

基于 CP-SAR 雷达四极化重建数据的目标检测

刘荣军¹ 汪普宏²

(1. 解放军第四八零八工厂军械修理厂 青岛 266142; 2. 北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘要: 雷达的回波信号与发射信号的极化形式有关。极化信息作为电磁波特有的一种属性,可用于目标分类和识别。基于圆形发射/线性接收的简缩极化合成孔径雷达系统是相干双极化和宽测绘带成像的结合。这些数据的极化信息可以描述成一个斯托克斯向量,并用于重建4种极化的协方差矩阵。在目标探测分析时,为了从简缩极化测量结果中重建四极化数据,对比研究了3种分别由Souyris、Nord、Michael等人提出的方法。针对海洋目标探测,探讨了这3种算法在重建海杂波方面的应用。并且,初步研究表明,通过四极化数据重建得到的信息可作为空间目标识别的一种特征。

关键词: 简缩极化;极化雷达数据重建;目标探测与识别

中图分类号: TN959.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Target detection based on four polarization data reconstruction of CP-SAR radar measurement

Liu Rongjun¹ Wang Puhong²

(1. People's Liberation Army 4808 Ordnance repair Enterprise, Qingdao 266142, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Radar echoes depend on the polarization of transmitted electromagnetic waves. Polarization characteristics can be implemented to target recognition and identification. Compact polarimetry synthetic aperture radar systems based on the circular transmit and linear receive combine coherent dual polarization with wide-swath imaging. The polarization information in these data may be represented as a Stokes vector. It can be used to reconstruct several quad polarized covariance elements. To obtain the four quad polarized data and detect the target, three reconstruction algorithms have been studied: one by Souyris et al., a refined algorithm by Nord et al. and an improved method by Michael. We investigated their application for reconstructing ocean clutter for the purpose of detecting targets. Moreover, preliminary study shows that the information from the reconstructed data can be used as a feature in target recognition.

Keywords: compact polarimetry (CP); CP data reconstruction; target detection and recognition

1 引言

雷达回波信号中除幅度、相位、多普勒频移以外,还有极化特征。雷达波照射目标后,目标对照射的电磁波都有特定的极化变换(去极化)作用。描述极化效应的基础理论是极化散射矩阵。电磁波的全部极化特性可通过测量目标的散射矩阵而获得。极化散射矩阵表征了目标对极化波的散射特征,它不仅与目标的形状、大小及姿态等因素有关,而且主要与照射到目标的极化态有关,不同的极化波照射到目标上将有不同的极化散射矩阵。因此,极化散射矩阵包含着丰富的极化信息,散射矩阵是 2×2 的复数矩阵,能提供目标的

详细信息。

简缩极化技术(compact polarimetry, CP)是一种双极化合成孔径雷达成像系统,比多极化 SAR 系统拥有更多的优势^[1-2]。雷达系统分析中,包括信号模拟^[3]、信号处理^[4]和目标检测^[5],与双极化 SAR 系统相比,CP 发送一个极化和接收两个极化。与全极化 SAR 系统交替发射两路正交的极化脉冲,并用两路正交的极化通道接收信号的工作方式不同,简缩极化 SAR 只发射具有特定极化状态的单一极化脉冲,用两路相互正交的极化通道接收信号,简缩极化 SAR 较全面保持了极化 SAR 信息,有效降低了对 SAR 系统复杂度及数据下传速率的要求。根据发射及接收电磁波的极化状态,提

收稿日期:2015-03

出了若干不同的简缩极化模式,常用的有3种:1) $\pi/4$ 模式,发射45度线极化波,接收水平(H)和垂直(V)线极化波;2)双圆周极化模式(dual circular polarimetric, DCP)模式,发射左旋或右旋圆极化波,接收左旋和右旋圆极化波;3)圆周极化发射线性极化接收模式(circular transmit and linear receive, CTRLR),发射左旋或右旋圆极化波,接收水平和垂直线极化波。这3种CP模式比标准的双波线性系统(传输H或V,接收H、V)拥有一个更大数量的极化信息,尽管是四极化SAR系统带宽的2倍。然而,CTRLR系统具有一定的工程优势,导致更高的质量数据。CP-SAR系统一般用于成像^[6-7],这可通过使用CP数据估计四极化协方差矩阵^[8],进而重建伪四极化(PQ)数据^[9]来实现,也可以通过构筑简单的经验重建模型来实现^[1]。通过对几种主要方法的比较,讨论了CP数据在海上监视的应用,并提出了重建极化数据可作为一种特征用于空间目标识别。

2 基于CTRLR数据的重建四极化数据

2.1 全极化和CP的协方差矩阵

假设目标的散射特性满足互易性,即 $S_{HV} = S_{VH}$,则全极化SAR数据的散射矢量^[10]可以表示为 $k = [S_{HH}, S_{HV}, S_{VV}]^T$,相应的协方差矩阵为:

$$C = \left\langle \begin{pmatrix} |S_{HH}|^2 & \sqrt{2}(S_{HH}S_{HV}^*) & S_{HH}S_{VV}^* \\ \sqrt{2}(S_{HV}S_{HH}^*) & 2|S_{HV}|^2 & \sqrt{2}(S_{HV}S_{VV}^*) \\ S_{VV}S_{HH}^* & \sqrt{2}(S_{VV}S_{HV}^*) & |S_{VV}|^2 \end{pmatrix} \right\rangle \quad (1)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 表示矩阵元素平均。

对于CTRLR模式下CP SAR观察到的散射向量^[8]为:

$\vec{k}_{CTRLR} = [S_{RH}, S_{RV}]^T$,相应的协方差矩阵^[2]为:

$$C_{CTRLR} = \begin{pmatrix} |S_{RH}|^2 & S_{RH}S_{RV}^* \\ S_{RV}S_{RH}^* & |S_{RV}|^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} \quad (2)$$

2.2 基于CP-SAR的协方差矩阵重建方法

为了从简缩极化测量数据中,恢复全极化散射特性,对文献中的Souyris模型^[11]、Nord模型^[6]和经验模型^[1]等3种模型进行了概括总结。

2.2.1 Souyris模型

反射对称是指关于水平入射的对称媒介。这个模型在许多陆地成像场景和逆风或顺风方向的海洋成像是一致的。反射对称意味着联合极化和正交极化的后向散射系数之间完整的去相关,即 $(S_{HH}S_{HV}^*) = (S_{HV}S_{VV}^*) = 0$ 。从而,可以得到简化了的PQ协方差矩阵^[1],即:

$$C_{PQ} = \left\langle \begin{pmatrix} |S_{HH}|^2 & 0 & S_{HH}S_{VV}^* \\ \sqrt{2}(S_{HV}S_{HH}^*) & 2|S_{HV}|^2 & 0 \\ S_{VV}S_{HH}^* & 0 & |S_{VV}|^2 \end{pmatrix} \right\rangle \quad (3)$$

式(3)建立了一个基于全极化的散射行为和完全去极化的后向散射波的 S_{HH} , S_{VV} 和 S_{HV} 的关系。对于一个完

全极化散射波,一个非常小的正交极化能量是分散的,即 $|S_{HV}|^2 \approx 0$ 。此外,HH和VV后向散射波几乎是完全相关的。因此,联合极化的相关系数^[12]:

$$\rho_{HH-VV} = \frac{\langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle}{\sqrt{\langle S_{HH}S_{HH}^* \rangle \langle S_{VV}S_{VV}^* \rangle}} \quad (4)$$

将接近1,即 $|\rho_{HH-VV}|^2 \approx 1$ 。

对于完全去极化的后向散射波,平均后向散射功率并不取决于散射波的极化状态,从而有 $|\rho_{HH-VV}|^2 \approx 0$ 。所有散射能量的强度大致相同,即不依赖于极化状态,有 $|S_{HH}|^2 \approx |S_{VV}|^2 \approx 2|S_{HV}|^2$ 。

天然材料的后向散射的情况介于这两者之间。交叉极化散射强度的相关比率与同极化散射强度的平均值和同极化散射相干性的量级是相关的^[1],可表示为:

$$\frac{|S_{HV}|^2}{|S_{HH}|^2 + |S_{VV}|^2} = \frac{(1 - |\rho_{HH-VV}|)}{4} \quad (5)$$

Souyris模型对于由体积散射主导的区域最适合的,不适合于由表面或双反弹散射主导的地区。

Souyris重建算法使用CTRLR协方差矩阵的元素,从同极化相干性和正交极化散射强度的一个猜测开始,即:

$$\rho_{(0)} = \frac{-iC_{12}}{\sqrt{C_{11}C_{22}}} \quad (6)$$

$$|S_{HV}|_{(0)}^2 = \frac{C_{11} + C_{22}}{2} \left(\frac{1 - |\rho_{(0)}|}{3 - |\rho_{(0)}|} \right) \quad (7)$$

其迭代关系表示为:

$$\rho_{(i+1)} = \frac{-iC_{12} + |S_{HV}|_{(i)}^2}{\sqrt{(C_{11} - |S_{HV}|_{(i)}^2)(C_{22} - |S_{HV}|_{(i)}^2)}} \quad (8)$$

$$|S_{HV}|_{(i+1)}^2 = \frac{C_{11} + C_{22}}{2} \left(\frac{1 - |\rho_{(i)}|}{3 - |\rho_{(i)}|} \right) \quad (9)$$

从而,重建的四极化协方差矩阵为:

$$C_{PQ} = \begin{pmatrix} C_{11} - |S_{HV}|^2 & 0 & -iC_{12} + |S_{HV}|^2 \\ 0 & 2|S_{HV}|^2 & 0 \\ (-iC_{12} + |S_{HV}|^2)^* & 0 & C_{22} - |S_{HV}|^2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

2.2.2 Nord模型

Nord等人^[6]发现,式(5)中的分母4是一个较低的限制。他们的数据表明,这个比例常数会较大。

修正后的同极化散射相干系数可表示为:

$$|\rho| = \frac{|S_{HH}S_{VV}^*|}{\sqrt{|S_{HH}|^2 |S_{VV}|^2}} \quad (11)$$

式中:分母是几何平均数,也是同极化后向散射,从而可得:

$$(1 - |\rho|)(|S_{HH}|^2 + |S_{VV}|^2) \leq |S_{HH} - S_{VV}|^2 \quad (12)$$

通过比较不等式两边表达式的数量差异,将折中考虑后取:

$$\frac{|S_{HV}|^2}{|S_{HH}|^2 + |S_{VV}|^2} = \frac{(1 - |\rho|)}{N} \quad (13)$$

$$N = \left(\frac{|S_{HH} - S_{VV}|^2}{|S_{HV}|^2} \right) \quad (14)$$

这是一个 Souyris 模型的等价形式,只是将比例常数 N 用函数替换。

进行极化数据重建时,首先,最初的猜测仍然采用式(6)和(7)计算,并基于式(8)进行 ρ 的更新估计。通过整合比例函数式(13),得到 $|S_{HV}|^2$ 的精简估计^[1]为:

$$|S_{HV}|_{(i+1)}^2 = (C_{11} + C_{22}) \left(\frac{1 - |\rho_{(i)}|}{N + 2(1 - |\rho_{(i)}|)} \right) \quad (15)$$

2.2.3 经验模型

在保留 Souyris 原始模型形式的基础上,可根据经验从入射角得到 N 的估计值 \bar{N} :

$$\bar{N} = b_1 + b_2 \exp\{-\theta^b\} \quad (16)$$

采用非线性回归来拟合这个模型与观测结果,得到的模型参数为^[1]:

$$\begin{cases} b_1 = 6.52, [0.78 \sim 12.26] \\ b_2 = 18\ 305.73, [-34\ 644 \sim 71\ 255] \\ b_3 = 0.60, [0.46 \sim 0.75] \end{cases} \quad (17)$$

式中: $[\cdot]$ 中的数据表明了置信区间的估计,其中, b_2 的不确定性评估是非常重要的。

与变量 N 的重建相比,经验模型采用了式(16)表示的 N ,而其他关系相同。因此,经验模型的重建与变量 N 的重建方法是一致的。

3 应用与分析

将在直布罗陀海峡观测的数据用于船舶探测。数据中包含了不同入射角度和每个场景的平均风速及在每一个场景中比例常数的平均值 N ^[1]。

在进行目标探测时,依据 Neyman-Pearson 准则得到判决门限,并根据最大似然比检测目标。整体上,SAR 系统通常相干或非相干,因此 PQ 极化数据的判决门限可表示为:

$$DV = \vec{k}^H \cdot C_0^{-1} \cdot \vec{k} + \frac{|S_{HV}|^2}{E(|S_{HV}|^2)_0} \quad (18)$$

式中: k 是由两个元素构成的散射矢量,包含伪 HH-VV 信息, $|S_{HV}|^2, S_{HH}$ 和 S_{VV} 是伪-HV 的强度。由于 PQ 重建只是给出同极化散射的相对相位,而不是绝对相位,因此,设置 HH 极化散射相位为零。进而,设置 VV 相位,使其满足 HH-VV 相对相位,并形成 PQ 散射矢量。

针对所用到的数据,分别应用 3 种方法重建极化数据。基于互易性假设条件,得到的不同入射角条件下 3 种方法 S_{HV} 的误差,如图 1 所示。可以看出,当 $N=4$ 时,重建结果的误差较大,而当以式(14)和式(16)求解 N 时,重

建结果的误差较小。结果表明,常数 N 算法明显比 $N=4$ 和变量 N 算法更准确。

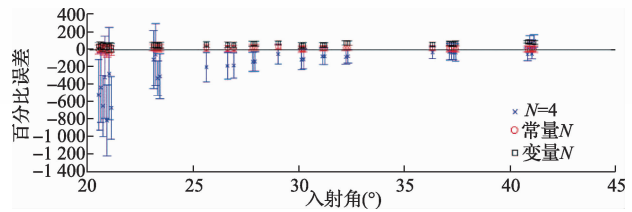


图 1 不同入射角下,3 种方法 S_{HV} 的误差

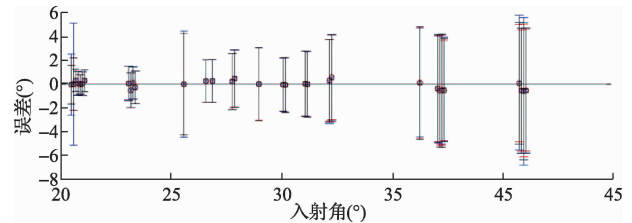
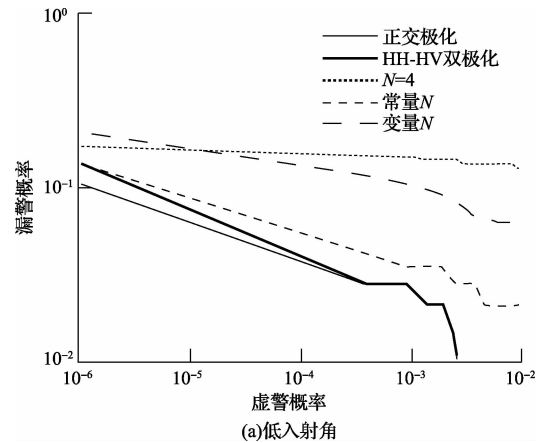


图 2 不同入射角下,常数 N 算法 ρ_{HH-VV} 的误差

进而,通过将常数 N 算法用于 $|\rho|$ 重建,结果如图 2 所示。从随入射角变化的结果可以看出,误差非常接近于零,这表明该方法具有良好的精度。

进而,通过将常数 N 算法用于 $|\rho|$ 重建,结果如图 2 所示。从随入射角变化的结果可以看出,误差非常接近于零,这表明该方法具有良好的精度。

为了研究极化数据重建方法对目标检测性能的影响,将采用这 3 种方法得到的数据用于目标检测,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,这是特别明显的情况下的船舶检测,PMDs 随着 PFM 的增加显著减小。从目标检测的对比可知,使用常数 N 重建方法的 LRT 检测算法的性能明显提高,而 $N=4$ 的方法的检测性能曲线更为平坦。



(a) 低入射角

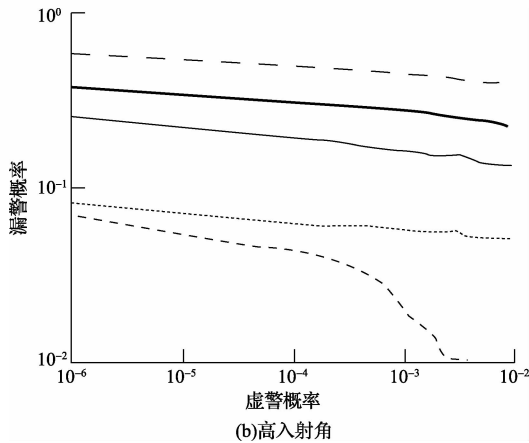


图3 船舶检测结果

4 结论

总结了公开文献中从 CTRLR CP-SAR 数据重建四极化协方差矩阵的元素的 3 个相关算法,通过对重建数据结果的对比,明确了常数 N 算法较为精确。最新研究结果表明,相对于前两种算法的基础假设,基于经验模型的算法在海洋场景中的重建性能在统计上较优,而且在船只检测中,经验算法具有优越性。在基于极化特征进行目标识别中,有望通过四极化数据重建获取所需的极化散射特征,从而可以减小观测雷达系统的测量负担和数据率,这将有利于减轻运动平台上雷达系统载荷的重量。

参考文献

- [1] COLLINS M J, DENBINA M. On the reconstruction of Quad-Pol SAR data from compact polarimetry data for ocean target detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2013, 51(1):591-600.
- [2] RANEY R K. Hybrid-polarity SAR architecture [C]. IEEE Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006:3846-3848.
- [3] 宿纪民,汪普宏. 一种超宽带相参雷达目标模拟器设计[J]. 国外电子测量技术, 2014,33(1): 65-68.

- [4] 刘明亮,朱江森. 数字信号处理对电子测量与仪器的影响研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1041-1046.
- [5] 鲁小丽,王岩飞,潘卓,等. 基于剪切波变换的 SAR 图像舰船检测[J]. 电子测量技术, 2014, 37(6): 54-58,62.
- [6] 谈璐璐. 极化与简缩极化干涉合成孔径雷达信息处理技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [7] 张红,谢镭,王超,等. 简缩极化 SAR 数据信息提取与应用[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(9): 1065-1073.
- [8] NORD M E, AINSWORTH T L, LEE J S, et al. Comparison of compact polarimetric synthetic aperture radar modes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(1):174-188.
- [9] RANEY R K, SPUDIS P D, BUSSEY B, et al. The lunar mini-RF radars: hybrid polarimetric architecture and initial results[J]. Proc eedings of the IEEE, 2010, 99(5): 808-823.
- [10] RANEY R K. Dual-polarized SAR and stokes parameters[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(3): 317-319.
- [11] SOUYRIS J C, IMBO P, MINGOT S, et al. Compact polarimetry based on symmetry properties of geophysical media: the $\pi/4$ mode[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(3): 634-646.
- [12] CLOUDE S. Polarisation[M]. United Kingdom: Oxford University Press, 2009.

作者简介

刘荣军,1982 年出生,本科,工程师。主要研究方向为舰载相控阵雷达系统、仪器与测试技术等。
E-mail:xppwgc2007@163.com