

简缩极化SAR模式下极化方向角的估计

何伟, 郭睿, 臧博, 张双喜, 邢孟道

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

【摘要】利用简缩极化SAR模式下得到的散射向量对极化方向角的估计进行了推导。通过对圆极化形式的分析,将其用于简缩极化模式下的散射向量,利用简缩极化散射数据得到极化方向角的估计值。同时采用实测数据进行实验验证该方法,探讨了简缩极化模式下极化方向角估计的可行性和应用价值。

关键词 简缩极化; 全极化; 极化方向角; 合成孔径雷达成像

中图分类号 TN958

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.01.008

Orientation Angle Estimation by Compact Polarimetric SAR Modes

HE Wei, GUO Rui, ZANG Bo, ZHANG Shuang-xi, and XING Meng-dao

(Key Lab. of Radar Signal Processing, Xidian University Xi'an 710071)

Abstract In recent years, the research of compact polarimetric (CP) modes has caught attention. By using the full polarimetric (FP) mode, the existence of orientation angle (OA) induced by terrain slope will lead to the difficulty in post-processing, such as terrain targets classification and identification. In the paper, the OA estimation is derived and analyzed by using the scattering vectors of CP SAR modes. Recurring to the circular polarimetry, the OA can be evaluated from the CP SAR data. And the experimental results based on measured data sets have been shown to improve the estimation methods, while analyzing the practicability of the estimation under CP modes and its value in engineering application.

Key words compact polarimetric (CP); fully polarimetric (FP); orientation angle (OA); synthetic aperture radar (SAR)

全极化SAR能够提供更多的目标散射信息,揭示更准确详尽的目标地物特性而备受国内外学者的重视^[1-10]。全极化SAR系统对存储空间及采样频率等要求较高,比传统的SAR系统对硬件条件的要求高出许多。为了缓解硬件压力,同时提高数据采集速率,扩大场景录取范围,简缩极化SAR模式从提出以来就备受关注^[1-4]。虽然采用简缩极化SAR模式不能完全精准地对全极化信息进行恢复,但从重构的近似全极化信息中我们仍然能够得到保持较好的地物信息,从而分析其全极化特性。与全极化模式^[5]相比,简缩极化模式在系统结构复杂度较低的情况下也能够全面准确地揭示地物散射特性。

另一方面,由于地形坡度的影响,极化方向角对准确分类识别地物类型及其散射特性造成困难,因此关于极化方向角的估计及分析其对散射特性的影响也一直是学者们研究的热点^[6-8]。其中,由于运算效率高,同时得到的估值结果也较为准确,采用

圆极化状态的极化方向角估值方法比较常用。

本文在简缩极化模式下对极化方向角进行估计,也采用了圆极化形式下散射系数在极化方向角变化前后的关系。用实测数据对全极化模式和简缩模式下的极化方向角估计进行实验,给出了结果和分析。

1 背景理论介绍

1.1 简缩模式下的极化SAR

在全极化模式下,发射和接收不同极化状态的回波,可以得到由后向散射系数组成的散射矩阵如下:

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

式中,下标H、V分别表示水平极化与垂直极化两种极化方式。

在满足互异($S_{HV} = S_{VH}$)的条件下,式(1)中的散射矩阵可以用Pauli基分解所得到的散射向量表示:

收稿日期: 2012-09-24; 修回日期: 2013-09-26

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金(61222108)

作者简介: 何伟(1984-),男,博士生,主要从事极化SAR图像处理方面的研究。

$$\mathbf{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad 2S_{HV}]^T \quad (2)$$

从以上的全极化表示中,可以得到关于地物的更多有效信息。然而,在全极化SAR模式下,虽然能够得到关于地物的更广泛信息,但考虑到脉冲重复频率,数据采集存储等,全极化SAR系统的硬件要求大大高于传统的SAR系统。为了缓解硬件压力,简缩极化模式被提出来近似全极化模式。简缩极化模式实际上属于双极化模式,只发射一种极化方式的信号。表1给出3种常用的简缩极化模式下发射接收信号的极化形式及散射向量表示。

表1 简缩极化模式说明表

| | 发射极化形式 | 接收极化形式 | 散射向量 |
|------------|-----------|--------|--|
| $\pi/4$ 模式 | X(45°线极化) | (H, V) | $\mathbf{k}_{\pi/4} = [S_{XH} \quad S_{XV}]^T$ |
| DCP模式 | R | (R, L) | $\mathbf{k}_{DCP} = [S_{RR} \quad S_{RL}]^T$ |
| CTLR模式 | R | (H, V) | $\mathbf{k}_{CTLR} = [S_{RH} \quad S_{RV}]^T$ |

表1中 $\pi/4$ 模式时发射45°线极化信号,采用H和V两种极化方式接收;DCP模式时发射圆极化信号(表中为了方便解释,直接用右旋圆极化R说明),采用左旋和右旋两种圆极化方式接收(表中R和L分别表示右旋圆极化和左旋圆极化);CTLR模式时发射圆极化信号,采用H和V线极化方式接收。从这3种简缩模式中,可以推导出近似的全极化信息,被称为伪全极化信息^[1]。同时,经过验证^[2],采用这3种简缩模式近似全极化模式是可行的。

根据不同极化方式之间的转换,表1中3种简缩极化模式下的散射向量与H、V两种极化方式组成的极化向量存在如下关系:

$$\mathbf{k}_{\pi/4} = [S_{XH} \quad S_{XV}]^T = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{HV} \quad S_{VV} + S_{HV}]^T \quad (2a)$$

$$\mathbf{k}_{DCP} = [S_{RR} \quad S_{RL}]^T = \frac{1}{2} [(S_{HH} - S_{VV} + j2S_{HV}) \quad j(S_{HH} + S_{VV})]^T \quad (2b)$$

$$\mathbf{k}_{CTLR} = [S_{RH} \quad S_{RV}]^T = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} - jS_{HV} \quad -jS_{VV} + S_{HV}]^T \quad (2c)$$

1.2 圆极化形式下极化方向角的影响

在极化研究中,由于地形坡度和雷达视角影响引入的极化方向角对于后续的极化处理有重要意义。它的存在会导致不同地物类型的目标被混淆,因此,已有大量学者在这方面做出了研究并提出了针对不同极化方式的极化方向角估计方法。由于简单易行,同时为了便于后续的推导,这里对采用圆极化形式进行极化方向角估计的方法进行简单介绍。根据入射电磁场与散射电磁场之间的关系,容

易得到圆极化方式下的散射系数与常用线极化方式下散射向量之间的关系如下:

$$\begin{pmatrix} S_{RR} \\ S_{RL} \\ S_{LL} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & j2 & -1 \\ j & 0 & j \\ -1 & j2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{HH} \\ S_{HV} \\ S_{VV} \end{pmatrix} \quad (3)$$

从而Pauli基下的散射向量可以用圆极化方式下的散射系数表示:

$$\mathbf{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -j2S_{RL} \\ S_{RR} - S_{LL} \\ -j(S_{RR} + S_{LL}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

考虑到极化方向角的影响,对式(1)中的散射矩阵按照极化方向角 θ 进行旋转后,线极化方式的散射矩阵 S 变化为:

$$S' = RSR^T = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(2)中相应的Pauli散射向量则变为:

$$\mathbf{k}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \mathbf{k} \quad (6)$$

由式(4)和式(6)可以推导出经过极化方向角 θ 的旋转后,圆极化方式的散射系数变化如下:

$$\begin{cases} S'_{RR} = S_{RR} e^{-j2\theta} \\ S'_{RL} = S_{RL} \\ S'_{LL} = S_{LL} e^{j2\theta} \end{cases} \quad (7)$$

从上式可以看出,当变换到圆极化方式时,极化方向角的旋转作用只影响共圆极化散射系数 S_{RR} 和 S_{LL} ,交叉圆极化散射系数 S_{RL} 则是一个极化方向角旋转不变量。

2 简缩模式下极化方向角的估计

从式(7)中知,极化方向角对圆极化散射系数的影响容易推导。对简缩极化模式下的极化方向角进行估计时,本文采用利用圆极化方式下的散射系数关系进行极化方向角的估计。

2.1 $\pi/4$ 模式

由式(2a)中 $\pi/4$ 模式下的散射向量及式(3)中圆极化和线极化之间的散射关系,可以用圆极化方式表示 $\pi/4$ 模式下两个散射系数如下:

$$\begin{cases} S_{XH} = \frac{1}{2\sqrt{2}} [(1-j)S_{RR} - (1+j)S_{LL} - j2S_{RL}] \\ S_{XV} = \frac{1}{2\sqrt{2}} [(1-j)S_{LL} - (1+j)S_{RR} - j2S_{RL}] \end{cases} \quad (8)$$

经过极化方向角 θ 的旋转后, $\pi/4$ 模式下的散射系数变化为:

$$\begin{cases} S'_{\text{XH}} = \frac{1}{2}[(1-j)S_{\text{RR}}e^{-j2\theta} - (1+j)S_{\text{LL}}e^{j2\theta} - j2S_{\text{RL}}] \\ S'_{\text{XV}} = \frac{1}{2}[(1-j)S_{\text{LL}}e^{j2\theta} - (1+j)S_{\text{RR}}e^{-j2\theta} - j2S_{\text{RL}}] \end{cases} \quad (9)$$

由于式(9)中有4个自由变量, 2个因变量, 所以无法通过这两个因变量 S'_{XH} 和 S'_{XV} 来直接表示自由变量 θ 。

因此, 在 $\pi/4$ 简缩极化模式下, 采用圆极化方式对极化方向角进行估计的操作失效。

2.2 DCP模式

DCP模式直接采用了圆极化的发射接收方式, 得到的散射系数包括共圆极化及交叉圆极化两种, 如式(2b)所示。从式(7)中可以直接得到描述DCP模式下旋转前后散射系数之间的关系如下:

$$S'_{\text{RR}}S'_{\text{RL}}^* = S_{\text{RR}}S_{\text{RL}}^*e^{-j2\theta} \quad (10)$$

所以, 有:

$$-2\theta = \text{Arg}(S'_{\text{RR}}S'_{\text{RL}}^*) \quad (11)$$

式中, $\text{Arg}(\cdot)$ 表示取辐角操作。其中在散射对称情况下有:

$$S_{\text{RR}}S_{\text{RL}}^* = \left[2\text{Im}(S_{\text{HH}}S_{\text{VV}}^*) - j(|S_{\text{HH}}|^2 - |S_{\text{VV}}|^2) \right] / 4 \quad (12)$$

此时 $S_{\text{RR}}S_{\text{RL}}^*$ 是实数, 但是 $|S_{\text{HH}}|^2 - |S_{\text{VV}}|^2$ 一般会远大于 $2\text{Im}(S_{\text{HH}}S_{\text{VV}}^*)$, 产生 $\pi/2$ 偏差。为了使得极化方向角与方位倾斜角相匹配, 上式中的偏差需要对反正切加上一个 $\pi/2$ 解决^[6], 因此从式(11)中重新构造DCP简缩模式下的极化方向角估计值为:

$$\theta = \begin{cases} \xi & \xi \leq \pi/2 \\ \xi - \pi & \xi > \pi/2 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\xi = \frac{1}{2} \left[\tan^{-1} \left(\frac{\text{Re}(S'_{\text{RR}}S'_{\text{RL}}^*)}{\text{Im}(S'_{\text{RR}}S'_{\text{RL}}^*)} \right) + \frac{\pi}{2} \right]$; $\text{Re}(\cdot)$ 和 $\text{Im}(\cdot)$

分别表示取括号内数值的实部和虚部。

2.3 CTLR模式

当采用圆极化发射, 线极化接收的CTLR模式时, 散射向量与线极化方式下的散射系数关系如式(2c), 将其代入式(4), 可以得到采用CTLR模式下散射系数所表示的圆极化散射系数如下:

$$S_{\text{RL}} = (jS_{\text{RH}} - S_{\text{RV}}) / \sqrt{2} \quad (14)$$

$$S_{\text{LL}} = (jS_{\text{RV}} - S_{\text{RH}}) / \sqrt{2}$$

由式(7)可得 $S'_{\text{RL}}S'_{\text{LL}}^* = S_{\text{RL}}S_{\text{LL}}^*e^{-j2\theta}$, 有:

$$-2\theta = \text{Arg}(S'_{\text{RL}}S'_{\text{LL}}^*) \quad (15)$$

从式(14)中可以得到:

$$S'_{\text{RL}}S'_{\text{LL}}^* = \frac{(jS'_{\text{RH}} - S'_{\text{RV}})(jS'_{\text{RV}} - S'_{\text{RH}})^*}{2} = \left\{ \text{Re}(S'_{\text{RH}}S'_{\text{RV}}^*) + j \frac{(|S'_{\text{RV}}|^2 - |S'_{\text{RH}}|^2)}{2} \right\} \quad (16)$$

从式(15)和式(16), 可以得到:

$$-2\theta = \tan^{-1} \left(\frac{|S'_{\text{RV}}|^2 - |S'_{\text{RH}}|^2}{2\text{Re}(S'_{\text{RH}}S'_{\text{RV}}^*)} \right) \quad (17)$$

与式(11)相同, 在这里引入 $\pi/2$ 来对极化方向角估值进行校正。因此, 在 $\pi/2$ 简缩模式下, 通过圆极化模式得到的极化方向角估计值为:

$$\theta = \begin{cases} \eta & \eta \leq \pi/2 \\ \eta - \pi & \eta > \pi/2 \end{cases} \quad (18)$$

式中, $\eta = \frac{1}{2} \left[\tan^{-1} \left(\frac{|S'_{\text{RV}}|^2 - |S'_{\text{RH}}|^2}{2\text{Re}(S'_{\text{RH}}S'_{\text{RV}}^*)} \right) + \frac{\pi}{2} \right]$ 。

3 实验结果及分析

对于不同的地物类型, 其地形坡度角不同, 所引入的极化方向角影响也不同。在本节中, 为了能够更好的说明极化方向角的影响, 采用两组数据进行实验说明。图1采用Radarsat2系统所录取的C波段数据, 图像大小为 683×2055 (方位向 \times 距离向)。图1a中伪彩图三原色对应关系为: 红色 $|HH-VV|$, 蓝色 $|HH+VV|$, 绿色 $2|HV|$ 。该数据主要包括陆地和海洋两部分, 图1b~图1d分别为采用FP模式、DCP模式和CTLR模式得到的极化方向角估计图。其中, FP模式下的极化方向角估计值也是采用圆极化进行计算得到的。具体估算如下:

$$S'_{\text{RR}}S'_{\text{LL}}^* = S_{\text{RR}}S_{\text{LL}}^*e^{-j4\theta} \quad (19)$$

$$-4\theta = \text{Arg}(S'_{\text{RR}}S'_{\text{LL}}^*) =$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{-4\text{Re}((S'_{\text{HH}} - S'_{\text{VV}})S'_{\text{HV}}^*)}{-|S'_{\text{HH}} - S'_{\text{VV}}|^2 + 4|S'_{\text{HV}}|^2} \right) \quad (20)$$

$$\theta = \begin{cases} \psi & \psi \leq \pi/4 \\ \psi - \pi/2 & \psi > \pi/4 \end{cases} \quad (21)$$

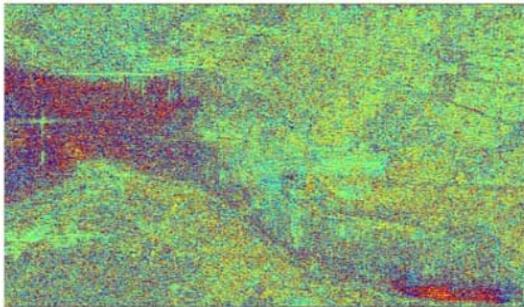
式中, $\psi = \frac{1}{4} \left[\tan^{-1} \left(\frac{-4\text{Re}((S'_{\text{HH}} - S'_{\text{VV}})S'_{\text{HV}}^*)}{-|S'_{\text{HH}} - S'_{\text{VV}}|^2 + 4|S'_{\text{HV}}|^2} \right) + \pi \right]$ 。

与图1b中采用全极化模式估计相比, 利用CP模式进行极化方向角估计虽然也能够较好地揭示不同地物类型的极化方向角信息, 但仍存在一定缺陷。其中, 图1c和图1d中左上和左下部分与图1b的极化方向角估计结果更为匹配, 这是由于这些区域的极化方向角范围在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 之间。造成这种情况出

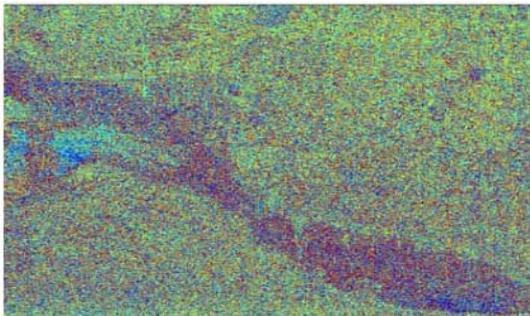
现的原因在于极化方向角的估计方位与去极化度相关,因此高熵地区^[9-10]的极化方向角估计值与全极化估计值相差较远。在FP模式下,利用式(20)和式(21)估计得到的极化方向角主要分布在 $[-\pi/4, \pi/4]$ 之间,给出采用3种模式进行极化方向角估计的直方图如图2a。可以观察到,采用FP模式得到的极化方向角估计值以 0° 对称轴,当采用两种CP模式时,得到的极化方向角估计值也以 0° 为对称轴,这说明HH和VV两种共极化方式下相位差绝对值比较小。



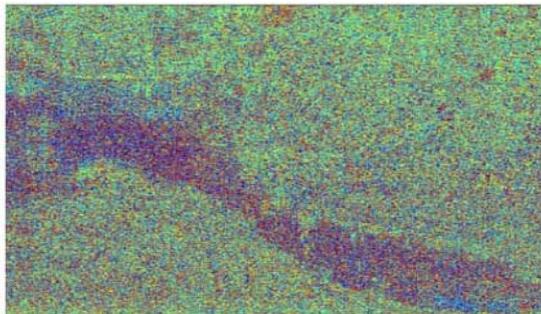
a. 伪彩合成图



b. FP模式下极化方向角估计图

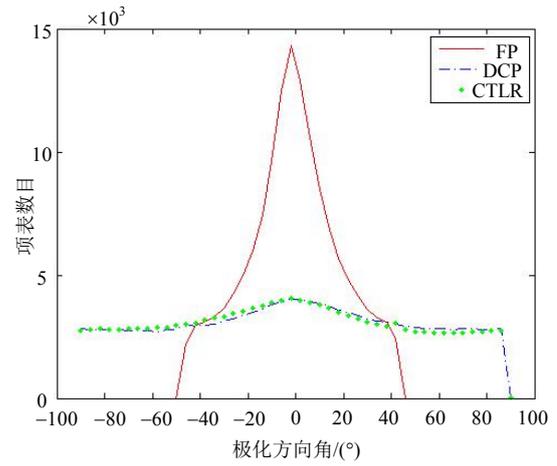


c. DCP模式下极化方向角估计图

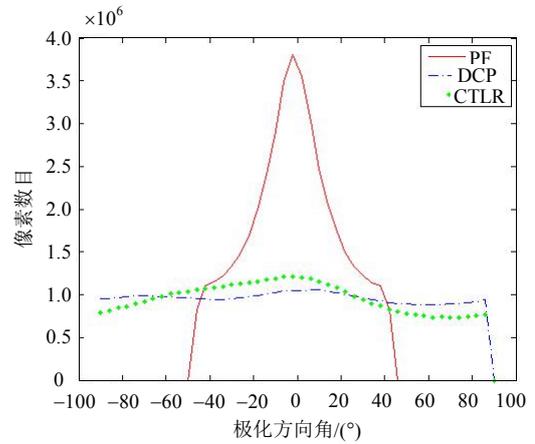


d. CTLR模式下极化方向角估计

图1 Radarsat2系统C波段数据

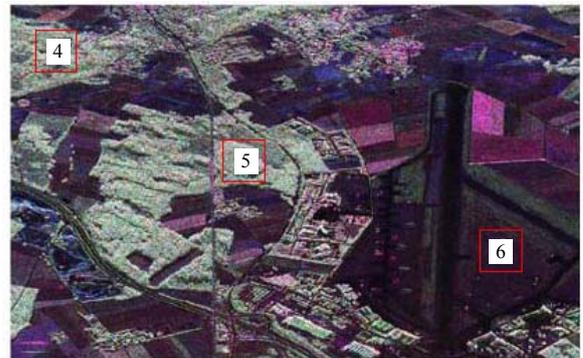


a. Radarsat2数据

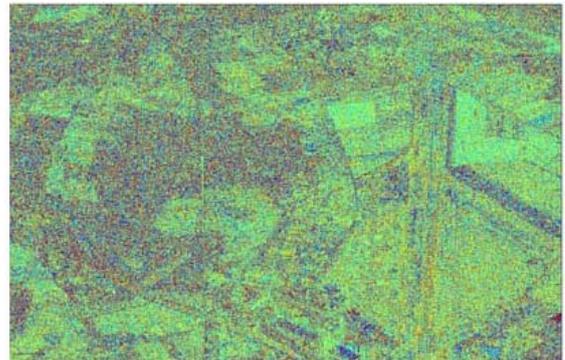


b. ESAR数据

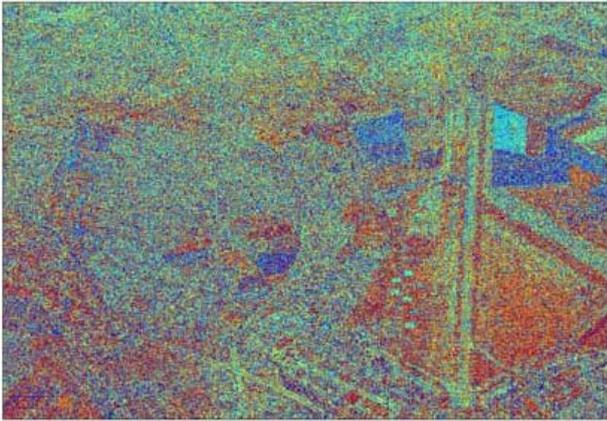
图2 极化方向角估计直方图



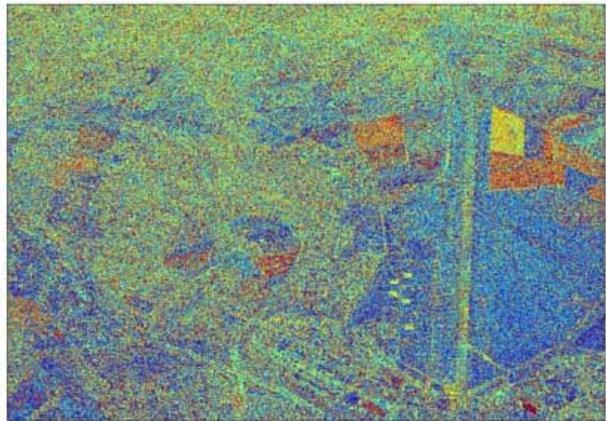
a. 伪彩合成图



b. FP模式下极化方向角估计图



c. DCP模式下极化方向角估计图



d. CTRLR模式下极化方向角估计图

图3 ESAR系统L波段数据

图3采用ESAR系统L波段所录取的Oberpfaffenhofen地区的数据, 图像大小为1 540×2 816(方位向×距离向), 图3c和图3d中的CP极化方向角估计图与图3b中极化方向角的估计图并不完全一致。根据式(12)和式(21)可知, 几种简缩极化的方向角估计存在偏差, 一般会产生 $\pi/4$ 左右的偏差, 对于特定区域, 则会产生比较复杂的偏差, 这一点通过表2中几个取自图1和图3的几块区域估计均值也可看出, 除区域6外, 其他几块区域经过补偿后, 估计值较为接近。对于区域6则明显有一个 $\pi/4$ 偏差, 这是由于这块区域 $|S_{HH}|$ 与 $|S_{VV}|$ 值较为接近, 补偿反而产生了偏差, 这也是图2b中DCP与CTRLR模式下极化方向角的估计值并非以 0° 对称轴的原因。

表2 简缩极化模式不同区域极化方向角估计均值 ($^\circ$)

| | FP模式 | DCP模式 | CTRLR模式 |
|-----|----------|-----------|-----------|
| 区域1 | -2.710 3 | 8.665 1 | 4.035 4 |
| 区域2 | 2.702 5 | 3.685 8 | 6.453 9 |
| 区域3 | 0.332 2 | -6.762 8 | -21.994 9 |
| 区域4 | 0.560 2 | 9.247 1 | 8.528 6 |
| 区域5 | 6.668 1 | 12.572 4 | 1.418 8 |
| 区域6 | 0.255 6 | -56.691 8 | -44.242 9 |

比较图1和图3中两组不同波段数据估计得到的

极化方向角, 可以看到相比于图3中L波段的数据, 图1中采用C波段进行极化方向角估计的结果中陆地部分的极化方向角分布更加无规律, 这从波段角度来说, 由于极化方向角估计与雷达系统发射频率有着密切的关系, 在L波段和P波段下极化方向角能够有效的被估计, 而C波段及更高波段对地表植被等穿透力弱, 更易受分辨率单元内少数强散射点的影响和局部信息的干扰, 而对地形方位斜度等不是很敏感, 因此采用C波段数据的CP模式进行极化方向角估计时, 在图1中左边大部分陆地区域的极化方向角估计类似噪声分布, 并不能正确揭示地形。从分辨率角度来说, 图1分辨率远低于图3, 分辨率低, SAR成像中会引入更强的相干斑, 因为更多散射点出现在分辨率单元内非中心位置, 引起估计值更多的误差。

5 结 论

本文对简缩极化SAR的3种模式: $\pi/4$ 模式、DCP模式和 $\pi/2$ 模式进行了介绍, 同时分析了圆极化与线极化之间的关系及圆极化方式下极化方向角的影响。对不同的简缩极化方式进行分析推导, 得到了DCP和CTRLR两种简缩模式下的极化方向角估计值。本文对如何从利用圆极化方式下极化方向角的影响对CP模式下的极化方向角估计进行了研究, 表明在CP模式下, 仍然可以得到由于地形影响而存在的极化方向角估计值, 分析了极化方向角估计所需考虑的因素及CP模式下极化方向角估值的特点和偏差, 从另一方面展示了CP模式近似FP模式的可行性及CP模式的应用价值。

参 考 文 献

- [1] SOUYRIS J C, IMBO P, FJORTOFT R, et al. Compact polarimetry based on symmetry properties of geophysical media: the $\pi/4$ mode[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(3): 634-645.
- [2] NORD M E, ANISWORTH T L, LEE J S, et al. Comparison of compact polarimetric synthetic aperture radar modes[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(1): 174-187.
- [3] LAVAKKE M, SOLIMINI D, POTTIER E, et al. Compact polarimetric SAR interferometry[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2010, 4(3): 449-456.
- [4] RANEY R K, FREEMAN A, JORDAN R L. Improved range ambiguity performance in quad-pol SAR[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing, 2012, 349(8): 349-356.

(下转第154页)

- 于大气紫外传输的模拟计算[C]//第十一届全国光电技术与系统学术会议. [出版地不详]: [出版者不详], 2005.
- GONG Jun, LAN Tian, LIU Jie, et al. Simulated calculation on atmospheric UV transmission with LOWTRAN and modtran model[C]//The Eleventh National Optoelectronic Technology and Systems Conference. [S.l.]: [s.n.], 2005.
- [11] 孟雪琴, 吴健, 杨春平. 无云地球大气背景辐射光谱亮度的计算模型[J]. 应用光学, 2009, 30(1): 167-171.
- MENG Xue-qin, WU Jian, YANG Chun-ping. Computation model of spectral radiation luminance of clear atmosphere background[J]. Journal of Applied Optics, 30(1): 167-171.
- [12] 吴北婴, 李卫, 陈洪滨, 等. 大气辐射传输实用算法[M]. 北京: 气象出版社, 1998.
- WU Bei-ying, LI Wei, CHEN Hong-bin, et al. Practical algorithm of atmospheric radiative transfer[M]. China Meteorological Press, 1998.

编辑 漆蓉

(上接第53页)

- [5] LEE J S, GRUNES M R, POTTIER E. Quantitative comparison of classification capability: fully-polarimetric versus partially polarimetric SAR[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2343-2350.
- [6] LEE J S, SCHULER D L, AINSWORTH T L. On the estimation of radar polarization orientation shifts induced by terrain slopes[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(1): 30-39.
- [7] XU Feng, JIN Ya-qiu. Deorientation theory of polarimetric scattering targets and application to terrain surface classification[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(10): 2354-2363.
- [8] LEE J S, AINSWORTH T L. The effect of orientation angle compensation on coherency matrix and polarimetric target decomposition[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 53-64.
- [9] 王超, 张红, 陈曦, 等. 全极化合成孔径雷达图像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- WANG Chao, ZHANG Hong, CHEN Xi, et al. Full polarimetric SAR image processing[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [10] CLOUDE S R, POTTIER E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(1): 68-78.

编辑 税红