

SAR 原始数据的模拟研究*

汤志伟** 赵志钦 黄顺吉

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】 针对面目标, 给出了合成孔径雷达(SAR)系统中获取原始数据的算法及其模拟结果。对模拟的面目标采用矩形网格模型, 根据雷达目标的反向散射机理获取雷达原始数据。采用标准的 R-D 算法, 通过计算机模拟, 得到了面目标的成像结果。

关键词 合成孔径雷达; 后向散射系数; 原始数据; 面目标

中图分类号 TN957.52

合成孔径雷达(SAR)原始数据的计算机模拟是一项重要的研究课题^[1], 不仅能简化成像处理算法的实验, 提高模式识别和特征提取技术, 而且在噪声和杂波抑制方面, SAR 原始数据的模拟将起到非常突出的作用, 并对优化 SAR 系统参数极有帮助。

SAR 的原始数据是指其平台接收的回波信号。本文描述了 SAR 平台接收的回波信号的数学模型, 提出了利用矩形网格模型计算后向散射系数的算法, 并对某面目标进行了计算机模拟。

1 SAR 原始数据的理论模型

设雷达发射信号为一线性调频脉冲串 $f(t)$, 考虑到 SAR 的接收通常采用正交双通道, 故 $f(t)$ 可表示为^[2,3]

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} p(t - nT_r) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{rect}(t - nT_r) \exp \left\{ j \left[2\pi f_c(t - nT_r) + \frac{1}{2} 2\pi \alpha(t - nT_r)^2 - \phi(t - nT_r) \right] \right\} \quad (1)$$

式中 $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数; f_c 为载频; α 为发射脉冲的线性调频率; $\phi(\cdot)$ 为脉冲内的相位编码, 一般采用 LFM Chirp 编码; T_r 为脉冲重复周期。

SAR 在 t 时刻所接收到的回波 $s(t)$ 为

$$s(t) = \iint_D \sigma(x', r') w_a(x - x') w_r(r - r') f\left(t - \frac{2R(x', r')}{C}\right) dx' dr' \quad (2)$$

式中 D 表示波束所照射的区域; $\sigma(x', r')$ 表示点 (x', r') 的雷达后向散射系数; $w_a(\cdot)$ 为方位向的天线增益函数; $w_r(\cdot)$ 为距离向的天线增益函数; $R(x', r')$ 表示平台离目标 (x', r') 的距离。因 t 包含了一个快变化(脉内时间变化)和一个慢变化(脉间时间变化), 分别由 r, x 决定, 故可将 $s(t)$ 改写为 $s(x, r)$, 并将式(1)代入式(2)可得

$$s(x, r) = \iint_D \sigma(x', r') w_a(x - x') w_r(r - r') \text{rect}\left(t - \frac{2R(x', r')}{C}\right) \times \exp \left\{ j 2\pi f_c \left[t - \frac{2R(x', r')}{C} \right] + j \pi \alpha \left[t - \frac{2R(x', r')}{C} \right]^2 \right\} dx' dr' \quad (3)$$

令 $t = 2r'/c$, 将 $R(x', r')$ 简化为 $R(x')$, 则

$$s(x, r) = \iint_D \sigma(x', r') w_a(x - x') w_r(r - r') \text{rect}\left[\frac{2}{C}(r' - R(x'))\right] \times \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} [r' - R(x')] + j \frac{4\pi\alpha}{C^2} [r' - R(x')]^2 \right\} dx' dr' \quad (4)$$

根据式(4), $s(x, r)$ 可表示为

$$s(x, r) = \sigma(x, r) * h(x, r) \quad (5)$$

式中 $*$ 代表二维卷积, 回波 $s(x, r)$ 可认为是目标后向散射系数函数通过一系统函数 $h(x, r)$ 的系统而得到的, 其中 $h(x, r)$ 为

$$h(x, r) = w_a(x)w_r(r)\text{rect}\left[\frac{2}{C}(r - R(x))\right]\exp j\frac{4\pi}{\lambda}[r - R(x)]\exp\left[j\frac{4\pi\alpha}{C^2}(r - R(x))^2\right] \quad (6)$$

由此可知, 对 SAR 原始数据的模拟, 主要是对目标后向散射系数的模拟。同时, 为方便计算, 可将照射区域 D 沿入射方向根据雷达分辨率划分成多个分辨单元。

2 目标后向散射系数的模拟

首先把目标分割成一个个矩形网格, 这些矩形网格面的直径相对入射波长来说应足够大, 而相对分辨长度则需足够小, 即每个分辨单元包括若干个这样的矩形网格。每个分辨单元的后向散射系数是其所包括的矩形网格面的各后向散射系数之和。下面计算单个矩形网格面的后向散射系数。

后向散射系数是决定图像灰度的关键因素, 与被测绘目标的材料、表面粗糙度等物理性能密切相关, 也与雷达波长, 电波极化等因素有关。要计算后向散射系数, 首先需知道被测量场景的电磁特性, 场景中后向散射场与入射场的比值就是反向散射系数。

入射场可以表示为

$$E_i = eE_0 \exp(-j\mathbf{K}\mathbf{R}) \quad (7)$$

式中 $\mathbf{K}$ 为入射波的传播向量; e 为单位极化向量; E_0 为入射场的幅值; $\mathbf{R}$ 是从传导天线的相位中心到小面的距离向量。这里只考虑 H 极化或 V 极化波, 因为结合这两种极化, 加上不同的复数的幅值, 可以合成任何需要的极化。

利用 Kirchhoff 提出的远场后向散射的物理光学近似的解决方法可得到后向散射场为^[3]

$$E_s = \frac{j\mathbf{K} \exp(-j\mathbf{K}\mathbf{R})}{4\pi R} E_0 (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{K}) \int_A F(a, b, c) \exp(2j\mathbf{K}\boldsymbol{\rho}) dA \quad (8)$$

式中 $\mathbf{I}$ 为单位对角矩阵; $\boldsymbol{\rho}$ 为散射波方向向量; (a, b, c) 是垂直于矩形网格面 A 的法线向量在雷达坐标 (x, r, s) 上的分量, 其定义为

$$a = \frac{\partial Z(x, y)}{\partial x} \quad b = \frac{\partial Z(x, y)}{\partial r} \quad c = \frac{\partial Z(x, y)}{\partial s} \quad (9)$$

式中 函数 $F(a, b, c)$ 依赖于雷达波的入射角、极化和场景的非涅尔反射系数。考虑 H 和 V 极化的情况, 可以计算 $F(a, b, c)$ 的各个分量^[3]。

由于后向散射系数是后向散射场与入射场的比值, 通过计算, 可分别得到 H 和 V 极化下的后向散射系数为^[4]

$$\sigma_H = S_{HH} \int_A \exp(2j\mathbf{K}\boldsymbol{\rho}) dA \quad \sigma_V = S_{VV} \int_A \exp(2j\mathbf{K}\boldsymbol{\rho}) dA \quad (10)$$

式中

$$\begin{aligned} S_{HH} &= \frac{2(c \sin \Delta\theta - b \cos \Delta\theta)}{a^2 + (b \sin \Delta\theta + c \cos \Delta\theta)^2} [a^2 R_q - (b \sin \Delta\theta + c \cos \Delta\theta)^2 R_p] \\ S_{VV} &= \frac{2(c \sin \Delta\theta - b \cos \Delta\theta)}{a^2 + (b \sin \Delta\theta + c \cos \Delta\theta)^2} [(b \sin \Delta\theta + c \cos \Delta\theta)^2 R_q - a^2 R_p] \\ R_p &= \frac{\cos \delta - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \delta}}{\cos \delta + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \delta}} \quad R_q = \frac{\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \delta} - \varepsilon_r - \cos \delta}{\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \delta} + \varepsilon_r - \cos \delta} \\ \Delta\theta &= \theta - \theta_0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中 δ 为入射方向与网格面法向的夹角; ε_r 为目标的相对介电常数。

3 计算机模拟

根据前面的讨论,可得出产生原始数据的模拟流程如下:

- 1) 确定矩形网格面,即按等方位线,距离从近到远离散目标表面。
- 2) 进行地面坐标与雷达坐标系的转换

$$(x, y, z) \rightarrow (x, r, s) \begin{cases} x = x \\ r = \text{sign}(-y)(\sin \theta_0 y + \cos \theta_0 z) \\ s = (\cos \theta_0 y - \sin \theta_0 z) \text{sign}(y) \end{cases} \quad (12)$$

3) 计算单个矩形网格面的后向散射系数与一个分辨单元内的后向散射系数。假设一个分辨单元内有 m 个矩形网格面, σ_k 为第 k 个矩形网格面的后向散射系数($k=1, 2, \dots, m$), 则该分辨单元的后向散射系数为 $(\sigma_1 + \dots + \sigma_k + \dots + \sigma_m)/m$ 。

4) 完成后向散射系数 $\sigma(x, r)$ 的二维 FFT 与系统函数 $h(x, r)$ 的二维 FFT, 可得 $S(\zeta, \eta)$ 。

5) 对 $S(\zeta, \eta)$ 作二维 IFFT, 得到原始数据 $s(x, r)$ 。

我们模拟了投射角为 20° , 在 HH 极化下, 相对介电常数为 4, 置于一个平台上的圆柱目标, 并给出了如图 1 所示相应的机载 SAR 图像, 其模拟参数如下:

载机高度: 8 000 m

载机速度: 250 m/s

波 长: 0.028 m

分 辨 力: 7 m × 7 m (地面)

从上面的模拟结果可以看出, 由于 (x, y, z) 坐标到 (x, r, s) 坐标的转换, SAR 图像呈现了几何变形, 从而也验证了模拟算法的有效性。



图 1 机载 SAR 图像

4 结 论

通过以上分析, 我们得到了 SAR 系统中获取原始数据的模拟模型。该模型可有效地用于地面目标原始数据的模拟, 有助于开展 SAR 成像处理算法及优化 SAR 系统参数等方面的工作。

参 考 文 献

- 1 [美] 米切尔 R.L. 雷达系统模拟. 陈训达译. 北京: 科学出版社, 1982
- 2 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用. 北京: 科学出版社, 1989
- 3 王建国. 卫星扰动与 SAR 成像研究. 成都: 电子科技大学学报, 1997, 26(增刊): 197~203
- 4 Franceschetti G, Riccio D, Schirinzi G. SARAS: a SAR raw signal simulator. IEEE Trans on GRS, 1992, 30(1): 110~123

Study of SAR Raw Signal Simulation

Tang Zhiwei Zhao Zhiqin Huang Shunji

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

Abstract The algorithm of SAR raw signal simulation and its computer simulations are described, which are based on a rectangular grid formats model and scatter mechanism of the simulated target. By using this simulated data and R-D algorithm, the image of the area target is achieved in experiment.

Key words synthetic aperture radar; back scatter coefficient; raw signal; area target