

多极化合成孔径雷达数据伪彩色合成处理¹

刘宏春 杨汝良

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要 本文研究了利用多极化合成孔径雷达(SAR)数据产生极化伪彩色合成图的方法,提出了用 M_{11} 归一化后得到的Stokes矩阵来产生目标的极化合成孔径雷达伪彩色图的新方法。由于它消除了目标总功率大小对图像色彩的影响,因而可以分析场景回波功率太强或太弱目标与极化特征图具有相同形状的目标。另外,还提出用极化特征图方法求出三种极化组合,使两类目标的回波功率相差达到最大,再合成处理成极化合成孔径雷达伪彩色合成图的方法。

关键词 极化合成孔径雷达, Stokes矩阵, 极化特征图, 伪彩色合成

中图分类号 TN957.7, TN958

1 引言

多极化合成孔径雷达通过发射、接收正交线性极化波获取场景目标的极化散射矩阵。极化散射矩阵能包容更多的目标散射特性,因此在多极化合成孔径雷达(SAR)图像的处理过程中我们可以用不同的色彩代替灰度图来表现场景目标的极化散射矩阵,以达到突出图像信息的目的。经过图像彩色增强处理,例如彩色密度分割、伪彩色增强,图像的信息识别效果会获得很大的改善。

在单极化合成孔径雷达中,由于归一化产生图像时所处理的数据是地面目标在单极化条件下的回波功率,只能先产生灰度图,再用彩色增强的方法产生伪彩色图,所用到的彩色增强技术往往是彩色密度分割^[1]。在本文中,我们提出多极化合成孔径雷达数据利用极化合成的方法产生任意极化组合下的回波功率,并从中选择三种极化组合方式回波功率通过一定的归一化方法合成一幅极化SAR伪彩色图像。由于地面目标在不同极化组合时回波功率是不同的,我们用彩色合成的方法把差异信息综合地反映出来,这时图像上目标信息差别显著地扩大了,提高了目标的识别效果。同时,在极化组合处理过程中,我们提出用归一化Stokes矩阵的方法,这样可以分析场景回波功率太强或太弱目标及极化特征图具有相同形状的目标。

2 目标的Stokes矩阵及极化特征图

在后向散射坐标系(BSA)中,极化合成孔径雷达发射、接收的电磁波可以表示如下^[2]:

$$\begin{aligned} E^t &= E_v^t \hat{v}_t + E_h^t \hat{h}_t, \\ E^r &= E_v^r \hat{v}_r + E_h^r \hat{h}_r, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 E^t 表示发射的电磁波, E^r 表示接收的电磁波。根据Sinclair的论文^[3], E^t 、 E^r 之间的关系为

$$\begin{bmatrix} E_v^r \\ E_h^r \end{bmatrix} = \frac{e^{jk_0 r}}{r} \begin{bmatrix} h_{vv} & h_{vh} \\ h_{hv} & h_{hh} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_v^t \\ E_h^t \end{bmatrix} \quad \text{或} \quad E_t = [h]E_r, \quad (2)$$

¹ 1998-07-14收到, 1999-04-05定稿

其中 r 是散射目标与接收天线之间的距离; k_0 是电磁波的波数, 而 $[h] = \begin{bmatrix} h_{vv} & h_{vh} \\ h_{hv} & h_{hh} \end{bmatrix}$ 被称为目标极化散射矩阵^[2], 矩阵中的每一元素都是复数. 电磁波的频率、散射与辐射的角度及散射目标的位置状态都会影响矩阵元素的值. 全极化合成孔径雷达的原始极化数据经过常规合成孔径雷达成像处理及极化定标处理就得到了极化散射矩阵. 为了完整地反映目标的极化散射特性, 在成像处理过程中需要保持极化散射矩阵各元素之间的相位关系.

根据 (2) 式, 接收天线所吸收的功率可表示为

$$P_{rec} = K S_r^T [M] S_t, \quad (3)$$

其中上标 T 表示转置, S_t 、 S_r 分别表示发射、接收天线的归一化 Stokes 向量.

在极化理论文献中, $[M]$ 被称为 Stokes 矩阵^[4]. Stokes 矩阵能完整地表示目标极化散射特性, 其元素可以用目标极化散射矩阵 $[h]$ 的元素表示出来, 这意味着 Stokes 矩阵和极化散射矩阵是完全等价的. 在已知目标的 Stokes 矩阵的情况下, 可以计算出在某一特定极化组合时, 接收机所获取的功率, 这一处理过程被称为极化合成. 只要某一地域目标的极化散射特性被完全获取, 经过极化合成处理的图像比固定极化合成孔径雷达的图像包含更多的信息.

由于用不同极化组合所产生的图像来分析特定目标的极化特征, 与图像归一化因子及人眼对不同范围的灰度变化敏感度大小紧密相连, 因而不能直观地表现目标的极化散射特性. 为此引入极化特征图的概念来具体分析某一种或一类目标的极化散射特性^[5]. 根据 (3) 式, 在已知目标的 Stokes 矩阵情况下, 确定发射和接收天线的极化状态后, 我们能求出对应的回波功率. 在不同发射、接收极化状态下, 不同的目标的极化回波功率变化不一样. 当发射天线和接收天线的极化状态一致时, 我们称此时的天线处于相同极化组合; 当发射天线和接收天线的极化状态正交时, 我们称此时的天线处于正交极化组合. 在相同极化组合、正交极化组合条件下, 我们计算出某一目标在不同发射天线极化状态下的回波功率大小. 由于发射极化状态的参数是两个变量, 用三维图的方式将不同回波功率大小表示出来, 这一图形就被称为极化特征图. 极化特征图能部份地反映在不同极化组合下目标回波功率大小, 可以用来分析目标的极化特性. 在相同极化的情况下, $S_r = S_t$; 在正交极化的情况下, 接收天线 Stokes 向量中的 S_1 、 S_2 和 S_3 是发射天线 Stokes 向量中对应量的负值. 而极化状态是用极化波的方向角与椭圆角来描述, 其取值范围方向角为 $0^\circ - 180^\circ$, 椭圆角是 $-45^\circ - +45^\circ$.

3 多极化合成孔径雷达伪彩色合成方法

伪彩色图能充分地反映合成孔径雷达获取的场景数据所包含的目标信息. 利用极化合成孔径雷达数据产生场景的伪彩色图有以下三种不同的方法: (1) 利用彩色密度分割的方法处理极化 SAR 图像的总功率图; (2) 地面的 HH、HV 和 VV 的回波功率归一化处理后分别对应伪彩色图中的三原色产生一幅伪彩色图; (3) 用极化特征图求出在相同极化组合和正交极化组合下的具有最大功率相差值点所对应的三种极化组合方式, 再分别归一化处理成伪彩色图中的三种原色. 其中 (2) 式和 (3) 式就是极化 SAR 伪彩色合成处理方法, 它将三种极化组合下目标的回波功率归一化处理成三幅灰度图, 用彩色合成的方法来表示这三幅图的信息. 而 (3) 式也可称为极化 SAR 伪彩色增强方法. 由于引入了彩色的表示方法, 增强了对场景目标间的区分能力.

极化 SAR 彩色合成出的伪彩色图像中任意一点的三原色数值确定了该点的色彩, 其三原色数值由所选择三种极化组合方式及归一化方法决定. 由于在不同极化组合下, 目标的回

波功率相差较大,例如 HH 的回波功率比 HV 的回波功率大 10dB,因而对三种不同极化回波功率采用同一归一化因子会造成三原色数值的分布不均匀,合成后的图像只以某一种或几种色彩为主,不能明显地提高对目标的识别能力。我们对三原色通道分别采用各自的归一化因子进行处理,这样能扩大彩色的动态范围,增大不同目标的彩色差异。极化组合方式也是影响目标成像色彩的因素,不同的目标在不同的极化组合时的回波功率存在较大差异,这样在固定归一化因子的条件下,同一分辨单元内的色彩在不同极化组合时也会发生变化。最简单的极化 SAR 伪彩色合成处理数据方法是三原色分别对应地面的 HH、HV 和 VV 的回波功率。在这样的情况下,我们能比较准确区分的目标是在 HH、HV、VV 的回波功率相差较大的目标。

在极化 SAR 彩色合成时,我们可以把其中的一种或几种原色用回波功率之外的极化特征值表示,例如:某些极化组合的相位差、相关系数。目标的极化特征图形状是区分目标类别的重要因素,对于很多类目标尽管总功率不同,然而其极化特征图的形状是相同的。极化特征图的形状反映的是 Stokes 矩阵中 M_{11} (目标的总功率)与其它元素之间的关系。因而,我们可以把 Stokes 矩阵中的元素用 M_{11} 进行归一化处理产生一个新的矩阵 M_c ,再在此基础上用 HH、HV 和 VV 产生回波相对功率,这时合成的伪彩色图反映的信息是三种极化组合下目标的回波功率相对总功率的比值大小。这一方法在处理对某些回波功率太强或太弱的目标进行区分识别时比较有用。由此,我们提出方法(2)和(3)中用极化合成计算回波功率时,可分别采用 Stokes 矩阵和用 M_{11} (目标的总功率)归一化处理后的 Stokes 矩阵。

为了增大目标间的色彩差异,我们根据两类目标的 Stokes 矩阵求出目标回波功率相差最大时的极化组合,再把这时归一化处理后的回波功率作为一种原色。值得注意的是,两类目标在不同极化时回波功率大小的相对关系有三种情况:(1)在任意极化组合时,目标 A 的回波功率始终大于目标 B 的回波功率;(2)在任意极化组合时,目标 B 的回波功率始终大于目标 A 的回波功率;(3)在某些极化组合时,目标 A 的回波功率大于目标 B 的回波功率,在另一些极化组合时,目标 B 的回波功率大于目标 A 的回波功率。第 1、2 种情况下,我们所选的极化组合是两类目标回波功率相差最大的点,这样的点只有一个,其余原色对应的极化组合可以根据实际成像效果选用 HH、HV 和 VV 中的两种;第 3 种情况下,我们仍选两类目标回波功率相差最大的极化组合点,此时点有两个,另一原色对应的极化组合可以根据实际成像效果选用 HH、HV 和 VV 中的一种。由于上述对回波功率相差最大值的求解过程是建立在所有极化组合的基础上,求解过程较为复杂。我们在后文处理实际例子中利用两类目标的极化特征图的方法,用数值的方法求出最优极化组合,即从相同极化特征图和正交极化特征图中选出三原色对应的极化组合方式。

4 几种极化 SAR 伪彩色合成处理的比较

我们对从美国 JPL 数据供应中心获得的机载多极化合成孔径雷达数据进行了伪彩色合成处理,这是美国 NASA/JPL 机载全极化合成孔径雷达系统于 1992 年在美国的 Death Valley(死亡峡谷)地区获取的全极化数据。图 1 是该地区的总功率图,飞机飞行线路平行于图的顶部,采用左侧视的方式,其地区的面积大小为 12.2km(方位向)×8.5km(距离向)。



图 1 Death Valley 的总功率图

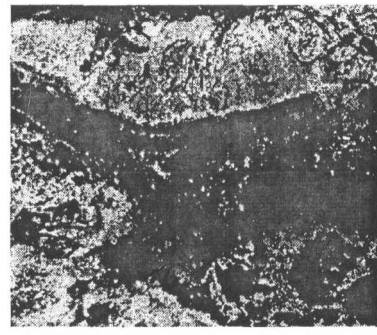


图 2 Death Valley 的分割图 (原图为彩色)

Death Valley 的地形极为复杂, 图 1 所示的部份被称为 Cottonball Basin, 其正上方是一块冲积而成的区域, 右上角是起伏较大的山脉。图的中部是一大块盐碱地, 其中较亮的地区是地形比较粗糙的盐碱地, 而较暗的地区是地形相当光滑的盐碱地。在图的左边边缘由底部起的三分之一处较亮的地方是当地的看林场站, 包括几间房屋和一条供小型飞机起降的跑道, 其周围是林场。图 2 是利用 Death Valley 的总功率图产生的彩色分割图, 所采用的色彩转换表是软件 Matlab 中的 HSV。该图由于所用的转换色彩是以较引人注目的红色、黄色、绿色和蓝色为主, 因而比较清楚地表现了不同目标在总功率上的差异。图 3 是用 HH、HV、VV 的回波功率图合成的极化 SAR 伪彩色合成图, 其三原色对应关系是: 红 = HH, 绿 = HV, 蓝 = VV。我们从图中可以直观地了解不同目标 HH、HV、VV 回波功率之间的关系, 例如右上角的山脉的 HV 回波强度比周围其它目标要高出许多, HV 回波强度较高的目标还包括看林场站周围森林; 粗糙盐碱地的三种回波强度都比较高, 而光滑的盐碱地三种回波强度都很低; 图中的冲积区域呈紫色, 这说明这片区域的 HH、VV 回波强度较高。图 4 是归一化 M_{11} 后在 HH、HV、VV 极化条件下获得的极化伪彩色合成图, 其三原色对应关系是: 红 = HH, 绿 = HV, 蓝 = VV。在图中, 由于我们在极化合成处理时所用的 Stokes 矩阵是用 M_{11} 归一化过后的 M_c , 因而在很大范围内其色彩能表示在极化特征图中具有相同形状的目标, 例如在总功率图中粗糙的盐碱地和光滑的盐碱地的回波强度相差极大, 然而在图 4 中, 这两部份的色彩都是蓝色的, 说明在极化特征图中, 这两种盐碱地具有相同的形状。由于我们去掉了总功率信息, 因此我们能分析在总功率图中最亮和最暗部份的目标, 例如看林场站在图 4 中被分成橙色和黄色两部份, 其中的橙色部份极有可能是飞机跑道; 冲积区域中三块黄色的三角块在总功率图中只能显示出最下面的一块。



图 3 极化伪彩色合成图 (Stokes 矩阵)

图 4 极化伪彩色合成图
归一化 Stokes 矩阵

从极化合成的角度看, 上面三幅图的关系是

$$P_{uc} = P_{TP} \cdot P_c,$$

其中 P_{uc} 是极化伪彩色合成图, P_{TP} 是总功率图, P_c 是归一化的极化伪彩色合成图.

5 极化 SAR 伪彩色合成增强处理

由于不同的目标在不同的极化组合下回波功率的变化是不一样的, 因此我们可以选择最优的极化组合, 以增大目标间在极化 SAR 伪彩色合成后的色彩差异. 在后文的处理中, 我们采用目标极化特征图功率的相差值作为判定此时最优极化组合的标准, 所处理的目标是在山林中架设的一根高压线. 根据高压线和山林约 50 个点求平均得到的 Stokes 矩阵, 我们分别计算出在相同极化、交叉极化时回波功率的差值和用 M_{11} 归一化后的回波功率的差值, 分别如图 5 和图 6 所示, 从图中我们可以求出最大值和最小值所对应的极化组合, 如表 1.

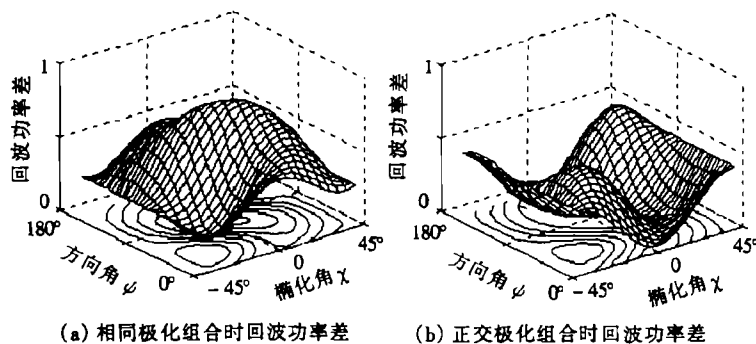


图 5 高压线与山林的极化特征图差值 (Stokes 矩阵)

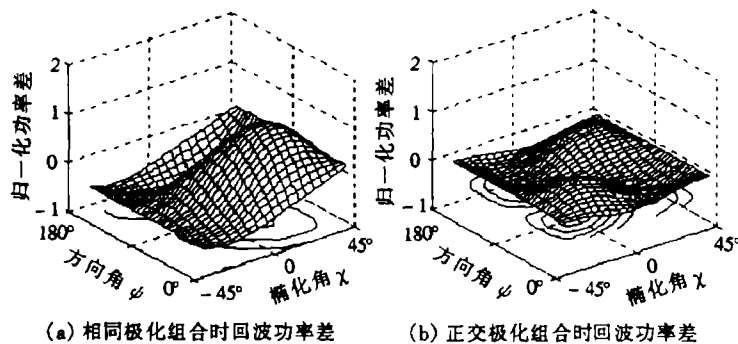


图 6 高压线与山林的极化特征图差值 (归一化 Stokes 矩阵)

表 1 极化组合方式

		相同极化 P_{\max}	相同极化 P_{\min}	交叉极化 P_{\max}	交叉极化 P_{\min}
M 矩阵	ψ_r	5°	25°	-30°	0°
	χ_r	85°	140°	45°	90°
	差值	0.83*	0.10*	0.59*	0.05
归一化 M_c	ψ_r	15°	5°	20°	-25°
	χ_r	60°	145°	135°	135°
	差值	1.02*	-0.82*	0.36*	-0.22

表中的 * 表示我们在极化伪彩色合成时所用的是极化组合

从图 7 可以看到, 高压线在三种伪彩色图中都能清楚地表示出来, 图像中的高压线越明显, 图像的波动也就越大。在图 7(a) 中, 右下部份的山林有较强的回波功率, 因而在图 7(b) 中高压线在这一区域非常模糊, 几乎不可见, 而在图 7(c) 和 7(d) 中, 我们依然能从中分辨出高压线路。但图 7(d) 的图像波动较大, 同时周围存在很多目标与高压线的色彩相近, 因此, 我们认为用 Stokes 矩阵求出最优的极化组合, 再进行伪彩色合成的方法对于两类目标区分的效果最好。

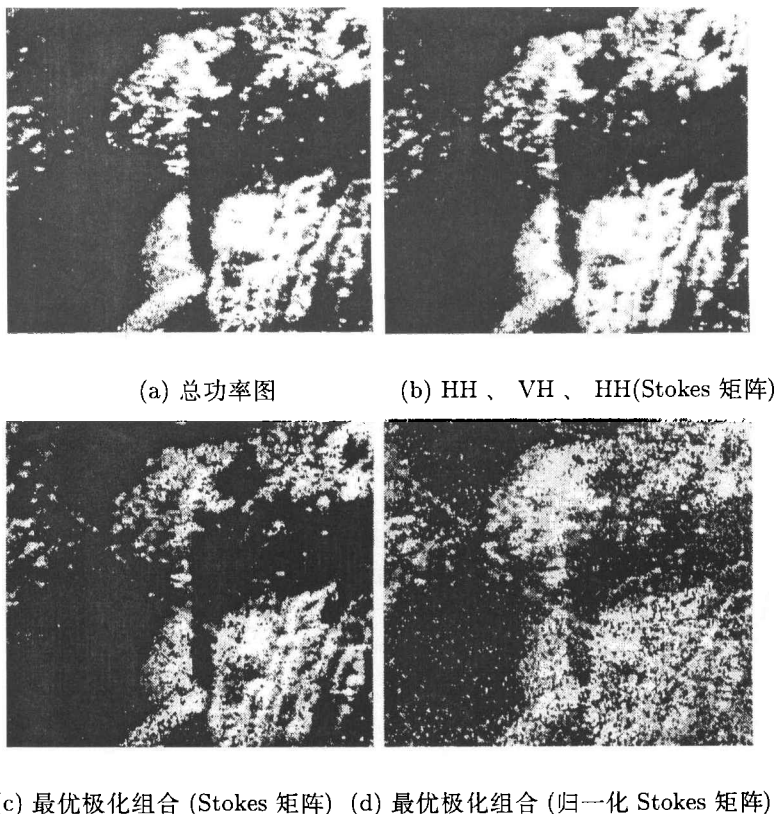


图 7 高压线与山林不同的伪彩色图

6 结 论

本文研究了利用多极化合成孔径雷达数据产生极化 SAR 伪彩色合成的方法, 提出了采用归一化 Stokes 矩阵的方法产生极化 SAR 伪彩色图的新方法, 反映在目标的极化特征图

上, 相同形状的极化特征图目标在图像中具有相同的色彩。同时, 还提出可以根据目标的极化特征图找出两类目标功率相差最大时的极化组合方式, 再用极化合成的方法产生三种极化组合方式下的目标功率, 最后分别归一化求出极化 SAR 伪彩色图的方法。我们用 JPL 实验室 AIRSAR 系统的极化数据验证了以上处理方法, 处理出图像的结果证实了处理方法的可行性和有效性。

致谢 感谢美国 JPL 实验室数据供应中心及 Ellen O'Leary 提供了本文中用到的机载多极化合成孔径雷达数据。

参 考 文 献

- [1] 许殿元, 丁树柏. 遥感图像信息处理, 北京: 宇航出版社, 1990, 12, 32-45.
- [2] Ulaby F T, Elachi C. Radar Polarimetry for Geoscience Application, MA: Artech House INC., 1990, 4-32.
- [3] Sinclair G. The transmission and reception of elliptically polarized waves, Proc. IRE. 1950, 38, 148-151.
- [4] Van Zyl J J, Zebker A, Elachi C. Imaging radar polarization signatures: Theory and observation. Radio Science, 1987, 22(4): 529-543.
- [5] Diane L. Radar polarimetry: Analysis tools and applications. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1988, GRS-26(6): 774-789.

A FALSE COLOR SYNTHETIC PROCESSING FOR POLARIMETRIC SAR DATA

Liu Hongchun · Yang Ruliang

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Abstract This paper studies on the false color synthetic processing for polarimetric SAR data. A new method to get false color image of polarimetric SAR data with the unitary Stokes matrix is presented. Because this method discards the information of total power, it can be used to analyze the target with more power or less power and the target with the same shape in polarization signatures. The paper also presents the way to find three optimum polarization's combinations to enhance the contrast between two types of scatters with polarization signature and use the polarization synthesis to get false color image of polarimetric SAR data.

Key words Polarimetric SAR, Stokes matrix, Polarization signatures, False color image

刘宏春: 男, 1973 年生, 硕士生, 主要研究内容有多极化合成孔径雷达、极化数据处理、干涉合成孔径雷达和通讯系统等。

杨汝良: 男, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 中国科学院电子学研究所副所长, 正从事多频多极化合成孔径雷达、小卫星合成孔径雷达及 VSAT 卫星通讯网络等研究。