

极化合成孔径雷达的模拟研究¹

齐向阳 朱敏慧 白有天

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 该文介绍了作者在极化合成孔径雷达模拟研究方面的初步成果。建立了点阵目标的极化合成孔径雷达回波的数学模型；对模拟的回波数据进行了成像处理，得到了四种不同极化组合的复数图像；从复数图像中计算出了每个点目标的散射矩阵；利用极化合成技术生成了圆极化状态下的四幅图像；最后对仿真结果进行了分析。分析结果表明文中的方法是有效的。

关键词 合成孔径雷达，散射矩阵，极化合成

中图分类号 TN951

1 引 言

典型的采用时分方案的极化合成孔径雷达，使用极化状态正交的两副天线交替发射电磁波，在发射的间隙同时接收回波，对四种回波分别成像，可得到四幅不同极化组合的复数图像，从这些图像中，可以算出每个像素的散射矩阵，从而得到每一分辨单元完全的散射特性，这显示了极化合成孔径雷达的优越性。极化合成技术使极化 SAR 的优越性更加引人注目^[1-3]。

极化 SAR 的优越性是通过其独特的工作方式获得的，然而，也正是由于这种独特的工作方式，关于极化 SAR 仿真的文献非常有限^[4]。

本文介绍了作者在这方面的初步的工作。在以下部分，我们建立了点阵目标的极化合成孔径雷达回波的数学模型；对模拟的回波数据进行了成像处理，得到了四种不同极化组合的复数图像；从复数图像中我们计算出了每个点目标的散射矩阵；利用极化合成技术生成了圆极化状态下的四幅图像；最后对仿真结果进行了分析，分析结果表明我们的方法是有效的。

2 数学模型

发射天线和接收天线的极化状态可以用一个二维的复数矢量描述，如

$$C_t = \begin{bmatrix} C_{t,x} \\ C_{t,y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

这里， \hat{x} 和 \hat{y} 构成与波传播方向垂直的平面内的正交极化基， $C_{t,x}$ 表示当单位电压加在天线的馈源时，发射的电场在 \hat{x} 方向的分量； $C_{t,y}$ 表示相应的 \hat{y} 方向的分量。

如果，目标的散射矩阵用 S 表示， $\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix}$ ，那么极化状态为 C_t 的天线发射的电磁波，经过目标散射，极化状态为 C_r 的天线接收的电压可以表示为

$$V = C_r^T S C_t \quad (2)$$

这里上标 T 表示转置。展开上式得：

$$V = C_{r,x} S_{xx} C_{t,x} + C_{r,x} S_{xy} C_{t,y} + C_{r,y} S_{yx} C_{t,x} + C_{r,y} S_{yy} C_{t,y} \quad (3)$$

¹ 2000-02-23 收到，2000-06-22 定稿

对于使用线性极化天线的正侧视合成孔径雷达, 设水平极化方向 (H) 位于 \hat{x} 方向, 垂直极化方向 (V) 位于 \hat{y} 方向. 若用 H 极化天线发射, V 极化天线接收, 由上式可得

$$V_{VH} = C_{r,y} S_{yx} C_{t,x} = C_{r,V} S_{VH} C_{t,H} \quad (4)$$

类似地可以得出:

$$V_{HH} = C_{r,H} S_{HH} C_{t,H} \quad (5)$$

$$V_{HV} = C_{r,H} S_{HV} C_{t,V} \quad (6)$$

$$V_{VV} = C_{r,V} S_{VV} C_{t,V} \quad (7)$$

上述四个公式正好描述了极化合成孔径雷达的四种回波信号. 若观测区域可以分成许多小的散射体. 由于 SAR 是线性系统, 分布目标的回波可以认为是这些小散射体的回波信号的叠加. 下面我们将之具体化.

对于天线口面采用均匀照射的正侧视极化合成孔径雷达, 若发射信号为线性调频矩形脉冲序列, 每个脉冲可以表示如下:

$$e(t) = \exp[j2\pi(f_c t + (1/2)k_r t^2)] \text{rect}(t/T) \quad (8)$$

这里信号的幅度取为 1, f_c 是信号的中心频率, k_r 为调频斜率, T 是脉冲宽度. $\text{rect}(\cdot)$ 是矩形窗函数.

根据 (4), (5), (6), (7) 式, 点阵目标的回波信号可以记述如下:

当 $m + N_a/2$ 为偶数, 并且 $-N_a/2 \leq m \leq N_a/2$, $-N_r/2 \leq n \leq N_r/2$ 时,

$$\begin{aligned} v_{pH}(m, n) &= \sum_i \sum_j \frac{s_{pH}(i, j)}{(R_c + j\Delta r_{gr})^2 + [mv_a/\text{PRF}]^2} \\ &\times \text{sinc}^2 \left\{ \frac{\pi D_a \sin \Phi \{ [mv_a/\text{PRF}] - i\Delta r_{ga} \}}{\lambda} \right\} \text{rect} \left(\frac{[mv_a/\text{PRF}] - i\Delta r_{ga}}{l_s} \right) \\ &\times e \left(\frac{n}{f_s} + \frac{2R_c}{c} - \frac{2\sqrt{(R_c + j\Delta r_{gr})^2 + (mv_a/\text{PRF})^2}}{c} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

当 $m + N_a/2$ 为奇数, 并且 $-N_a/2 \leq m \leq N_a/2$, $-N_r/2 \leq n \leq N_r/2$ 时,

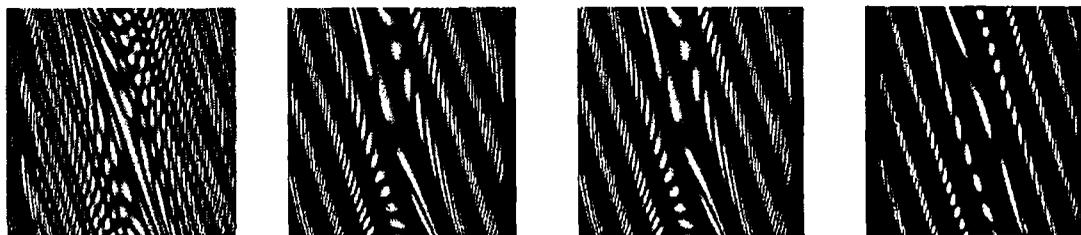
$$\begin{aligned} v_{pV}(m, n) &= \sum_i \sum_j \frac{s_{pV}(i, j)}{(R_c + j\Delta r_{gr})^2 + (mv_a/\text{PRF})^2} \\ &\times \text{sinc}^2 \left\{ \frac{\pi D_a \sin \Phi \{ (mv_a/\text{PRF}) - i\Delta r_{ga} \}}{\lambda} \right\} \text{rect} \left[\frac{(mv_a/\text{PRF}) - i\Delta r_{ga}}{l_s} \right] \\ &\times e \left(\frac{n}{f_s} + \frac{2R_c}{c} - \frac{2\sqrt{(R_c + j\Delta r_{gr})^2 + (mv_a/\text{PRF})^2}}{c} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 i 的取值范围由目标点阵方位向点数决定, j 的取值范围由目标点阵距离向点数决定; Δr_{ga} 为目标点阵方位向点的空间间隔, Δr_{gr} 为目标点阵距离向点的空间间隔; N_a 是回波数据方位向的样本数, N_r 是回波数据距离向的样本数; $m + N_a/2$ 的奇偶性是由极化 SAR 的工作方式决定的; s_{pq} 是散射矩阵的一个元素, 称为复数散射幅, 其下标 p 表示接收天线的极化状态, 下标 q 表示发射天线的极化状态, p 和 q 的取值为 H 或 V. s_{pq} 和普通 SAR 中的有

效散射截面积 σ 是对应的，其关系用公式表示为 $s_{pq} = [\sqrt{\sigma_{pq}}/(2\sqrt{\pi})] \exp(j\theta_{pq})$ ，其中相位项代表信号被反射时的相移。

(9) 和 (10) 式就是极化 SAR 点阵目标回波信号的数学模型。利用该模型获得的原始回波图像如图 1 所示。

仿真采用的主要参数见表 1，目标区域中点阵分布示意图见图 2，表 2 列出了各点目标代表的物体及其数学模型。



(a) VV 原始回波 (b) HV 原始回波 (c) VH 原始回波 (d) HH 原始回波

图 1 点阵目标的原始回波 (实部)

表 1 主要参数说明及其取值

参数	参数说明	参数值	参数	参数说明	参数值
H	飞行高度	6000m	PRF	脉冲重复频率	1200 Hz
v_a	飞行速度	150 m/s	D_a	天线方位尺寸	1.5m
λ	波长	0.032 m	a_c	距离向视角	35°
f_c	中心频率	9.375 GHz	f_s	采样频率	40 MHz
Δf	信号带宽	30 MHz	ρ_a	理论方位向分辨率	0.75 m
T	脉冲宽度	$4 \mu\text{s}$	ρ_r	理论距离向分辨率 (斜距)	5 m

表 2 目标及其模型

点	目标类型	数学模型	S_{HH}	S_{HV}	S_{VH}	S_{VV}
1	短细圆柱	$\begin{bmatrix} 0.25 & -0.433 \\ -0.433 & 0.75 \end{bmatrix}$				
2	右旋螺旋线	$\begin{bmatrix} 1 & -\sqrt{-1} \\ -\sqrt{-1} & -1 \end{bmatrix}$				
3	左旋螺旋线	$\begin{bmatrix} 1 & \sqrt{-1} \\ \sqrt{-1} & -1 \end{bmatrix}$				
4	二面角反射器	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$				
5	导体球	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$				

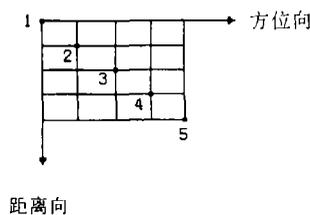


图 2 目标分布示意图 (其中点 3 位于测绘带的中心, 点与点之间距离向和方位向都是相距 10 个分辨单元)

3 成像处理

我们使用 R-D 算法对回波数据进行了成像处理，获得的幅度图像如图 3。图中对最大幅度进行了归一化，并进行了 8-bit 量化。

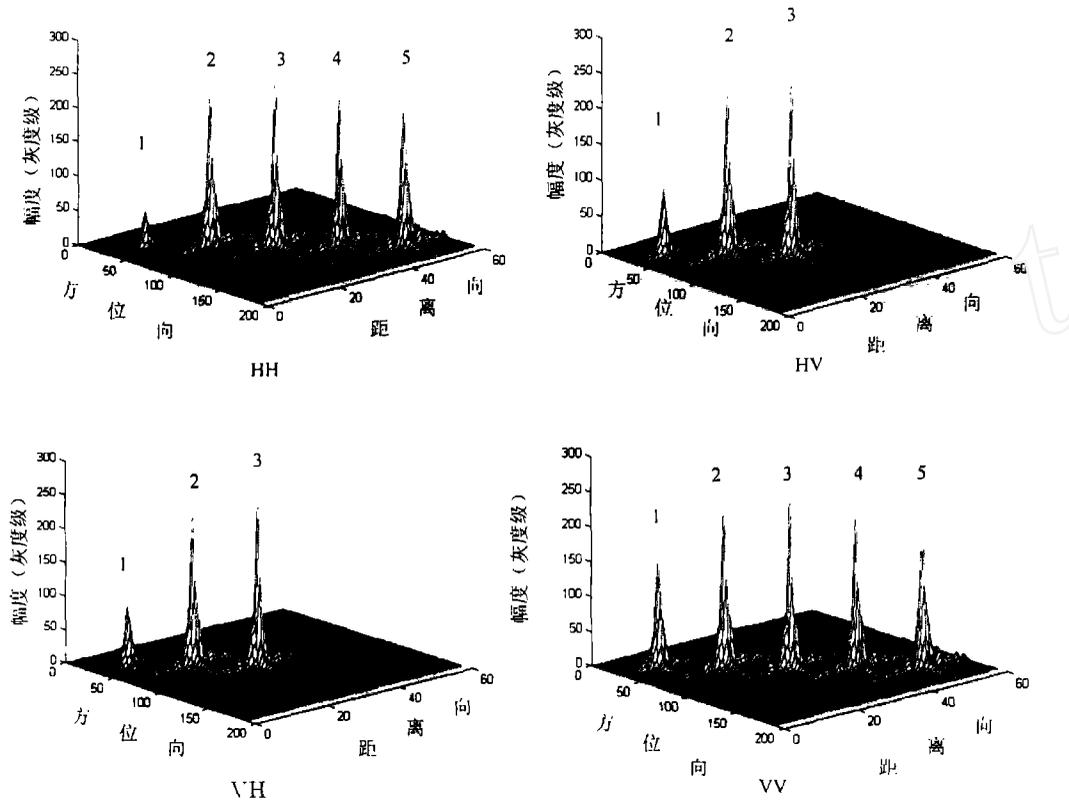


图3 R-D 算法获得的四幅不同线性极化组合的图像, 方位向和距离向标出的是像素的位置

成像时要考虑以下问题: (1) H 极化发射波的回波信号与 V 极化发射波的回波信号不是同时接收的, 成像处理时要选择相应的方位向参考函数。(2) 方位向参考函数要随距离门的改变而变化。

表 3 给出了计算得到的各目标的散射矩阵, 所有计算值都对 S_{HH} 进行了归一化。

表 3 计算得到的散射矩阵 (括号中为相位, 单位是度)

目标	计算值	
	S_{HH} S_{VH}	S_{HV} S_{VV}
点 1	1(0)	1.73079(-180.013)
	1.73128(-179.949)	2.99546(-0.0241407)
点 2	1(0)	0.999391(-90.0617)
	1.00029(-90.0341)	0.998959(-180.033)
点 3	1(0)	1.00087(89.9839)
	0.999982(89.9837)	1.00087(180)
点 4	1(0)	0.000252095(127.728)
	0.000249815(126.713)	1.00134(-179.967)
点 5	1(0)	0.000100062(-251.246)
	0.000094404(-262.381)	1.00154(0.0947498)

4 极化合成

极化合成是极化 SAR 的核心技术之一, 它可以由散射矩阵计算出任意发射极化和接收极化组合的 SAR 图像。

在 (2) 式中, 若发射天线和接收天线的极化状态不是系统天线的实际状态, 而是选用任意期望的极化状态, 那么就可以获得任意期望的极化组合的雷达图像。可见, 极化合成是一种数字处理技术, 它突破了硬件系统的限制, 并使系统的功能得到进一步的加强。例如, 右旋圆极化天线的矢量描述为 $C = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{-1} \end{bmatrix}$; 左旋圆极化天线的矢量描述为 $C = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \sqrt{-1} \\ 1 \end{bmatrix}$ 。右旋圆极化天线发射的电磁波, 经过目标 S 散射, 再由左旋圆极化天线接收的电压, 可用极化合成表示为 $V_{lr} = C_{r,left}^T S C_{t,right} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\sqrt{-1} \ 1) \begin{pmatrix} s_{xx} & s_{xy} \\ s_{yx} & s_{yy} \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \sqrt{-1} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} (i s_{xx} - s_{xy} + s_{yx} + i s_{yy})$ 。利用极化合成技术, 由上边的四幅线性极化的图像, 我们合成出如图 4 所示的四幅圆极化图像。

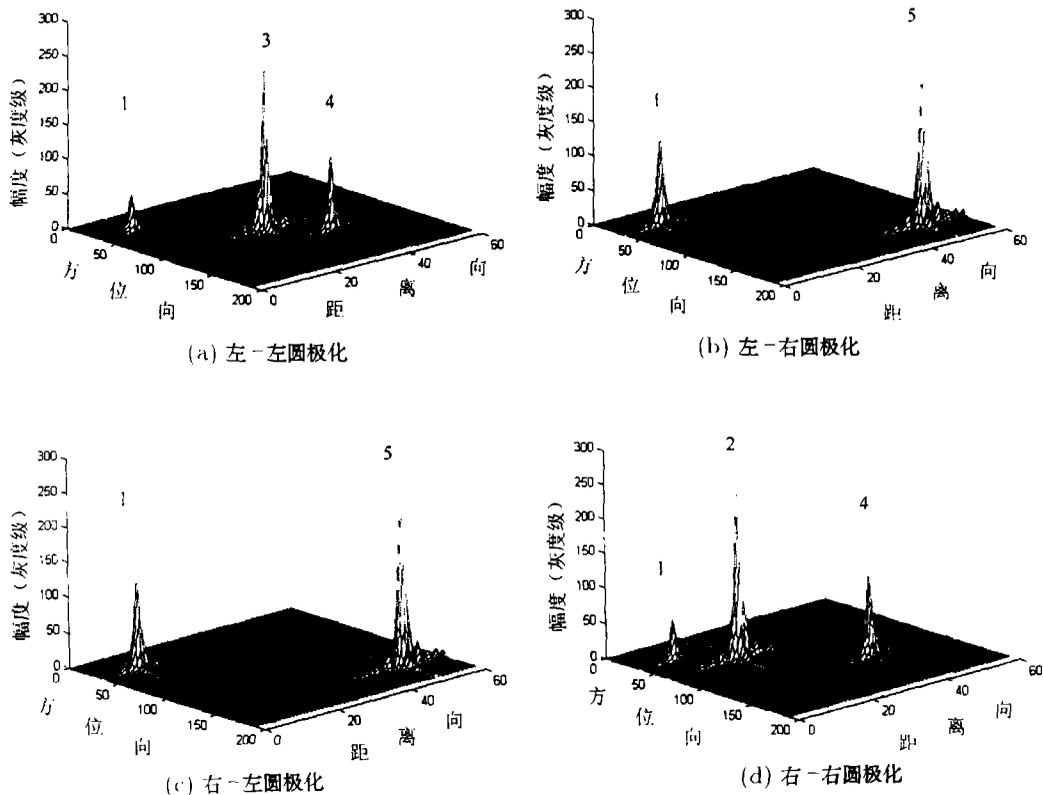


图 4 极化合成得到的圆极化图像, 方位向和距离向标出的是像素位置

5 分析与总结

(1) 对比表 3 与表 2, 不难看出计算得到的各目标的散射矩阵与原模型基本吻合, 这表明我们的模拟正确地复现了极化合成孔径雷达测量目标散射矩阵的实际过程。

(2) 从图 3 和图 4 可以看出, 同一目标在不同极化的图像中可以有不同的表现, 具体讲, 短细圆柱目标在八种极化的图像中都可以观测到, 但它们的强弱不尽相同; 右旋螺旋线目标在四种线极化图像中都可以看见, 而在四种圆极化图像中, 只有右-右圆极化图像中可以看到; 左旋螺旋线目标在四种线极化图像中也都可以看见, 而在四种圆极化图像中, 只有左-左圆极化图像中可以看到; 两面角反射器在四种交叉极化图像中都看不到; 导体球目标在 HV 和 VH 两种交叉极化图像中是不可见的, 在左-右圆极化和右-左圆极化两种交叉极化图像中却有较强的表现, 值得注意的是, 导体球目标在左-左圆极化和右-右圆极化图像中都不可见, 这是因为反射波的旋转方向和入射波的旋转方向正好相反, 人们正是利用这一点对雨中的目标成像而几乎不受雨的影响。

(3) 由于天线的互易性, 两幅交叉极化图像 (即 HV 极化和 VH 极化, 或者左-右圆极化和右-左圆极化) 应该相同, 我们的模拟结果符合这一规律。

本文的仿真正确地复现了极化合成孔径雷达的工作过程; 它为研究极化合成孔径雷达提供了有效的研究方法。

参 考 文 献

- [1] Howard A. Zebker, Jakob J. Van ZYL, Daniel N. Held. Imaging radar polarimetry from wave synthesis, *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(B1), 683-701
- [2] Howard A. Zebker, Jakob J. Van ZYL. Imaging radar polarimetry: A review, *Proc. IEEE*, 1991, 79(11), 1583-1606
- [3] L. M. J. Brown, J. A. Conway, J. T. Macklin, Polarimetric synthetic-aperture radar: Fundamental concepts and analysis tools, *GEC Journal of Research*, 1991, 9(1), 23-35.
- [4] Yonghong Huang, Guy seguin, Nizar Sultan, Multi-frequency and multi-polarization SAR system analysis with simulation software developed at CSA, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Singapore, 1997, 536-538.

THE SIMULATION STUDY ON POLARIMETRIC SYNTHETIC-APERTURE RADAR

Qi Xiangyang Zhu Minhui Bai Youtian

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

Abstract This paper presents author's primary results in the simulation study on polarimetric SAR. First, the mathematical model of the raw returns of multi-point targets received by the polarimetric SAR is established. Then four complex images of different transmit- and receive-polarizations are produced after imaging process. After that, the scattering matrix of every point target is computed based on the four complex images. Afterwards, four circular polarization images are produced using polarization synthesis. Finally some analyses of the simulation results are presented. The results show the effectiveness of this simulation approach.

Key words Synthetic-aperture radar, Scattering matrix, Polarization synthesis

齐向阳: 男, 1974 年生, 博士生, 研究方向: 极化合成孔径雷达系统。

朱敏慧: 女, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 信号与信息处理

白有天: 男, 1937 年生, 研究员, 研究方向: 合成孔径雷达系统设计。