

星载极化 SAR 原始数据模拟研究

岳海霞^{①②} 杨汝良^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 该文提出了一种星载极化 SAR 分布目标原始数据模拟和仿真方法。在引入极化后向散射矩阵的基础上,介绍了分布目标后向散射系数的计算方法,详细阐述了极化原始数据产生过程。最后通过对模拟得到的极化原始数据的仿真再现图像分析,证实了对星载 SAR 极化原始数据模拟的正确性。

关键词 星载 SAR, 分布目标, 极化, 模拟

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)01-0016-05

Raw Data Simulation of Spaceborne Polarization SAR

Yue Hai-xia^{①②} Yang Ru-liang^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate School, Chinese Academy of sciences, Beijing 100039, China)

Abstract In this paper, a method that is used to simulate distributed target's raw data of spaceborne polarization SAR is given. Based on the backscattering polarization matrix, the algorithm of computing distributed target's backscattering coefficients is discussed. Then the process of obtaining the raw data is particularly introduced. Through analyzing the image that come from the simulated data, the conclusion can be reached that the method of simulating the polarization raw data of Spaceborne SAR is right.

Key words Spaceborne SAR, Distributed target, Polarization, Simulation

1 引言

电磁波的传播和散射都是矢量现象。传统的单极化雷达采用固定极化天线来发射和接收射频信号,只能测量散射波矢量的一个分量,而其它包含在电磁波极化特性中的其它有关地物信息的分量则被丢失掉了。极化合成孔径雷达在不同的收发极化组合下,测量地物目标的极化散射特性,并用极化散射矩阵形式来表示。由于电磁波对目标的介电常数、物理特性、几何形状和取向等比较敏感,因而极化测量可以大大提高成像雷达对目标各种信息的获取能力。多极化雷达系统和单极化雷达系统的不同点在于多极化雷达系统对于所发射和接收的目标信号非常敏感,能够测量所有极化状态信号的幅度和彼此间相对相位。因此,多极化 SAR 的应用日益广泛。星载 SAR 特别是小卫星 SAR 的快速发展,为全极化提供了很好的应用空间。在星载 SAR 系统的设计和开发中,信号模拟通过改变系统参数和轨道参数,模拟 SAR 性能指标,可以避免昂贵的试验费用,同时也可以可以在 SAR 系

统发射之前帮助 SAR 处理器的设计和测试,检测 SAR 的成像算法。

全极化后向散射系数的计算,主要采用小平面对模型,考虑地面结构特别是现代城市建筑结构引起的电磁波后向反射特性的变化,形成了单次反射、两次反射和多次反射的全极化 SAR 后向散射系数的计算方法^[1]。在模拟过程中,目标模拟主要包括点目标和点目标阵^[2-4]的模拟,分布目标的模拟^[2, 5]。目标的模拟方法主要采用时域^[2-4]和频域^[5]两种方法。在所有的模拟研究中,对机载 SAR 全极化原始数据的模拟研究已比较成熟^[2-5]。利用软件^[2]和其它极化系统的图像数据^[6]对特定的极化 SAR 系统进行完善的模拟成为极化模拟的一种非常好的手段。在吸收以往模拟方法和理论的基础上,该文创造性提出了星载 SAR 全极化原始数据的模拟方法,包括:星载全极化 SAR 后向散射系数的计算方法;星载全极化 SAR 分布目标原始数据的计算方法;同时通过一系列的试验,利用模拟得到的原始数据,验证了全极化

SAR 的极化特性。

本文在第 2 节描述极化信息的基础上, 第 3 节给出了不同极化状态下, 分布目标后向散射系数的计算方法; 第 4 节建立了极化原始数据模拟模型; 最后给出了极化状态下分布目标的模拟结果。

2 极化散射矩阵

系统采用单次发射, 单次接收, 收发共用一个天线的极化方式。设目标的地面坐标系为 (x, y, z) , x 与 SAR 运动方向一致, z 垂直地面指向地心, y 与 xy 正交, 它们之间满足右手定则。入射和反射笛卡尔坐标系相同, 标记为 (k, h, v) , 它们之间的关系如图 1 所示。 k 为电磁波传播方向, h 代表水平极化方向, v 代表垂直极化方向, 坐标轴之间同样满足右手定则。两个坐标系之间的关系如下:

$$k = \sin(\theta)y - \cos(\theta)z$$

$$h = \frac{k \times z}{|k \times z|} = x$$

$$v = h \times k = \cos(\theta)y + \sin(\theta)z, \quad \theta \text{ 为入射角。}$$

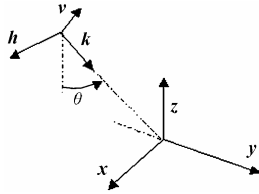


图 1 极化坐标系与地面坐标系的关系

与普通的单极化合成孔径雷达所测量的雷达有效散射截面积相对应, 全极化合成孔径雷达测量的是目标的散射矩阵。极化散射矩阵通常也称为 Sinclair 散射矩阵, 它将目标散射的能量特性、相位特性和极化特性统一起来, 完整地描述了目标的电磁散射特性。

在极化散射坐标系中, 设发射电磁波电场矢量和接收电磁波的电场矢量分别为 $E_i = \begin{bmatrix} E_{iH} \\ E_{iV} \end{bmatrix}$ 和 $E_s = \begin{bmatrix} E_{sH} \\ E_{sV} \end{bmatrix}$, 则它们之间的关系可以通过一个 2×2 的矩阵表示, 这个矩阵称为极化散射矩阵 S , 即

$$E_s = S \cdot E_i = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \cdot E_i \quad (1)$$

S_{xy} 表示 x 极化发射, y 极化接收时的目标后向散射系数。

一般来说, 极化散射矩阵具有复数形式。它不但与目标本身的形状、尺寸、结构、材料等物理因素有关, 而且与目标和收发测量系统之间的相对姿态取向、空间几何位置关系, 以及雷达工作频率等条件有关。在满足互易原理的条件下, 有 $S_{HV} = S_{VH}$, 此时目标的散射矩阵为对称阵。

3 后向散射系数的计算方法

设入射场为

$$E_i = e_i E_i \exp(-jk \cdot R) \quad (2)$$

k 为电磁波传播方向, 对应标量为 k 。 R 表示天线平台相对于平面中心的位置矢量, 对应标量为 r 。 e_i 为电磁波极化方向的单位矢量, 对应 h 和 v 两个极化方向的正交分量分别为 e_{ih} 和 e_{iv} 。在这种情况下, 入射场可表示成水平极化(H)和垂直极化(V)向量形式, 即

$$E_i \rightarrow \frac{jk \exp(-jkr)}{4\pi r} \begin{bmatrix} E_{iH} \\ E_{iV} \end{bmatrix} \quad (3)$$

相应的电磁波接收场可表示为

$$E_s \rightarrow \begin{bmatrix} E_{sH} \\ E_{sV} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于平面 A , 接收电磁场 E_s 为

$$E_s = \int_A \left\{ jw\mu G(R, R') \cdot [n \times H(R')] + \nabla \times G(R, R') \cdot [n \times E(R')] \right\} dA \quad (5)$$

n 为平面 A 的法线矢量, R, R' 分别表示 SAR 到平面中心和平面上任意点的矢量, $H(R')$ 和 $E(R')$ 分别表示磁场和电场强度, w 为发射电磁波的角频率, μ 为平面的导磁率, I 为单位阵。格林(Green)函数:

$$G(R, R') = \left[I + \frac{\nabla \nabla}{k^2} \right] \frac{\exp(jk|R - R'|)}{4\pi|R - R'|} \quad (6)$$

对于远场采用 Kirchhoff 近似理论, 接收电磁场可表示为

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{jk \exp(-jkr)}{4\pi r} E_i (I - k \cdot k) \int_A F(k, e_i, n) \exp(2jk \cdot \rho) dA \\ &= \frac{jk \exp(-jkr)}{4\pi r} E_i (I - k \cdot k) \cdot F(k, e_i, n) \cdot L_s \end{aligned} \quad (7)$$

$F(k, e_i, n)$ 主要与电磁波的极性、电磁波入射角、平面电磁介电常数和粗糙度有关。

$$\begin{aligned} F(k, e_i, n) &= -(e_i \cdot q)(n \cdot k)q(1 - \text{Re}_\perp) + (e_i \cdot p)(n \times q)(1 + \text{Re}_\parallel) \\ &\quad + (e_i \cdot q)(k \times (n \times q))(1 + \text{Re}_\perp) \\ &\quad + (e_i \cdot p)(n \cdot k)(k \times q)(1 - \text{Re}_\parallel) \end{aligned} \quad (8)$$

其中 (p, q, k) 为位置 R' 处的局部正交坐标系。 $q = \frac{k \times n}{|k \times n|}$,

$p = q \times k$ $\text{Re}_\perp$ 和 $\text{Re}_\parallel$ 为局部坐标系内垂直极化分量 q 与水平极化分量 p 对应的垂直和水平 Fresnel 反射系数。

$L_s = \int_A \exp(-2jk \cdot \rho) dA$ 主要与平面的形状有关。平面形状的

随机性导致 L_s 的随机变换。 ρ 表示平面上任一点到平面中心的位置矢量。

接收电磁波可简化为

$$E_s = g(\cdot) S \cdot E_i \cdot L_s \quad (9)$$

$\mathbf{S}$ 为极化散射矩阵, 可表示为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (10)$$

后向散射系数矩阵 γ 可表示为

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{HH} & \gamma_{HV} \\ \gamma_{VH} & \gamma_{VV} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中 $\gamma_{HH} = S_{HH} \cdot L_s$, $\gamma_{VV} = S_{VV} \cdot L_s$, $\gamma_{HV} = \gamma_{VH} = S_{HV} \cdot L_s$ 。
 $g(\cdot)$ 为系统点扩散函数。

后向散射系数的计算可以分成 3 步, 第 1 步计算 L_s , 第 2 步计算 $\mathbf{S}$, 最后把前两步的结果相乘得到 γ 。

第 1 步 根据 Kirchhoff 理论, 建立平面模型: $ax+by+cz+d=0$ 。假设 α 为小平面单元法线与水平面的夹角, $2L_x, 2L_y$ 为小平面单元在 x, y 轴的投影。小平面单元面积非常小, 可以近似为 $dx \cdot dy / \sin \alpha$ 。根据小平面 3 个顶点坐标求出它的平面方程。以上第 1 步可以表示为

$$\begin{aligned} L_s &= \int_A \exp(2j \mathbf{k} \cdot \boldsymbol{\rho}) dA = \int_{A'} \exp(2j \mathbf{k} \cdot \boldsymbol{\rho}) dA' / \sin \alpha \\ &= \int_{A'} dA' \exp\{2j \cdot [(k_x \mathbf{x} + k_y \mathbf{y} + k_z \mathbf{z}) \cdot (x\mathbf{x} + y\mathbf{y} + z\mathbf{z})]\} / \sin \alpha \\ &= \exp[2j \cdot k_z \cdot (-d/c)] \cdot \int_{-L_x}^{L_x} \exp[2j \cdot (k_x - a/c \cdot k_z) \cdot x] dx \\ &\quad \cdot \int_{-L_y}^{L_y} \exp[2j \cdot (k_y - b/c \cdot k_z) \cdot y] dy / \sin \alpha \\ &= \exp[2j \cdot k_z \cdot (-d/c)] \cdot 4L_x L_y \cdot \text{sinc}[2(k_x - a/c \cdot k_z) \cdot L_x] \\ &\quad \cdot \text{sinc}[2(k_y - b/c \cdot k_z) \cdot L_y] / \sin \alpha \end{aligned} \quad (12)$$

第 2 步 根据式(7)和式(9)可得到散射矩阵 $\mathbf{S}$ 各元素的表达式:

$$S_{pq} = (\mathbf{I} - \mathbf{k} \cdot \mathbf{k}) \cdot F(\mathbf{k}, \mathbf{e}_p, \mathbf{n}) \quad (13)$$

其中 $p = H, V$, $q = H, V$ 。

$$\text{从而} \quad S_{HH} = F_x(\mathbf{k}, \mathbf{e}_H, \mathbf{n}) \quad (14)$$

$$S_{HV} = F_y(\mathbf{k}, \mathbf{e}_V, \mathbf{n}) + F_z(\mathbf{k}, \mathbf{e}_V, \mathbf{n}) \sin(\theta) \quad (15)$$

$$S_{VH} = F_x(\mathbf{k}, \mathbf{e}_V, \mathbf{n}) \quad (16)$$

$$S_{VV} = F_y(\mathbf{k}, \mathbf{e}_V, \mathbf{n}) + F_z(\mathbf{k}, \mathbf{e}_V, \mathbf{n}) \sin(\theta) \quad (17)$$

4 极化 SAR 分布目标原始数据的计算方法

极化 SAR 分布目标原始数据的模拟都在数字域进行, 对所有原始数据的计算都为离散形式。以 $K_a \times K_r$ 大小的分布目标为例, 方位向和距离向的点数量分别为 K_a 和 K_r 。数据模拟中地面场景的模拟建立在 Kirchhoff 近似理论的基础上, 模拟图像的像素取决于方位向的重复频率和信号的采样频率。方位向和距离向每个像素之间有 4 个小平面。在模拟过程中方位向和距离向都采用插值处理。

方位向处理点数为

$$M = 4(\beta R_{\max} \text{PRF}/V - 1) + K_a \quad (18)$$

距离向处理点数为

$$N = 4 \left[\left(\tau + \frac{2(R_{\max} - R_{\min})}{c} \right) \cdot f_s - 1 \right] + 1 \quad (19)$$

其中 β 为天线方位向波束宽度, $R_{\max}$ 和 $R_{\min}$ 分别为分布目标在整个方位时间内距离的最大和最小值, V 为 SAR 平台运行速度, τ 为脉冲宽度, f_s 为采用频率, λ 为发射信号的波长。

发射线性调频信号脉冲宽度时间 τ 内采样点数 $N_r = \tau \cdot f_s$ 。线性调频信号可表示为

$$\exp \left(jw \left(\frac{n'}{f_s} \right) + j \frac{K_r}{2} \left(\frac{n'}{f_s} \right)^2 \right) \cdot \text{rect} \left(\frac{n'}{N_r} \right), \quad 0 \leq n' \leq N_r \quad (20)$$

K_r 为线性调频信号的斜率。SAR 点扩散函数为

$$g(m' - m, n' - n; m, n) = W^2 \left(\frac{m' - m}{L_a} \right) \text{rect} \left(\frac{n' - n}{N_r} \right) \exp(-j\phi) \quad (21)$$

其中

$$\phi = 4\pi \Delta n' + \frac{2K_r}{f_s^2} (n' - n - \Delta n')^2 \quad (22)$$

$$\Delta n' = \sqrt{\frac{V^2 f_s^2 (m' - m)^2}{\text{PRF}^2 c^2} + (N_0 + n)^2} - N_0 - n \quad (23)$$

N_0 为分布目标在距离向的起始位置。 m, n 表示分布目标相对起始位置的坐标, $0 \leq m < K_a$, $0 \leq n < K_r$ 。 m' 表示 SAR 方位向的位置, $0 \leq m' \leq M - 1$ 。 n' 表示 SAR 距离向的位置, $0 \leq n' \leq N - 1$ 。 L_a 表示距离 n 处合成孔径的长度。PRF 为脉冲重复频率。

SAR 原始回波信号由 4 个极化通道组成, 可用矩阵函数的形式表示

$$\begin{aligned} \mathbf{h}(m', n') &= \begin{bmatrix} h_{HH}(m', n') & h_{HV}(m', n') \\ h_{VH}(m', n') & h_{VV}(m', n') \end{bmatrix} \\ &= \sum_{m=0}^{K_a-1} \sum_{n=0}^{K_r-1} \gamma \cdot g(m' - m, n' - n; m, n) \end{aligned} \quad (24)$$

随后, 按照所要模拟像素间隔, 将生成的原始数据抽取得到极化 SAR 分布目标原始数据。该数据代表了各种极化状态下的回波信号。原始数据采用经典的 R-D 压缩方法, 可以得到模拟产生的极化数据图像。

模拟产生的全极化原始数据, 代表了各种极化状态下的后向散射系数。我们对全极化状态下的原始数据进行功率合成, 可得到模拟数据的总功率图像。功率合成计算公式为

$$\sigma = \sqrt{S_{HH}^2 + 2S_{HV}^2 + S_{VV}^2} \quad (25)$$

5 极化 SAR 分布目标模拟结果

以下所有的试验图像, 横向表示距离向, 纵向表示方位向。原始数据的产生中, 轨道采用星载椭圆轨道模型, 地球采用 1972 年标准化的椭球体模型, 系统选用 S 波段的系统参数。模拟轨道参数的选择如表 1 所示。

表 1 极化 SAR 分布目标模拟选用参数

轨道参数	数值
轨道倾角	97.423°
轨道周期	94.4513 min
长轴	13 740.280 km
天线视角	35°
偏心率	0.0015

试验 1 利用第 3 节介绍的后向散射系数的计算方法, 选用图 2(a)所示大小 400×400 区域, 获得该区域 S_{HH} 后向散射系数如图 2(b)所示。图 2 中包括 A, B, C, D, E, F 和 G 7 个区域, 区域介电常数分别为 $\varepsilon_A = \varepsilon_B = \varepsilon_C = \varepsilon_D = \varepsilon_E = 2$, $\varepsilon_F = 8$, $\varepsilon_G = 60$; 区域后向散射系数分别为 $\sigma_A = 0.1$, $\sigma_B = 0.5$, $\sigma_C = 0.7$, $\sigma_D = 1$, $\sigma_E = \sigma_F = \sigma_G = 0.3$ 。

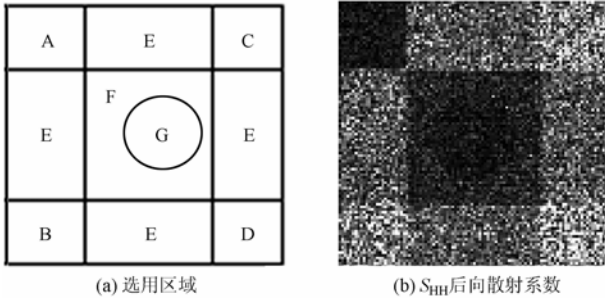


图 2 SAR 模拟试验 1 图像

试验 2 分布目标模型选用 200×200 点大小的一块区域, 在地球表面上放了 2 个圆柱体, 第 1 个圆柱体的高度 80m, 第 2 个圆柱体的高度 330m, 同时第 2 个圆柱体顶部被斜 45° 削去一块。模型中每个像素对应一个分辨单元, 背景介电常数为 $\varepsilon = 4$, 除较高的圆柱体顶部光滑 (在表面粗糙度 $\sigma < \lambda / (8 \cos(\theta)) = 0.0143$ 的情况下, 可以认为表面光滑) 外, 其它部分表面粗糙度为 $\sigma = 0.16$ 。试验用到的模型和模拟产生的 HH 极化原始数据压缩结果如图 3 所示。

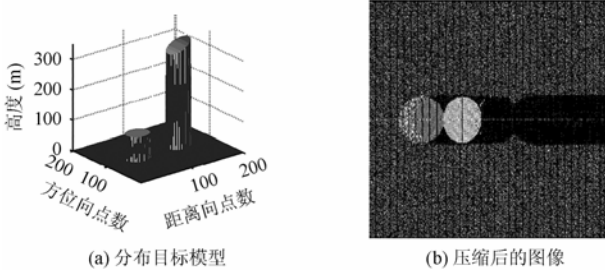


图 3 SAR 模拟试验 2 图像

试验 3 选用的分布目标模型如图 4 所示。模型包含 400×400 个点, 每个分辨单元内有 4 个小平面组成。在地球表

面上放了一个平台, 在平台上有一个圆锥。背景表面高度服从 $\sigma = 0.2$ 的高斯分布, 介电常数 $\varepsilon = 60$ 。平台表面介电常数 $\varepsilon = 8$, 锥体的表面介电常数 $\varepsilon = 2$ 。平台表面和锥体表面粗糙度皆为 $\sigma = 0.01$ 的光滑表面。

根据第 3 节介绍的小平面后向散射系数的计算方法, 得到的各种极化状态下的后向散射系数如图 5 所示。

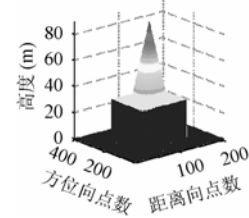


图 4 模拟试验 3 的分布目标模型

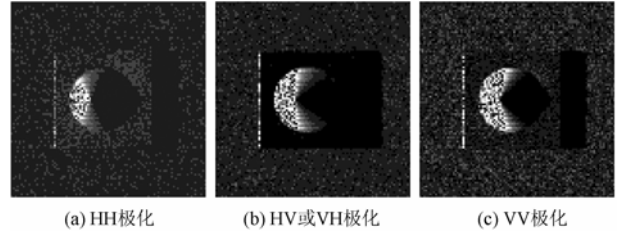


图 5 各种极化状态下分布目标后向散射系数

按照第 4 节介绍的方法, 获得 HH 极化、HV 极化和 VV 极化状态下的极化 SAR 分布目标原始数据。原始数据采用经典的 R-D 算法压缩后的结果如图 6 所示。

每种极化能够体现物体不同的散射特性, 叠加压缩结果可以得到物体的在全极化状态下的总功率图像, 如图 7 所示。

分别得到背景、平台表面、平台右上角和圆锥表面的同极化极化响应特征图如图 8 所示。

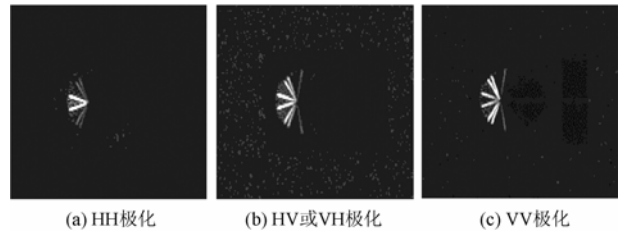


图 6 各种极化状态下压缩结果

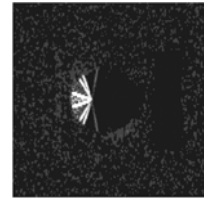


图 7 总功率图

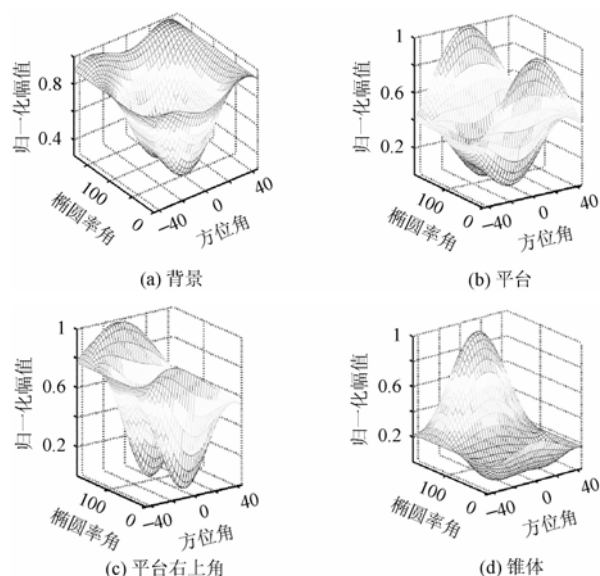


图 8 同极化响应特征图

根据以上极化 SAR 分布目标模拟试验, 我们可以看出:

(1) 试验 1 中, 模型介电常数相同, 目标后向散射系数随着表面粗糙度的增加而增大。但在介电常数增加的情况下, 同一粗糙度下的后向散射系数变小。

(2) 试验 2 中, 第 2 个圆柱相对于第 1 个圆柱的位置减小, 第 2 个圆柱的顶部变成了椭圆, 同时它的图像覆盖到第 1 个圆柱的阴影内。这是因为雷达成像过程中水平坐标向斜面坐标转变, 引起了斜坡缩短和图像重叠。

(3) 试验 3 中, 进一步论证了不同的极化状态可以反映不同的极化特征。HH 极化情况下的后向散射系数和 VV 极化下的后向散射系数区别不大, HV 极化下却有明显的不同。

(4) 试验 3 的压缩结果要比试验 2 的压缩结果细腻, 这主要是因为试验 3 中选用的分布目标模型在每个分辨单元内的小平面个数要比试验 2 中的多, 平面之间的相关性要好一些。

(5) 试验 3 的总功率图显示出模拟原始数据的压缩图像已经接近试验采用的模型。

(6) 从试验 3 同极化响应特征图可以看出, 圆锥表面由于均方误差远小于入射波长, 散射模型非常接近布拉格散射, 同时本身的表面特性又使得圆锥表面在整个照射时间内出现明暗相间的条纹。平台右上角同极化特征图反映了该处

存在两面角反射。背景表面相对波长来说非常粗糙, 同时介电常数比较高, 同极化响应特征图非常接近平台右上角的同极化散射特征图。

6 结束语

本文利用第 3 节和第 4 节给出的后向散射系数的计算方法与极化 SAR 原始数据的模拟方法, 通过 3 个试验探讨了极化 SAR 目标后向散射系数、介电常数、电磁波特性对目标特性的影响。同时在全极化 SAR 数据模拟的基础上, 证实了文中所述模拟方法的有效性。

参考文献

- [1] Franceschetti G. A canonical problem in electromagnetic backscattering from building. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1787 – 1801.
- [2] Huang Y H, Seguin G, Sultan N. Multi-frequency and multi-polarization SAR system analysis with simulation software developed at CSA. IGARSS '97. Geoscience and Remote Sensing, Singapore International Convention and Exhibition Centre, 1997, vol.1: 536 – 538.
- [3] 林捷, 洪峻. 星载极化 SAR 数据模拟. *遥感学报*, 2002, 6(1): 7 – 11.
- [4] 齐向阳, 朱敏慧, 白友天. 极化合成孔径雷达的模拟研究. *电子与信息学报*, 2003, 23 (29): 899 – 904.
- [5] Franceschetti G, Migliaccio M, Riccio D, *et al.* SARAS, a synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(1): 110 – 123.
- [6] Yamaguchi Y, Kimura K, *et al.* ALOS-PALSAR image simulation in various polarization bases. IGARSS '02. 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toronto, Canada, 24-28 June 2002, vol.1: 381 – 383.

岳海霞: 女, 1975 年生, 博士生, 从事 SAR 模拟源及数字电路设计与信号处理工作。

杨汝良: 男, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 现从事星载、机载合成孔径雷达系统研究。