10型SAR监测分析流冰密集度的误差经计算为10~20%，即1~2成。与美国和加拿大使用的CV-580SAR系统给出的流冰密集度监测分析误差(10~40%)相当^[6]。

3) 流冰块和冰脊

(1) 流冰块

结冰海面在大风、流、潮等动力因素的作用下，形成冰块大小不一、形状各异的流冰块。根据“规范”规定，跨越冰块的最大长度，称为冰块的最大水平尺度，按其尺度的不同，分为巨冰块、次巨冰块、大冰块、中冰块、小冰块、冰块、碎冰和莲叶冰八种，其相应尺度在大于10km和0.3m的范围内变化。

表1给出了渤海辽东湾1986~1988年所拍摄的海冰彩红外图象及1989年合成孔径雷达海冰图象计算出的逐年流冰块的最大水平尺度和面积。应说明的是前4年只沿选定航线拍摄的只代表航线附近的情况而不是全海域，后者SAR给出的是整个辽东湾海域的1:10万成图海冰图象，其最大冰块的最大水平尺度达6.16km(如图1中海区南缘的白色箭头所指)，属次巨冰块，其面积为26.54km²，是我国海冰监测以来发现的最大冰块，对辽东湾海域有较好的代表性。

(2) 冰脊

流冰块在运动过程中互相挤压，使冰块边缘破碎，在冰面上堆积，形成冰脊。冰脊在

表1 最大流冰块分析计算结果

项 目 \ 年	1986	1987	1988	1989
冰块最大水平尺度(km)	0.90	0.32	0.46	6.16
冰块面积(km ²)	0.32	0.06	0.19	26.54
观测日期	1月24日	1月17日	2月5日	2月3日

渤海,尤其是辽东湾,经常发生,对海上油气资源的勘探开发有较大的影响。从1986~1989所获取的彩红外和SAR海冰图象中发现渤海的冰脊多发生在辽东湾中部和东部海面(在40°N以北和121°30'E附近的范围内)。从表2中看出SAR的冰脊监测误差经计算约为10%,达得了实用的要求。

表2 流冰块及冰脊监测误差估计

项 目 \ 观测手段	计算值(m)	实测值(m)	误差(m)	百分率(%)	说 明
合成孔径侧视雷达	903.6	904.0	89.6	9.9	营口新港西导流堤长
彩红外照相	1.50	1.40	0.10	7.1	机宽法计算冰脊间距

4) SAR海冰图象的数字处理

我们对APD-10型SAR的海冰相嵌图象进行了计算机数字化处理,将1:50万SAR雷达海冰图象负片输入图象处理机,根据冰、水灰度等级的差别区分出监测海域冰和水所占的比例,计算结果为海冰占全海域面积的67%。同时还按不同厚度、不同类型的海冰分布进行伪彩色分析,得出四种不同冰况下的分析图象:最厚冰分布、两种厚冰的混合分布、三种冰厚和多种冰厚的区域分布^[7]。

四、结 语

1.运用机载合成孔径雷达监测海冰在我国还是首次,实践证明,在航空遥感测冰中,SAR具有全天时、全天候、高分辨率和高信噪比的优点,是海水监测的有效手段。所获得的第一张辽东湾高分辨率海冰图象是比例为1:10万的多通道海冰相嵌图象,给出了冰区的沿岸固定冰带、流冰冰型、流冰密集度、冰块大小、冰脊、冰间水域和流冰外缘线等参量。SAR监测所提供的冰情分布图中的海冰参量之多和准确度之高是其他机载传感器难以比拟的。对海冰预报和研究无疑具有很大价值,尤其对冰情严重或变化剧烈的情况

急需进行SAR的跟踪监测,这对减轻海冰灾害,有着重要作用。

2.从国外的发展趋势看,八十年代SAR技术向扩展频段和星载雷达数据的实时处理方面进展。采用X、C、S和L波段相结合的多频、多极化、前后斜视多模式工作体制。美国已研制成功X-L或X-C双波段、双极化的合成孔径雷达。这样在一次飞行中,同时可获得多幅不同频率和极化的图象,包含着更丰富的信息,进行互相参照分析后,使地物目标(如海冰)的特征变得明显而便于分辨。我国“七五”期间研制成功的机载多通道多极化合成孔径雷达系统,即具有四种极化工作方式(HH, VV, HV, VH)和实时空一地数据传输系统的特点,应推广应用于我国海冰的实时监测服务,使科技成果尽快转化为生产力。

参 考 文 献

- [1] 中国航空遥感一部,地球资源卫星雷达图象应用资料汇编,1985, p.33-43, 153-159.
- [2] 白有天,机载多极化雷达合成孔径雷达系统,航空遥感实用系统与应用,能源出版社,1989, p27-32.
- [3] 杜玉兰,渤海冰情航空遥感技术研究,海洋预报,1991, 8卷2期, p.10-21.
- [4] 谢寿生等,微波遥感技术与应用,电子工业出版社,1987, p24-64.
- [5] 杨士中,合成孔径雷达,国防工业出版社,1981, p15-29.
- [6] Millimeter Wave radiometric images of the marginal ice zone, *Proc of IGARSS'84 Symposium*, 1984, p.353-358.
- [7] 杜玉兰等,渤海、黄海北部冰情航空遥感技术研究,待发表.

MONITORING AND ANALYSIS OF SEA ICE USING AIRCRAFT SYNTHETIC APERTURE RADAR (SAR)

Du Bilan

(China Institute for Marine Development strategy, SDA)

Abstract

A serious sea ice condition is one of the important marine natural hazards which often causes the heavy losses of the national economy and the people's livelihood. The progress has been made in research on the aerial remote sensing of sea ice during the period of the seventh five-year plan of our country is introduced briefly in this paper. The characteristics of all-time, all-weather, high resolution, high ratio of signal to noise and good capacity of transparent to cloud layer etc. of the SAR is discussed. The result of experiment on the measurement of sea ice using aircraft ERR system carried out for Bohai Sea first time is presented. A SAR sea ice image for Laodong bay with a resolution of $3\text{m} \times 3\text{m}$ and mapping ratio of $1:10^6$ is obtained, which gives the parameters of fixed ice belt, types of floating ice, density of floating ice, scale of ice drift, ice ridge, ice lead and ice margin. The study results of monitoring and analyzing sea ice using SAR is much worthful for science and practice.

Key words: Sea ice, Aerial remote sensing, Synthetic aperture radar (SAR).