

一种基于表面散射相似度的 SAR 图像极化增强方法

陈强 匡纲要

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 针对传统极化增强在多类目标增强和极化信息保持方面存在的不足, 该文基于表面散射的相似度提出了一种新的极化增强方法。该方法根据目标表面散射的相似度, 对不同散射类型的目标相干矩阵乘以不同实系数, 从而增大了表面散射的目标与其它散射的目标的对比差异。同时由于该方法将表征目标的相干矩阵作为整体进行运算, 因而保持了目标的极化信息。最后利用 NASA SIR-C/X-SAR 实测极化数据验证了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 极化增强; 散射机理

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)11-2710-04

A New Method of Polarimetric Target Enhancement Based on Surface Scattering Similarity Parameter

Chen Qiang Kuang Gang-yao

(Department 1, SESE, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to overcome the insufficiency of traditional algorithms in multi-target enhancement and polarimetric signature preservation, a new method is proposed to enhance targets in polarimetric SAR imagery. Based on the similarity parameter between target scattering matrix and surface scattering matrix, the coherency matrix of random target corresponding to different scattering mechanisms is multiplied by relevant real coefficient, thus it enlarges the otherness between surface scattering targets and other scattering targets. As coherency matrix is operated as a whole in this method, it does not change the relationship between the elements of coherency matrix and then preserves polarimetric information in SAR imagery. Utilizing fully polarimetric data obtained by SIR-C/X-SAR to test this method, the result is satisfactory.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Polarimetric target enhancement; Scattering mechanism

1 引言

在极化雷达遥感领域, 极化增强是提高雷达检测性能及目标分类、识别准确度的重要环节。极化增强的目的就是充分利用包含于极化 SAR 数据中的极化信息对感兴趣的目标或区域进行增强处理。目前该领域的研究主要集中在两个方面, 即图像增强^[1-4]和目标增强^[5-7]。由于 SAR 图像存在固有的斑点噪声, 在对极化 SAR 图像做进一步的图像处理之前, 必须对其进行去斑处理, 去斑后图像边缘、纹理等结构信息更加清晰, 从而实现了整幅图像的增强。而针对图像中特定目标的极化增强, 就是提高目标与杂波背景或周围其它目标之间的对比度。传统的目标极化增强问题, 亦即相对最优极化问题^[7], 它通过调整发射天线和接收天线的极化状态使感兴趣目标的散射回波功率或天线接收功率最大, 同时使杂波背景或周围其它目标的散射回波功率或天线接收功率最小, 从而增大两类目标之间的功率比, 典型如“三步法(TSP)”^[5], 极化匹配滤波(PMF)^[8]等。尽管该类算法很好地解决了两类目标的最优化问题, 但也存在如下不足: (1)

目标对比度最优的判决函数采用的是两类目标的功率之比最大, 经过最优处理后输出为一幅功率图, 极化信息全部丢失, 不利于后续的极化检测、分类及识别等; (2) 增强或抑制的目标为人工选取, 且不能对多类目标同时增强或同时抑制, 从而不利于目标极化增强的自动化。针对以上问题, 本文基于表面散射的相似度给出了一种新的极化增强方法。该方法根据目标表面散射的相似度值, 对不同散射类型的目标相干矩阵乘以相应的实系数, 从而增大了表面散射的目标与其它散射类型目标之间的差异性。由于该方法将表征目标信息的相干矩阵作为整体来进行运算, 因而保持了目标的极化信息。文章结构安排: 第2节给出了基于表面散射相似度的极化增强方法; 第3节采用 NASA SIR-C/X-SAR 对天山森林地区观测的全极化 L 波段数据, 考察了该方法的极化信息保持情况, 并就其在目标增强方面的性能与应用较为广泛的极化白化滤波(PWF)^[1], 极化匹配滤波进行了比较; 第4节是结束语。

2 基于散射机理的极化 SAR 图像目标增强的新方法

当雷达电磁波照射目标时, 由于实际地形目标物理特性

(包括几何结构、材料、湿度等)的复杂性,其往往表现出多种散射特性,如表面散射、偶次散射等,因而在分析地物目标的极化散射特性时,就必须知道各种散射对于后向散射的贡献值,根据这些贡献值判别目标的主要散射和其它散射分布情况, FREEMAN 分解^[9]为此分析提供了手段。FREEMAN 分解中偶次散射对应二面角散射体的散射(如城区、森林等),体散射对应类似树冠层或蔬菜地的散射(如森林等),表面散射又称单次反射,是一种比较普遍的散射,任何实际地物(分布性)目标在雷达电磁波照射下都存在这种散射。在后向散射情况下,除镜面反射目标外,目标雷达回波中始终存在表面散射,只是不同地物目标其表面散射对后向散射回波贡献值的大小不同,因而表面散射的贡献值可作为目标的共同极化特征用于区别不同的地物目标。表面散射的贡献值具有以下特性:(1)当两个目标的表面散射的贡献值都非常大时,可以判别两个目标都以表面散射为主;(2)当它们的贡献值非常小时,即便二者相等也不能判别它们具有相同的散射特性。因此根据表面散射贡献值的大小就能将表面散射的目标与其它散射目标相区别。利用该特性,如果根据表面散射对目标后向散射贡献值的大小,对不同的地物目标乘以相应比例的实系数,就能改变表面散射的目标与其它散射目标之间的对比关系,从而有利于后续的目标检测、分类及识别等处理。

由于 FREEMAN 分解假设目标满足反射对称,且求解表面散射贡献值的计算相对复杂,因而这里介绍另一种与表面散射的贡献值具有相同特性的极化特征量——表面散射的相似度^[10]作为替代。在单站互易条件下,目标的极化散射矩阵为对称矩阵。以水平极化(H)和垂直极化(V)为极化基,有

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{HV} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 S_{HV} 表示垂直极化发射和水平极化接收的目标后向散射系数,其它元素定义类同。该目标对应的 PAULI 基矢量和相干矩阵^[11]分别为

$$\mathbf{K} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV}, S_{HH} - S_{VV}, 2S_{HV}]^T$$

$$\mathbf{T} = \langle \mathbf{K} \cdot \mathbf{K}^H \rangle = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |S_{HH} + S_{VV}|^2 \rangle \\ \langle (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle \\ 2 \langle S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle \\ \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle \\ \langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle \\ 2 \langle (S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ 2 \langle S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle \\ 4 \langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 为集合平均, \mathbf{T} 为转置, \mathbf{H} 为共轭转置, $*$ 为复共轭。如果两个目标对应的 PAULI 基矢量分别为 \mathbf{K}_1 , \mathbf{K}_2 , 则它们的相似度^[10]定义为

$$r(\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2) = |\mathbf{K}_1^H \mathbf{K}_2| / (\|\mathbf{K}_1\|_2 \|\mathbf{K}_2\|_2) \quad (3)$$

其中 $\|\cdot\|_2$ 为 2-范数。利用该定义,可导出任意分布性目标与表面散射目标的相似性参数为

$$r(\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2) = \frac{|S_{HH} + S_{VV}|^2}{2(|S_{HH}|^2 + |S_{VV}|^2 + 2|S_{HV}|^2)}$$

$$= \frac{T_{11}}{T_{11} + T_{22} + T_{33}} = \frac{T_{11}}{\text{Span}} \quad (4)$$

式中 T_{ii} ($i = 1, 2, 3$) 为相干矩阵主对角线上元素, Span 为总功率。由式(4)可知,相似度的取值范围为 $[0, 1]$, 当地物目标以表面散射为主时,其与表面散射的相似度接近于 1, 反之则相对较小。对于不同地物目标而言,如果它们具有相同的散射特性,那么其表面散射的相似度值接近或相等,当且仅当它们与表面散射的相似度值接近 1 时,该逆命题才成立。显然这与表面散射对目标后向散射的贡献值具有相同的特性。

在 SAR 图像中,通常偶次散射的目标表现为亮纹(灰度值较大),表面散射的目标表现为暗纹(镜面反射除外),体散射的目标灰度值介于二者之间。为了增大表面散射的目标与其它散射类型目标之间的对比度,只需对表面散射的目标乘以较小的实系数,而其它散射的目标乘以较大实系数。根据表面散射的相似度,采用 $1 - r$ 作为对应目标的乘积系数正好符合要求。在极化雷达领域,通常采用矩阵形式来表征目标特征,如极化散射矩阵、相干矩阵等,而由于相干矩阵主对角线上各元素对应不同类型的散射,因而在分析分布性目标的散射特性时,往往采用这种目标表征形式。结合以上讨论,假设两种不同散射类型的地物目标分别用相干矩阵 \mathbf{T}_s , \mathbf{T}_e 表示,根据相应的表面散射相似度值,对它们乘以不同系数,二者变为 $\mathbf{T}_s(1 - r_s)$, $\mathbf{T}_e(1 - r_e)$ 。由此处理之后它们总功率之比为

$$\frac{\text{Span}_e^a}{\text{Span}_s^a} = \frac{\text{Span}_e^b}{\text{Span}_s^b} \frac{(1 - r_e)}{(1 - r_s)} = \frac{\text{Span}_e^b}{\text{Span}_s^b} C \quad (5)$$

下标 s , e 分别表示表面散射,偶次散射;上标 a , b 表示处理后,处理前。由于 $r_s > r_e$, 则 $C > 1$, 即表面散射的目标和偶次散射的目标的相干矩阵中对应元素之比及其迹之比都增大了 C 倍。值得注意的是,由于该方法是将相干矩阵作为一个整体进行运算处理,因而各元素之间的相关性并没有改变,目标的极化信息得到很好保持。对整幅 SAR 图像进行处理,以相干矩阵首元素为例,其处理公式为

$$[T_{11}]_{n \times m}^a = [T_{11}]_{n \times m}^b \cdot (1 - [r]_{n \times m}) = [T_{11}]_{n \times m}^b \cdot ([T_{22}]_{n \times m}^b + [T_{33}]_{n \times m}^b) / ([T_{11}]_{n \times m}^b + [T_{22}]_{n \times m}^b + [T_{33}]_{n \times m}^b) \quad (6)$$

式中 $[]_{n \times m}$ 表示 n 行 m 列矩阵, \cdot 和 $/$ 分别表示矩阵对应元素相乘、相除。

3 仿真实验与分析

本文采用 NASA SIR-C/X-SAR 于 1994 年对我国天山

森林地区观测的全极化(L波段)图像进行森林中道路检测。该数据为4字节浮点数,数据大小为 900×450 。图1(a)~1(c)为该地区的3个通道(即HH, HV及VV)的强度图像,每幅图像灰度值对应的动态范围分别为0~570.395, 0~2.457, 0~900.541。图中较暗的部分,树木已被砍伐,直线为道路。图1(d)为对该图像进行了FREEMAN三成份分解后的RGB伪彩图,其中红色表示偶次散射,蓝色表示表面散射,绿色表示森林树冠层散射或蔬菜地散射,可见道路、砍伐出等部分表面散射占主导,森林部分主要表现为体散射。值得注意的是图1(a), 1(c)两图中有一块较亮的区域,由于不知道其对应实际地物情况,所以这里不做考虑。

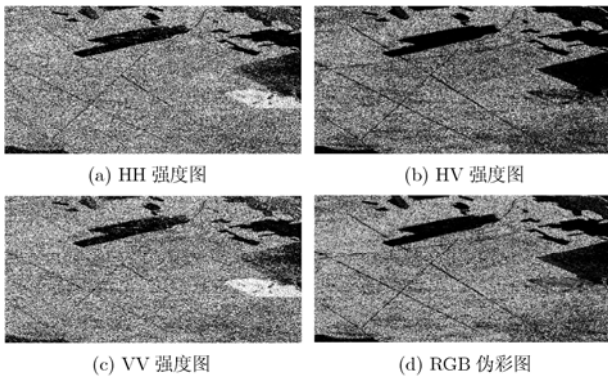


图1 天山森林地区 SAR 图像及其 RGB 伪彩图

本文提出的基于散射机理的极化增强方法,其关键点是根据表面散射的相似度对不同散射的目标相干矩阵乘以相应的实系数。由于该方法将相干矩阵作整体运算,因而矩阵中各元素的相关性并没有改变,目标的极化信息得到很好的保持,从而克服了传统极化增强在这方面的缺陷。图2考察了本文方法处理前后的同极化和交叉极化响应图^[4]。在该地区森林部分选取一块均匀区域,计算其同极化(发射天线和接收天线极化状态相同)和交叉极化(发射天线和接收天线极化状态正交)时天线接收功率随极化方位角和椭圆率角变化的情况。图2中横坐标为极化方位角,纵坐标为椭圆率角,单位为度,颜色由蓝到红,对应数值依次增大。由图可以看出,处理前后该均匀区域极化散射特性整体上没有大的变化,峰值点也都在 $(90^\circ, 0^\circ)$ 处,但局部极值位置和等功率曲线形状却有细微变化,其原因是所选择的均匀区域尽管以体散射为主,但像素点对应的实际地物的体散射对后向散射的贡献值在空间位置上细微波动,极端情况就是当体散射对后向散射贡献值恒定时,处理前后极值位置、等功率线形状等完全一致。

为了分析考察本文方法在目标增强方面的性能,这里选取当前应用比较广泛的极化白化滤波(PWF),极化匹配滤波(PMF),Span总功率(极化散射矩阵各元素的平方和)与本文方法进行了比较实验。由于本文方法是增大表面散射的目标

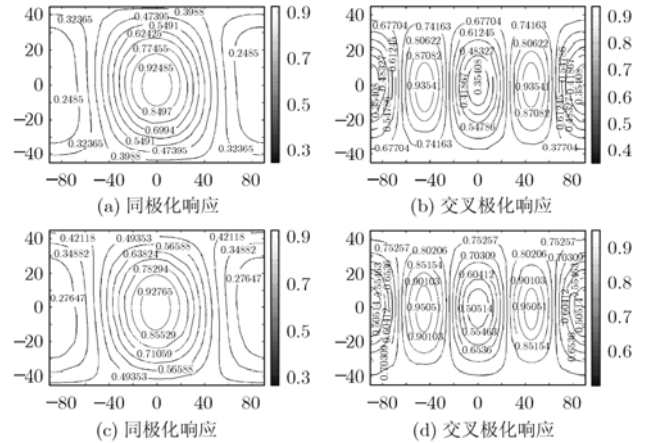


图2 本文方法处理前后同极化和交叉极化响应图

((a), (b)为处理前, (c), (d)为处理后)

与其它散射类型的目标之间的对比度,因而选取偶次散射、体散射都比较强的森林区作为背景杂波,而以表面散射为主的道路、砍伐处为目标,则目标的信杂比定义为

$$\frac{t}{c} = -\log\left(\frac{P_T}{P_C}\right) \text{ (dB)} \quad (7)$$

其中 P_T , P_C 分别为目标、杂波的平均功率。图3为采用以上方法处理结果。与图1中单通道图像相比,处理之后图像中道路、砍伐处等目标的边缘、轮廓都变得更加清晰,尤其是图像中间最大块砍伐处下的道路,在单通道图像中几乎看不见,本文方法处理后,能清晰的辨识出来。表1中列举了图1(a)~1(c)、图3(a)~3(d)中砍伐处1, 砍伐处2, 砍伐处3及道路与森林杂波之间的信杂比,其中 X 表示图像横坐标, Y 为纵坐标, $[X_1, Y_1, X_2, Y_2]$ 表示图像中坐标点 (X_1, Y_1) 和 (X_2, Y_2) 确定的矩形区域(即被考察目标)。表1中第3~5列为单通道图像(即未经算法处理)中的目标信杂比,第6列为Span总功率图中目标信杂比,最后三列依次经过PMF, PWF和本文方法处理之后的目标信杂比。表中算法处理之后的信杂比普遍高于单通道情况下的目标信杂比,说明这些方法对目标都有不同程度的增强效果。尤其是本文方法处理后的信杂比,不仅普遍高于单通道情况下,而且高于其它算法处理后的目标信杂比,说明该方法对目标增强效果最好。4个被考察的目标中道路目标被增强的效果不是很明显,可能原因是道路受到两旁树林影响,造成其表面散射的相似度接近森林区表面散射的相似度小。

4 结束语

极化增强作为基于极化SAR图像数据的目标检测、分类及识别等图像处理之前的一级预处理,对于提高后续图像处理性能具有重要作用。本文针对传统极化增强算法存在的问题,基于表面散射的相似度提出了一种新的极化增强算法。该方法增大了表面散射的目标与其它散射目标之间的对比差异,同时保持了目标的极化信息。与应用较为广泛的PWF, PMF等极化增强算法相比,该方法计算简便,增强

表 1 目标信杂比(t/c)(森林背景 $X_1=37$, $Y_1=101$, $X_2=134$, $Y_2=155$)

地 物	$[X_1, Y_1, X_2, Y_2]$	HH(dB)	HV(dB)	VV(dB)	Span(dB)	PMF(dB)	PWF(dB)	本文方法(dB)
砍伐处 1	[332,91,405,110]	2.3738	5.7430	1.5410	2.2224	3.0201	3.4209	5.7707
砍伐处 2	[804, 80, 863, 107]	5.1065	6.1892	4.0944	4.8325	5.5048	5.5395	6.4961
砍伐处 3	[780, 180, 868, 223]	2.6720	5.0085	1.6112	2.4007	2.5689	3.3957	5.2641
道 路	[127,231,134,235]	1.7147	2.1027	1.3642	1.6646	1.0641	1.8368	1.7559

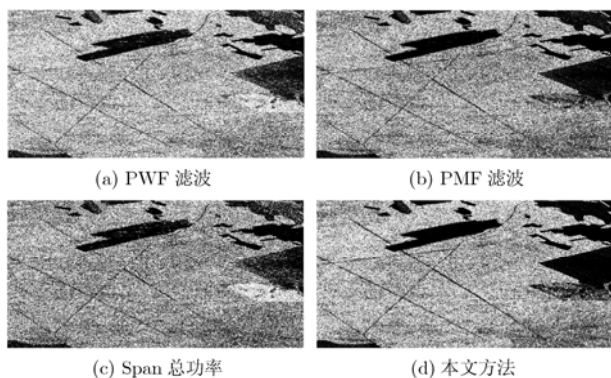


图 3 各种方法处理结果比较

效果也比其它算法明显。尽管本文在实验部分深入地考察了该方法的目标增强效果和极化信息的保持情况,但对该方法其它方面的性能分析还远不够,比如图 3(d)中图像的斑点噪声较单通道图像明显减少,就其原因可能与极化 SAR 数据的统计特性有关,深入的分析工作将在以后展开。

参 考 文 献

- [1] Novak L M and Burl M C. Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery[J]. *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, 1990, 26(2): 293-305.
- [2] Lee J S, Grunes M R, and Mango S A. Speckle reduction in multipolarization, multifrequency SAR imagery[J]. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1991, 29(4): 535-544.
- [3] Lee J S and Grunes M R. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification[J]. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2363-2373.
- [4] Lee J S, De Grandi G, and Grunes M R, *et al.* Polarimetric signature preservation in SAR speckle filtering[A].

IGARSS'96[C], Lincoln, NE, USA, 1996: 1574-1576.

- [5] Kostinski A B and Boerner W M. On the polarimetric contrast optimization[J]. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1987, AP-35(8): 988-991.
- [6] Yang J, Yamaguchi Y, and Boerner W M, *et al.* Numerical Methods for Solving the Optimal Problem of Contrast Enhancement[J]. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2000, 38(2): 965-971.
- [7] 杨健, 彭应宁. 相对最优极化的最新进展[J]. *遥感技术与应用*, 2005, 20(1): 38-41.
- Yang J and Peng Y N. Recent development of the optimization of polarimetric contrast enhancement. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(1): 38-41.
- [8] Verbout S M, Netishen C M, and Novak L M. Polarimetric techniques for enhancing SAR imagery[A]. Proceedings of SPIE Synthetic Aperture Radar[C], Los Angeles, CA, USA, 1992: 141-173.
- [9] Freeman A and Durden S L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data[J]. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1998, 36(3): 963-973.
- [10] Yang J, Peng Y N, and Lin S M. Similarity between two scattering matrices[J]. *Electron Lett*, 2001, 37(3): 193-194.
- [11] Lee J S and Boerner W M, *et al.* A review of polarimetric SAR algorithms and their applications[J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, 9(3): 31-90.

陈 强: 男, 1980 年生, 博士生, 从事基于极化 SAR 图像的目标增强、散射特性分析等方面的研究工作。

匡纲要: 男, 1966 年生, 博士, 教授, 主要从事雷达信号处理、SAR 图像判读等领域的研究工作。