

# 一种新的合成孔径雷达三维成像方法\*

梁淮宁\*\* 余永健 黄顺吉

(电子科技大学电子工程系 成都 610054)

【摘要】研究了从全极化合成孔径雷达(SAR)图像数据中提取方位向的地势倾斜度信息,形成极化 SAR 三维成像。阐述了极化合成孔径雷达三维成像的快速搜索算法,对快速搜索算法作了修正与完善,提出了由 Stokes 矢量推导的极化椭圆方向角解模糊算法,利用真实的极化 SAR 图像数据得到了极化三维成像结果;并讨论了极化三维成像对地势场景的要求。

关键词 极化合成孔径雷达; 极化椭圆方向角; 方位向地势倾斜度; 三维成像  
中图分类号 TN959.1

三维 SAR 成像中新的动态是利用极化合成孔径雷达全极化二维成像数据来提取地势方位向坡度信息<sup>[1]</sup>,从而在极化 SAR 二维成像的基础上,形成极化 SAR 三维成像。这种算法不同于重复轨道 INSAR<sup>[2]</sup>,不是利用干涉法提取高度信息,而是利用全极化 SAR 二维成像各分辨单元的 Stokes 散射矩阵,通过计算最大散射截面对应的极化椭圆方向角 $\gamma$ 和相邻分辨单元极化椭圆方向角的差值 $\Delta\gamma$ ,得出方位向地势倾斜度 $d_{\Delta}$ <sup>[1]</sup>。文献[2]的研究结果表明: $d_{\Delta} = k\Delta\gamma$ ,其中 $k \approx 1$ 。当地形方位向坡度一旦测定,在各距离门上,各点相对高程数据便可唯一的确定。国外已将这种方法应用于森林植被覆盖的地表坡度的估算,其成像的高程误差与相干 INSAR 的误差大致相同。本文提出极化椭圆方向角在 Poincare 球  $xOy$  平面上的解模糊算法,利用大数据量处理的高效快速搜索算法,对某地作了极化 SAR 三维成像。

## 1 高效快速搜索算法

### 1.1 合成孔径雷达三维成像原理 1.2

用 Stokes 矢量表示法可反映出椭圆极化波各分量之间的关系,即

$$F = \begin{bmatrix} I_0 \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_v|^2 + |E_h|^2 \\ |E_v|^2 - |E_h|^2 \\ 2\text{Re}(E_v E_h^*) \\ 2\text{Im}(E_v E_h^*) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_v^2 + a_h^2 \\ a_v^2 - a_h^2 \\ 2a_v a_h \cos d \\ 2a_v a_h \sin d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_0 \cos 2x \cos 2y \\ I_0 \cos 2x \sin 2y \\ I_0 \sin 2x \end{bmatrix} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $F$  为 Stokes 矢量;  $I_0$  为椭圆极化波总能量;  $E_h$  为水平极化幅度;  $a_h$  为椭圆极化波瞬时水平分量;  $E_v$  为垂直极化幅度;  $a_v$  为椭圆极化波瞬时垂直分量;  $d$  为椭圆极化波水平分量与垂直分量的相对时间相位差;  $y$  为极化椭圆方向角;  $x$  为极化椭圆率;  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  为 Stokes 矢量元素归一化值,且  $a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = 1$  为一球(Poincare 球)面方程。如图 1 所示,在 Poincare 球面上任意一点的坐标数据对应一个椭圆极化波,反之亦然。式(1)中  $x$  和  $y$  表达式为

$$\begin{cases} x = \frac{1}{2} \arcsin a_3 & -45^\circ \leq x \leq 45^\circ \\ y = \frac{1}{2} \arctg(a_1, a_2) & -90^\circ \leq y \leq 90^\circ \end{cases} \quad (2)$$

2000年7月15日收稿

\* 总装备部预研基金资助项目

\*\* 女 27岁 博士生 高级工程师

全极化( $hh$ 、 $hv$ 、 $vh$ 、 $vv$ )合成孔径雷达每一个像素点对应的全极化信息构成该点的极化散射矩阵

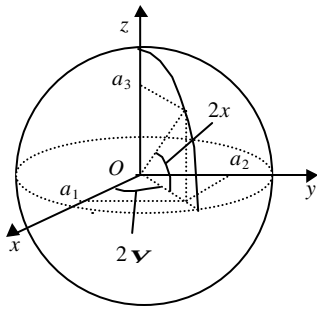


图1 Poincare 球

阵  $S = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix}$ , 经极化综合得到协方差矩阵  $W = S^* \otimes S$ 。其中

“ $\otimes$ ”为 Kronecker 乘积。为了便于观察, 对  $W$  作变换:  $\bar{W} = AWA^{-1}$ , 可求出 Mueller 矩阵  $M$  和 Stokes 散射算子  $L$ <sup>[3]</sup>

$$\begin{cases} M = R\bar{W}R^{-1} \\ L = (R^t)^{-1}\bar{W}R^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = A^{-1}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -i & i \end{bmatrix}$$

$M$  和  $L$  互为相似变换。设雷达入射角  $q$ , 任意目标单元对应不同的  $x$  和  $y$  时的散射功率强度为  $P = F^t L F$ , 散射强度最大点记为  $P_{\max}$  其对应的极化状态是雷达最佳极化状态。文献[1]的研究结果表明, 雷达同一距离门内, 沿方位向各分辨单元的雷达最佳极化状态( $y$ 、 $x$ )与地形表面的变化规律相关。雷达方位向两个分辨单元的全极化信息, 经极化综合后得到的两个极化椭圆的方向角度的差值  $\Delta y = y_{i+1} - y_i$ , 反映了方位向地势坡度  $d_{\parallel}$  的变化规律。因此, 准确求解极化椭圆方向角和相邻分辨单元方向角的差值是提取方位向地势倾斜度的关键, 也是极化三维 SAR 成像的关键技术之一。相邻分辨单元方向角的差值为

$$\Delta y = y_{i+1} - y_i \quad (4)$$

式中  $i, i+1$  为第  $i, i+1$  个分辨单元。本文采用快速搜索算法求式(4)的  $y_i$ 、 $y_{i+1}$  和  $\Delta y$ , 快速搜索算法使运算速度大大提高。

## 1.2 高效快速搜索算法<sup>[1]</sup>

文献[4]提出了一种高效快速搜索算法。由式(2)可知目标的散射截面积  $P = F^t L F$ , 将式(2)用子阵方式写成

$$P = F^t L F = \begin{bmatrix} 1 \\ a \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} l_{11} & b^t \\ b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a \end{bmatrix} = l_{11} + 2b^t a + a^t c a \quad (5)$$

式(5)对  $a$  求偏微分, 求  $P$  最大值时的  $a$  值

$$\frac{\partial P}{\partial a} = 2b + 2c^t a = k \quad (6)$$

式(6)用数值求解算法, 利用三种条件判断<sup>[4]</sup>, 确保收敛点就是  $s$  的最大值点, 然后再求解式(2)和式(4)。

## 2 极化椭圆方向角解模糊

快速搜索算法求出  $x$  和  $y$ 。在 Poincare 球  $a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = 1$  上，表明当  $P_{\max}$  在定义域内为单峰时，极化椭圆方向角  $y$  的解不唯一，则需对  $y$  解模糊。解模糊后对应的椭圆方向角为

$$\begin{cases} y = \frac{1}{2} \arctg \frac{a_2}{a_1} & a_1 > 0 \\ y = \frac{1}{2} \left( \delta + \arctg \frac{a_2}{a_1} \right) & a_1 < 0 \quad a_2 > 0 \\ y = \frac{1}{2} \left( -\delta + \arctg \frac{a_2}{a_1} \right) & a_1 < 0 \quad a_2 \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

## 3 极化合成孔径雷达三维成像

### 3.1 海岸线边沿检测

本文的实验采用 L 波段，分辨率为 25 m，视数为 5.2。设计了一种基于极化数据的海岸线检测算法，以区分海洋与陆地，并以海岸线为初始参考点，推算陆地高度。海岸线的检测采用梯度法实现。设全极化合成孔径雷达接收能量为

$$I_{11} = \frac{1}{4} (I_{hhhh} + I_{hhvv} + I_{vvvv}) = \frac{1}{4} (|s_{hh}|^2 + 2s_{hv} + |s_{vv}|^2)$$

梯度为

$$\text{grad} I_{11} = \left( i \frac{\partial}{\partial a} + j \frac{\partial}{\partial r} \right)_{11} \quad (8)$$

式中  $a$  为 SAR 图像方位向； $r$  为 SAR 图像距离向。

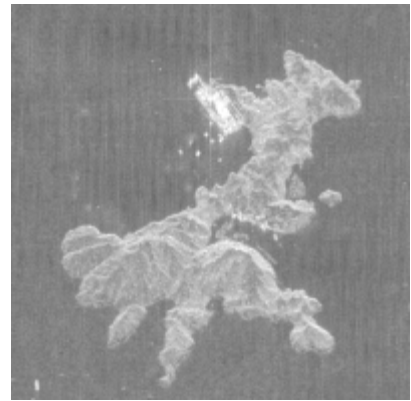


图2 某地原始 SAR 图像

### 3.2 极化 SAR 三维成像

某地的原始 SAR 图像如图2所示，极化 SAR 三维成像算法流程如图3所示。

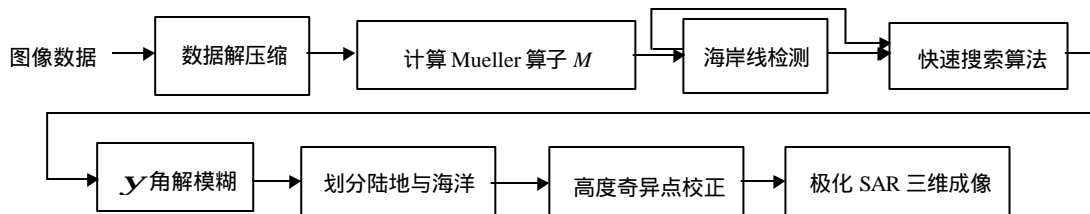


图3 极化 SAR 三维成像结果

## 4 结束语

本文研究了极化 SAR 三维成像算法，提出了一种极化 SAR 三维成像的新算法，并利用真实数据验证了算法的正确性。极化 SAR 三维成像的地表环境要求为均匀分布场景，对于均匀分布场景用图3的极化 SAR 三维成像算法对陆地区域进行处理，实现了极化 SAR 三维成像。如图4所示，成像岛屿的横坐标表示方位向，纵坐标表示距离向。景地势的倾斜度服从  $d_{\mathbf{1}} \approx \mathbf{1}y$ 。对于非均匀分布场景，由于雷达分辨单元散射特性最大值不唯一，存在奇异点。因此，需对图像数据进行多视处理，使多视处理后的分布“场景”趋于均匀分布场景。文中的图像数据多视处理视数为 5.2。视数越高，多视处理后目标散射特性的单峰性能越好，计算的方位向倾斜度越趋近于真实值。

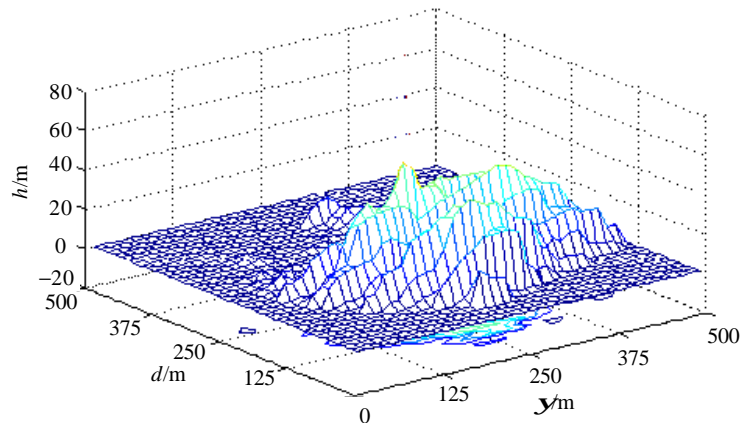


图4 某岛的三维成像地势图

### 参 考 文 献

- 1 李凌杰, 杨 军, 黄顺吉. 一种高效率 SAR 成像处理算法. 电子科技大学学报, 1996, 25(4): 362~367
- 2 张晓玲, 王建国, 黄顺吉. 一种二维 INSAR 解相位模糊方法研究. 电子科技大学学报, 1999, 28(1): 6~9
- 3 Charles Elachi, Yasuo Kuga. Radar Polarimetry for Geoscience Applications. California Institute of Technology, ISBN 0-89006-406-7
- 4 Schuler D L, Lee J S, Grandi G D. Measurement of Topography Using Polarimetric SAR Images. IEEE Trans On Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(5):1 266~1 277

## A New Method of Polarimetric SAR Three-dimensional Imaging

Liang Huaining Yu Yongjian Huang Shunji

(Dept.of Eletronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** A new method of polarimetric SAR three-dimensional imaging using polarimetric SAR data is proposed which provides both a direct measure of terrain azimuthal slopes and derived estimate of terrain elevation. The algorithms discussed in this paper include the fast searching algorithm and the solving ambiguity algorithm of the polarimetric ellipse rotation angle  $\gamma$ . The terrain height is also obtained by employing the method.

**Key words** polarimetric synthetic aperture radar; potarimetric ellipse rotation angle; terrain orientation slope; three dimensions imaging