文章编号:1673-5005(2014)03-0186-07 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.03.031

拉布拉多海一年平整冰厚度 SAR 反演算法

刘眉洁[1,2,3], 戴永寿[1], 张 杰[2], 张 晰[2], 孟俊敏[2]

(1. 中国石油大学信息与控制工程学院,山东青岛 266580; 2. 国家海洋局第一海洋研究所,山东青岛 266061;
3. 青岛大学物理科学学院,山东青岛 266071)

摘要:在利用实测一年平整冰厚数据和同步全极化 RADARSAT-2 SAR 影像、全面分析不同 SAR 极化参数对海冰厚度敏感度的基础上,发现 Alpha 角最高;从理论上证实利用两者相关性反演冰厚的可行性,将所得经验方程用于冰厚反演,其结果与实测数据吻合较好;与现有常用方法的反演结果进行对比表明,新方法误差较小;Alpha 角可以用于一年平整冰厚度反演,证明全极化 SAR 海冰信息反演冰厚确有优势。

关键词:海冰厚度; Alpha 角; 海冰厚度反演算法; 极化 SAR; 极化散射特性; 拉布拉多海

中图分类号:P 731.32 **文献标志码**:A

First-year level sea-ice thickness retrieval in Labrador Sea using C-band polarimetric SAR data

LIU Mei-jie[1,2,3], DAI Yong-shou[1], ZHANG Jie[2], ZHANG Xi[2], MENG Jun-min[2]

(1. *College of Information and Control Engineering in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*;
2. *First Institute of Oceanography*, *State Oceanic Administration*, *Qingdao* 266061, *China*;
3. *College of Physics in Qingdao University*, *Qingdao* 266071, *China*)

Abstract: Polarimetric scattering characteristics of synthetic aperture radar (SAR) have been recently applied to sea-ice thickness retrieval, however some features implicit in the quad-polarization SAR data have not been fully utilized. Therefore, the ability of the polarimetric characteristics responding to sea-ice thickness was explored using first-year level sea-ice thickness measurements and synchronous quad-polarization RADARSAT-2 SAR images. It is found that the alpha angle is sensitive to sea-ice thickness. Their correlation is validated theoretically, and the sea-ice thickness inverted using the empirical relations agrees well with the measurements. The errors using this approach are small compared with those by commonly used methods. The study results confirm the role of the alpha angle in year round level sea-ice thickness retrieval, and the advantage of sea-ice thickness retrieval using the information derived from quad-polarization SAR data.

Key words: sea-ice thickness; Alpha angle; sea-ice thickness retrieval; polarimetric synthetic aperture radar; polarimetric scattering characteristics; Labrador Sea

海冰厚度影响着气候变化和海-气能量与物质交换。一年冰对海-气界面的物理过程影响尤为显著,其厚度提取具有重要研究意义[1-4]。现场勘测、高度计探测和航标测量等现有冰厚获取手段难以同时满足长期、大范围和高分辨率的需求。全极化(SAR)能够提供时空连续的高分辨率海冰散射信息。海冰 SAR 散射特性主要依赖于海冰表面粗糙度和复介电常数[5-6],两者又与海冰生长过程密切相关,可将散射特性与冰厚联系起来用于冰厚的提取[7-15]。一年平整冰的散射特性可能受介电常数影响较大,所以需更多关注与介电常数相关的极化参数,如 Alpha 角(α)。笔者利用拉布拉多海全极化 RADARSAT-2 SAR 影像和同步现场冰厚数据,分析海冰 SAR 极化特性对一年平整冰厚度的响应特性,

收稿日期:2013-08-27

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41306193);国家自然科学基金项目(60890075);海洋公益性项目(201105016)

作者简介:刘眉洁(1978-),女,讲师,博士研究生,主要从事海洋微波遥感原理与应用的研究。E-mail:liu_meijie@163.com。

选出敏感度最高的特性参数,并从理论上证明其有效性,进而得到相关性的经验方程,从而进行冰厚反演和误差分析,并与其他方法的结果进行对比分析。

1　研究区域和数据源

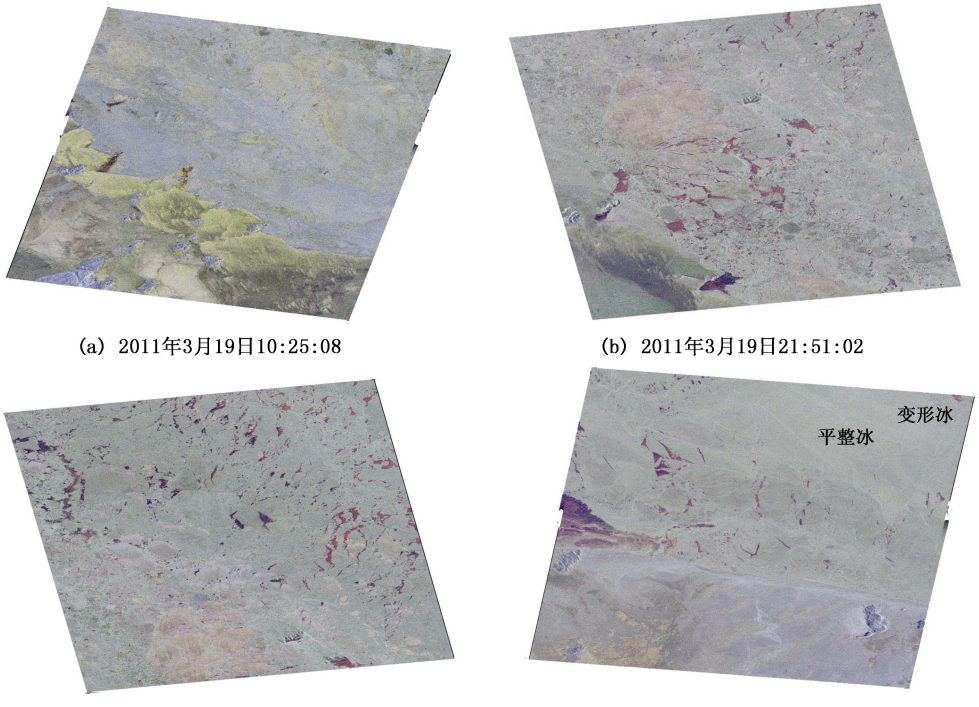
SAR 数据为拉布拉多海 RADARSAT-2 全极化单视复影像,共四景,每景影像分辨率 8 m,覆盖范围 25 km×25 km(表 1),并都进行了辐射定标和几何校正,如图 1 所示。

拉布拉多海包括一年冰和多年冰,四景 SAR 影像以一年平整冰和一年变形冰为主。图 2 为影像在拉布拉多海覆盖区域示意图。

表 1　RADARSAT-2 全极化 SAR 参数

Table 1　Properties of RADARSAT-2 SAR

获取时间	入射角 /(°)
2011 年 3 月 19 日 21:51:02	42
2011 年 3 月 19 日 21:51:05	42
2011 年 3 月 20 日 09:56:00	49
2011 年 3 月 19 日 10:25:08	29



(a) 2011年3月19日10:25:08　(b) 2011年3月19日21:51:02

(c) 2011年3月19日21:51:05　(d) 2011年3月20日09:56:00

图 1　伪彩色合成图像

Fig. 1　False colour composite images

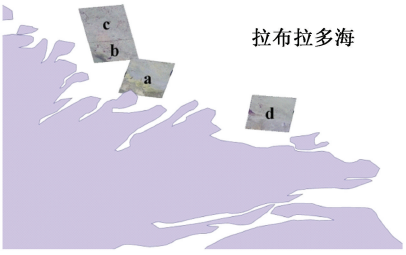


图 2　SAR 影像在拉布拉多海覆盖区域示意图

Fig. 2　Map of test sites

SAR 影像的同步现场海冰厚度数据来自加拿大贝德福德海洋研究所,是利用机载电磁感应设备(HEM)获取的。HEM 通常由激光测距仪和电磁感应设备组成。前者测量海冰表面到接收器的距离,后者获取冰水分界面到接收器的距离,两个距离的差值即为海冰(和雪)厚度[17]。该设备测量平整冰厚度时精度较高,误差±0.1 m;但测量变形冰时误差较大,可达实际冰厚的 50%[1,15]。

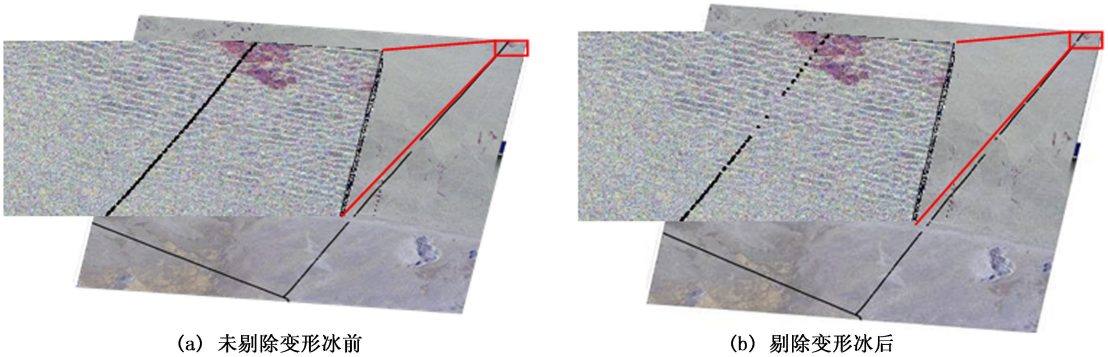
因为研究对象是一年平整冰,所以通过影像解译,尽量剔除变形冰的 HEM 数据,只用平整冰数据,这样也可以保证所用冰厚数据具有较高精度,如图 3 所示(2011 年 3 月 20 日 09:56:00 的 SAR 影像)。

2　海冰厚度和海冰后向散射特征的相关性分析

2.1　样本的选取

先根据四景影像的经纬度范围,提取该范围内 0 ~ 2 m 的 HEM 一年平整冰厚度数据;再以 HEM 数据中每一海冰厚度数据的经纬度值为中心点,利用 3×3 的窗口从 RADARSAT-2 影像中获取该点的平均极化特征参数值,并将其与对应的冰厚关联起来。

由于同一海冰厚度对应的每一 SAR 极化特征参数值可能会在一定范围内变化,直接用上面得到的特征参数值和冰厚数据进行分析,可能不容易分析两者的相关性。因此对上述数据做平均处理,在 0 ~ 2 m 范围内,每 0.1 m 为一段,分为 20 段,并对同一厚度段内的极化特征参数值进行平均,作为这一厚度段的 SAR 极化特征参数值,用于分析一年平整冰厚度的 SAR 极化响应特性。



(a) 未剔除变形冰前　　(b) 剔除变形冰后

图 3　剔除变形冰前后的 HEM 和 SAR 影像匹配图对比

Fig. 3　Comparison of deformed ice unadjusted and eliminated

2.2　相关性分析

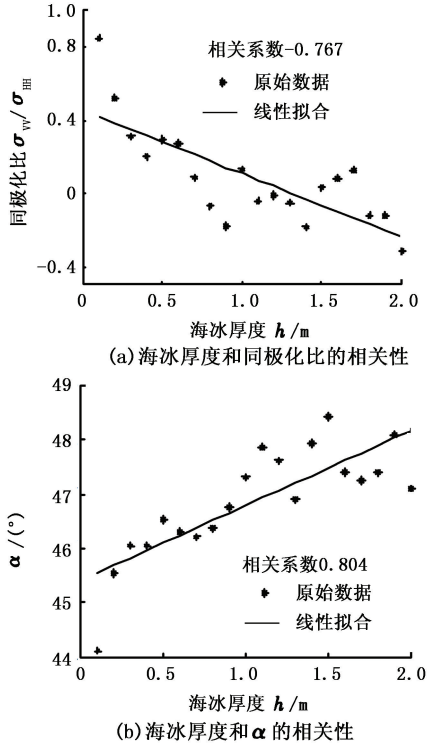
为了更好地体现不同海冰 SAR 极化特性对海冰厚度的响应特性,先将海冰 SAR 极化特性分为 6 组,再分别分析它们与海冰厚度的相关性。利用本文数据得到的一年平整冰厚度和极化特性的相关系数如表 2 所示,其中下标“H、V、R、L”分别表示水平、垂直、右圆和左圆极化。

表 2　所用的极化特性参数

Table 2　Sea-ice polarization parameters in six groups

极化特征参数		相关系数 R
后向散射系数	σ_{HH}	0.408
	σ_{HV}	0.569
	σ_{VH}	0.667
	σ_{VV}	0.033
极化相位	$Phase_{HH}$	−0.157
	$Phase_{HV}$	−0.095
	$Phase_{VH}$	−0.312
	$Phase_{VV}$	−0.413
极化比	σ_{HV}/σ_{HH}	0.556
	σ_{VH}/σ_{VV}	0.668
	σ_{VV}/σ_{HH}	−0.767
极化相位差	$Phase_{HH}—Phase_{HV}$	0.060
	$Phase_{HH}—Phase_{VV}$	0.058
	$Phase_{VH}—Phase_{VV}$	−0.155
极化相关系数	ρ_{VH-HH}	0.398
	ρ_{VV-HH}	−0.640
	ρ_{VV-VH}	−0.515
	圆极化 ρ_{RR-LL}	−0.474
$H/A/\alpha$ 分解	散射熵 H	0.718
	反熵 A	−0.508
	Alpha 角 α	0.804

从表 2 可见,一年平整冰的 Alpha 角与海冰厚度相关性最高,同极化比(σ_{VV}/σ_{HH})次之(图 4)。Alpha 角是从全极化 SAR 数据中提取出来的,描述了探测目标内部的自由度,说明了目标平均散射的“类型”。以往文献中极少研究这两者的相关性。



(a) 海冰厚度和同极化比的相关性

(b) 海冰厚度和 α 的相关性

图 4　海冰厚度和极化特性的相关性

Fig. 4　Correlations between sea-ice thickness and polarization parameters

3　海冰厚度和 Alpha 角相关性的理论分析

根据本文中数据得到的 Alpha 角和一年平整冰厚度的相关性较高,由此可以建立两者的经验方程,用以反演海冰厚度。

在海冰生长过程中,海冰表面复介电常数随着海冰厚度的增加而变化,即可以表示为海冰厚度的函数:$\varepsilon=\varepsilon(h)$。其中 ε 表示海冰表面复介电常数;h 表征海冰厚度,m。

海冰的 Alpha 角主要依赖于地物的表面复介电常数[18],即 Alpha 角是海冰表面复介电常数的函数:$\alpha=\alpha(\varepsilon)$。因而,海冰厚度和 Alpha 角可以借助海冰复介电常数这一中间变量从理论上建立一定的函数关系:$\alpha=\alpha(h)$。

3.1　海冰厚度和复介电常数的函数关系

在海冰生长增厚的过程中,海冰的盐度不断降低,介电常数也随之减小。为便于分析计算,在不影响研究结果的情况下,用相对介电常数替代介电常数。Vant 等[19]发现海冰介电常数 ε 与海冰厚度满足函数关系:

$$\varepsilon=[(1-V_b)\sqrt{\varepsilon_i}+V_b\sqrt{\varepsilon_b}]^2. \tag{1}$$

式中,ε_i 和 ε_b 分别为纯冰和卤水的介电常数;V_b 为卤水体积分量。

卤水体积分量的表达式可以写为[20]

$$V_b=10^{-3}S_i\left(-\frac{49.183}{t}+0.532\right),$$
$$t\in[-22.9\ -0.5]\ ℃. \tag{2}$$

式中,t 为海冰温度,0 ~ 2 m 海冰的温度范围满足此式的要求[21];S_i 为海冰盐度。

海冰盐度 S_i 与海冰厚度 h 的函数关系[22]可写成

$$S_i=\begin{cases}14.24-19.39h,\ h\leqslant 0.4;\\ 7.88-1.59h,\ h>0.4.\end{cases} \tag{3}$$

结合式(2)、(3),可以推得海冰卤水体积分量随海冰厚度的增加而减小,如图 5 所示。

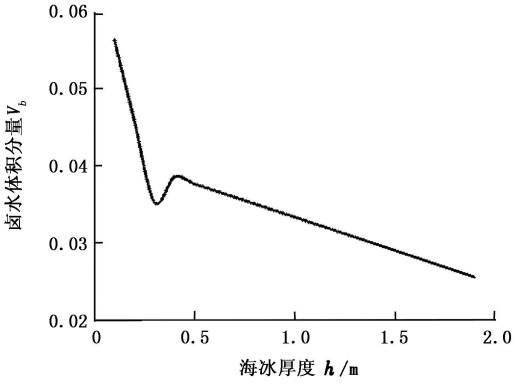


图 5　海冰厚度和卤水体积分量关系曲线

Fig. 5　Relationship between sea-ice thickness and brine volume

综合式(1) ~ (3),海冰的介电常数可以表示为海冰厚度的函数,即

$$\varepsilon=n_0+n_1h+n_2h^2. \tag{4}$$

其中,$n_i(i=0,\ 1,\ 2)$可通过式(1) ~ (3)计算得到。由于海冰复介电常数随卤水体积分量的增加而增加,因而会随着海冰厚度的增加而减小,如图 6 所示。

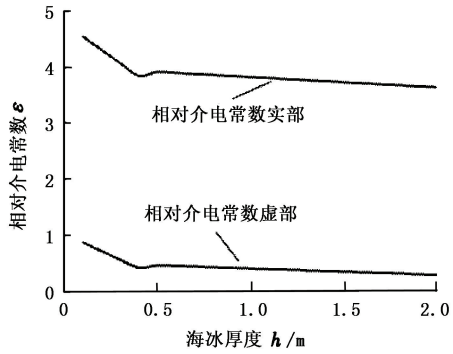


图 6　海冰厚度和介电常数的关系曲线

Fig. 6　Relationship between sea-ice thickness and dielectric constant

3.2　海冰复介电常数和 α 的关系

从海冰后向散射系数中提取的 α 主要依赖于海冰表面复介电常数。一年平整冰的表面粗糙度较小,因而可根据 Bragg 散射理论[18],将 α 表示为

$$\alpha=\arccos\left(\frac{|R_S+R_P|}{\sqrt{|R_S+R_P|^2+|R_S-R_P|^2}}\right). \tag{5}$$

其中

$$R_S=\frac{\cos\theta-\sqrt{\varepsilon-\sin^2\theta}}{\cos\theta+\sqrt{\varepsilon-\sin^2\theta}},$$
$$R_P=\frac{(\varepsilon-1)[\sin^2\theta-\varepsilon(1+\sin^2\theta)]}{(\varepsilon\cos\theta+\sqrt{\varepsilon-\sin^2\theta})^2}.$$

式中,R_S 和 R_P 分别为平行和垂直于入射面的 Bragg 散射系数,皆为海冰介电常数 ε 和入射角 θ(rad)的函数[18]。

设 $R=R_P/R_S$,则

$$2\cos^2\alpha=\frac{|1+R|^2}{1+|R|^2}. \tag{6}$$

设 $y=\varepsilon-1$, $x=\cos\theta$,则

$$R=\frac{(x-\sqrt{x^2+y})[x(y+1)+\sqrt{x^2+y}]^2}{(x+\sqrt{x^2+y})y(-2y+x^2y-1)}. \tag{7}$$

从式(7)可以看出,在入射角 θ 一定的情况下,$|R|$随着卤水体积分量的增加而增加,如图 7 所示,那么$|R|$也是海冰复介电常数的增函数。

对式(7)进一步化简,并考虑入射角一定的情况下,有

$$R=\frac{1}{a_0+a_1\zeta+a_2\zeta^2+a_3\zeta^3}+1, \tag{8}$$

其中,$\zeta=\sqrt{y}=(\varepsilon-1)^{\frac{1}{4}}$,$a_i(i=0,\cdots,3)$为待定系数。由此可得

$$2\cos^2\alpha=\frac{\left|1+\frac{1}{a_0+a_1\zeta+a_2\zeta^2+a_3\zeta^3}+1\right|^2}{1+\left|\frac{1}{a_0+a_1\zeta+a_2\zeta^2+a_3\zeta^3}+1\right|^2}. \tag{9}$$

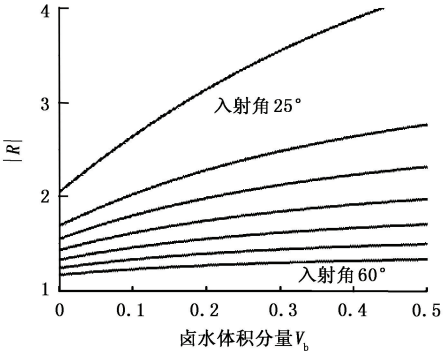


图 7　卤水体积分量和 $|R|$ 的关系曲线

Fig. 7　Relationship between brine volume and $|R|$

从式(9)可以导出 cos α 在不同入射角下都随着 $|R|$ 的增加而减小,图 8 仅以 60°入射角为例。因而 α 是 $|R|$ 的增函数,也会随着海冰复介电常数的增加而增加。

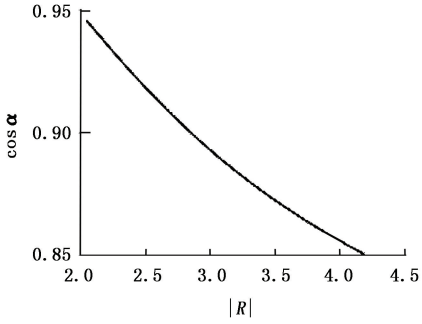


图 8　$|R|$ 和 cosα 的关系曲线

Fig. 8　Relationship between $|R|$ and cosα

3.3　海冰厚度和 α 的关系

式(9)给出了海冰复介电常数和 α 的关系。为了便于计算,化简式(9)可得:

$$\cos\alpha=b_0+b_1\zeta^{\frac{1}{2}}+b_2\zeta^{\frac{2}{2}}+b_3\zeta^{\frac{3}{2}}+b_4\zeta^{\frac{4}{2}}+b_5\zeta^{\frac{5}{2}}+b_6\zeta^{\frac{6}{2}}. \tag{10}$$

其中,$b_i(i=0,\cdots,6)$为待定系数。

将海冰厚度和复介电常数的函数方程式(4)带入式(10),可得 α 和海冰厚度的关系式为

$$\alpha=\arccos(c_0+c_1h^{\frac{1}{2}}+c_2h^{\frac{2}{2}}+c_3h^{\frac{3}{2}}+c_4h^{\frac{4}{2}}+c_5h^{\frac{5}{2}}+c_6h^{\frac{6}{2}}). \tag{11}$$

式中,h 表示海冰厚度;$c_i(i=0,\cdots,6)$为待定系数。

由于式(11)中的高阶项起到的作用可以忽略,因而只保留一阶项:

$$\alpha=d_0+d_1h, \tag{12}$$

其中,$d_i(i=0,1)$为待定系数。

由于 α 随着海冰复介电常数的增加而增加,而海冰复介电常数是海冰厚度的减函数,因而 α 随着海冰厚度的增加而减小。由此可见,α 是冰厚的函数,两者具有明显的相关性,这与图 4(b)所显示出来的两者强相关性相符。但是,图 4(b)中表现出来的是正相关,而理论结果是负相关。这个问题还须做进一步研究。

4　海冰厚度和 α 反演算法

在海冰厚度和海冰后向散射特征的相关性分析中已将海冰 SAR 影像中的极化数据和 HEM 测量的同步一年平整冰厚度数据进行了时空匹配,因而在此将匹配好的数据随机分为两组,一组用于确定待定系数 d_i,另一组用于反演海冰厚度并计算反演误差。

4.1　海冰厚度和 α 的经验模型

利用一组匹配好的数据确定待定系数 d_i,从而得到 α 和一年平整冰厚度的经验方程,如图 9 所示。

$$\alpha=1.32h+45.48. \tag{13}$$

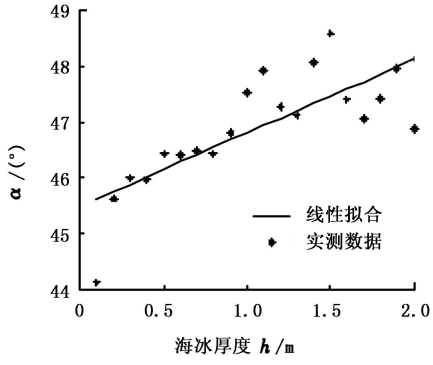


图 9　海冰厚度和 Alpha 角的拟合曲线

Fig. 9　Relationship between sea-ice thickness and Alpha angle

4.2　海冰厚度的反演

利用另一组匹配好的数据中的 α 值,结合 α 与一年平整冰厚度的经验方程,反演 α 对应的一年平整冰厚度如图 10 所示。通过对比所得海冰厚度反演结果与组 2 数据中海冰厚度的实测结果,可以计算出两组数据的相关系数为 0.81,平均绝对误差为 0.31 m,平均相对误差为 35%。

现有文献中主要用后向散射系数(σ_{HH}[14]、σ_{VV}[7]),极化比(σ_{VV}/σ_{HH}[10]、σ_{HV}/σ_{HH}[6]、σ_{VH}/σ_{VV}[6])和极化相关系数(ρ_{VVHH}[6])等极化参数建立海冰厚度反演的经验模型。利用前面匹配好的数据建立了这几个极化参数的线性模型,并分别反演了海冰厚度。对比利用本文数据和不同模型得到的海

冰厚度反演精度可以看出,α 可以用于海冰厚度的反演,如表 3 所示。

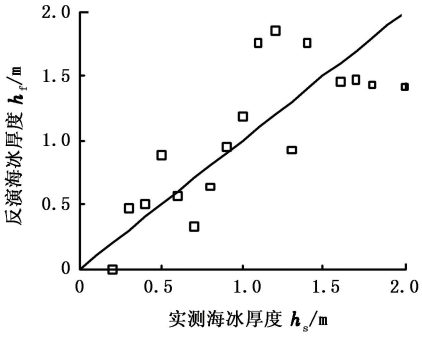


图 10　海冰厚度反演结果

Fig. 10　Comparison between measured and retrieval sea-ice thickness

表 3　不同的反演模型及其相应的反演精度

Table 3　Retrieval models and their precisions

反演模型	平均绝对误差 E/m	平均相对误差 E_r/%	相关系数 R
冰厚 $h \sim \sigma_{HH}$	0.74	109	0.36
冰厚 $h \sim \sigma_{VV}$	2.04	365	0.30
冰厚 $h \sim \sigma_{VV}/\sigma_{HH}$	0.40	42	0.65
冰厚 $h \sim \sigma_{HV}/\sigma_{HH}$	0.46	84	0.77
冰厚 $h \sim \sigma_{VH}/\sigma_{VV}$	0.38	65	0.58
冰厚 $h \sim \rho_{VV\text{-}HH}$	0.54	96	0.59
冰厚 $h \sim \alpha$	0.31	35	0.81

通过目视解译,从 2011 年 3 月 19 日 21:51:02 海冰 SAR 影像的左上角截取了一个矩形区域(234 像素×634 像素),此区域没有海水,基本都是平整冰,并提取了该区域的 α,通过经验方程反演了海冰厚度,如图 11 所示。

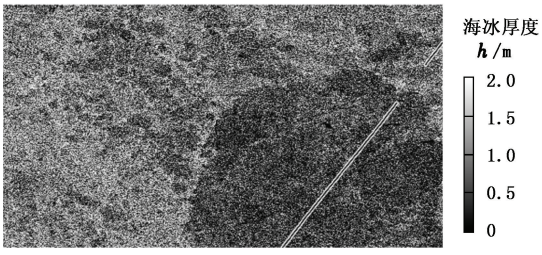


图 11　2011 年 3 月 19 日 21:51:02 SAR 影像海冰厚度反演结果(直线表征 HEM 的测量轨迹)

Fig. 11　Ice-thickness map of SAR image 3-19-2011 21:51:02, and black line representing HEM measurement orbit

5　结束语

利用拉布拉多海全极化 SAR 数据和实测一年平整冰厚度数据,通过分析海冰厚度的 SAR 极化响应特性,发现 Alpha 角对一年平整冰厚度最敏感,这表明仅用 SAR 后向散射系数等 SAR 直接提供的海冰信息,不能充分反映海冰厚度的变化。因此需要更多地利用全极化 SAR 数据特有的海冰信息,充分挖掘其与海冰厚度的联系,用于冰厚的准确反演研究,如 Alpha 角依赖于海冰表面介电常数,与海冰厚度密切相关。根据这一结论建立了一年平整冰厚度和 Alpha 角的经验方程,反演了海冰厚度。对比反演结果和实测数据,其相关性较高。利用现有文献中给出的常用经验模型和本文数据对海冰厚度进行了反演,并与本文结果进行了对比,后者误差较小,表明 Alpha 角可以作为一年平整冰厚度反演的重要参数进行进一步地研究和验证。这也证实了从全极化 SAR 数据中提取的海冰信息能够更好地反演海冰厚度。

应利用更多的全极化 SAR 影像和同步现场冰厚数据对该区域的海冰厚度进行分析,并且在时间和空间上进行拓展,研究不同海冰区域不同时段的冰厚情况,并利用 Alpha 角和海冰厚度的相关性进行海冰厚度反演。同时,实测数据和理论分析都显示了海冰厚度和 Alpha 角的强相关性,但前者给出两者正相关,而后者得出负相关。

从海冰厚度与海冰极化特性参数的相关性分析中可以看出,一年平整冰的散射熵与海冰厚度的相关性也很高。

致谢　感谢加拿大贝德福德海洋研究所提供的现场 HEM 冰厚数据。

参考文献:

[1]　HAAS C, GERLANDZ S, EICKEN H, et al. Comparison of sea-ice thickness measurements under summer and winter conditions in the Arctic using a small electromagnetic induction device[J]. Geophysics, 1997, 62(3): 49-757.

[2]　SHIH S E, DING K H, NGHIEM S V, et al. Thin saline ice thickness retrieval using time(Series C): band polarimetric radar measurements[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1589-1598.

[3]　GOLDEN K M, CHENEY M, DING K H, et al. Forward electromagnetic scattering models for sea ice[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1655-1674.

[4]　GOLDEN K M, BORUP D, CHENEY M, et al. Inverse electromagnetic scattering models for sea ice[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1675-1704.

[5]　郭井学. 基于电磁感应理论的极地海冰厚度探测研究

[D]. 长春: 吉林大学地球探测科学与技术学院, 2007.
GUO Jing - xue. Research of electromagnetic-inductive theory on the measurements of polar sea-ice thickness [D]. Changchun: Faculty of Geoexploration Science and Technology, Jinlin University, 2007.

[6] KIM J W, KIM D J, HWANG B J. Characterization of arctic sea ice thickness using high-resolution spaceborne polarimetric SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(1): 13-22.

[7] TOYOTA T, NAKAMURA K, UTO S, et al. Retrieval of ice thickness distribution in the seasonal ice zone from L-band SAR[C]. IEEE, 2007: 3997-4000.

[8] TOYOTA T, NAKAMURA K, UTO S, et al. Retrieval of sea ice thickness distribution in the seasonal ice zone from airborne L-band SAR[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(12): 3171-3189.

[9] NAKAMURA K, WAKABAYASHI H, NAKAYAMA M, et al. Study on the sea ice thickness observation in the Sea of Okhotsk by using dual-frequency and fully polarimetric airborne SAR (Pi-SAR) data[C]. IEEE, 2004: 4386-4389.

[10] NAKAMURA K, WAKABAYASHI H, UTO S, et al. Sea-ice thickness retrieval in the Sea of Okhotsk using dual-polarization SAR data[J]. Annals of Glaciology, 2006, 44: 261-268.

[11] NAKAMURA K, WAKABAYASHI H, UTO S, et al. Observation of sea-ice thickness using ENVISAT data from Lützow-Holm bay, east Antarctica[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 277-281.

[12] WAKABAYASHI H, MATSUOKA T, NAKAMURA K, et al. Polarimetric characteristics of sea ice in the Sea of Okhotsk observed by airborne L-band SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(11): 2412-2425.

[13] WAKABAYASHI H, NAKAMURA K, NISHIO F. A study on sea ice observation in the Sea Okhotsk by polarimetric SAR[C]. IEEE IGARSS IV, 2008: 1089-1092.

[14] KARVONEN J, SIMILÄ M, HALLIKAINEN M. Estimation of equivalent deformed ice thickness from Baltic Sea ice SAR imagery[C]. IEEE Conference, 2005: 5165-5167.

[15] SIMILÄ M, MÄKYNEN M, HEILER I. Comparison between C band synthetic aperture radar and 3-D laser scanner statistics for the Baltic Sea ice[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: C10056.

[16] KIM J W, KIM D, HWANG B J. Characterization of Arctic sea ice thickness using space-borne polarimetric SAR data[C]. IEEE IGARSS, 2011: 2105-2108.

[17] HOLLADAY J S. Application of airborne and surface-based EM/Laser measurements to ice/water/sediment models at Mackenzie Delta sites[C]//Geosensors Inc, 66 Mann Ave, Toronto, Ontario M4S 2Y3 Canada. Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences. 2006: 249.

[18] HAJNSEK I, POTTIER E, CLOUDE S R. Inversion of surface parameters from polarimetric SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(4): 727-744.

[19] VANT M R, RAMSEIER R O, MAKIOS V. The complex dielectric constant of sea ice at frequencies in the range 0.1-40 GHz[J]. J Appl Phys, 1978, 49(3): 1264-1280.

[20] FRANKENSTEIN G, GARNER R. Equations for determining the brine volume of sea ice from −0.58 ℃ to −22.98 ℃[J]. Journal of Glaciology, 1967, 6(48): 943-944.

[21] NAWAKO M, SINHA N K. Growth rate and salinity profile of first year sea ice in the high Arctic[J]. Journal of Glaciology, 1981, 27: 315-329.

[22] COX G F N, WEEKS W F. Numerical simulations of the profile properties of undeformed first-year sea ice during the growth season[J]. Journal of Geophysics Research, 1988, 93: 12449-12460.

(编辑 刘为清)