

星载 SAR 分布目标原始数据模拟研究¹

万 锋*** 岳海霞*** 杨汝良*

*(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

** (中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要: 该文提出了一种星载 SAR 分布目标原始数据模拟的方法。以 Kirchhoff 近似及小平面对理论为基础, 讨论并给出了组成分布目标基本单元的小平面向散射系数的计算方法。接着介绍了分布目标的回波模型, 具体阐述了分布目标的原始数据形成方法。通过对原始数据成像处理后得到的图像进行分析, 验证了此方法的有效性。

关键词: 星载 SAR, 分布目标, 原始数据, 模拟, 小平面对

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)08-1250-06

Distributed Target's Raw Data Simulation of Spaceborne SAR

Wan Feng*** Yue Hai-xia*** Yang Ru-liang*

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

** (Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract A method of simulating distributed target's raw data of spaceborne SAR is given. Based on the theory of Kirchhoff approach and facet, the algorithm of computing the facet's backscatter coefficients is discussed. Then the echo signal model of the distributed target consisted of facets is introduced. And the method and whole procedure of simulating distributed target's raw data are described. After the analysis of the compressed image of raw data simulated, the conclusion can be reached that the method of simulating raw data of distributed target is right.

Key words Spaceborne SAR, Distributed target, Raw data, Simulation, Facet

1 引言

星载合成孔径雷达 (SAR) 是探测地球地面自然环境的强大工具。它的众多的优点越来越成为研究的热点。星载 SAR 模拟能模拟 SAR 的回波, 用于 SAR 系统的检验。由于 SAR 回波的非线性, 准确的地面特征信息的提取非常困难, 星载 SAR 模拟可以通过建立模型来帮助解决这个问题。SAR 模拟可以分为 SAR 图像模拟和 SAR 原始数据模拟。前者目的是产生 SAR 图像, 后者目的是产生 SAR 的原始数据, 用来最终压缩形成 SAR 图像^[1-4]。

本文给出了一种分布目标模拟的方法。分布目标模拟相比点目标模拟, 它主要关注不同人造场景, 建立相对复杂的电磁波后向散射模型。模拟产生电磁波后向散射系数的简单方法是直接产生幅度满足 Rayleigh 分布、相位满足均匀分布的后向散射系数^[5]。为了模拟出接近真实回波的星载 SAR 分布目标原始数据, 星载 SAR 平台运动轨迹采用椭圆轨道模型, 地球采用椭球体模型, 分布目标采用小平面对模型。为了提高准确性, Kirchhoff 近似被广泛应用到后向散射系数的计算中。根据小平面对与入射电磁波的几何关系, 可以计算出较为精确的小平面对

¹ 2003-04-15 收到, 2003-09-02 改回

元的后向散射系数^[3,6,7]。本文根据 Kirchhoff 近似理论^[6], 结合 Franceschetti 的地面场景仿真模型, 利用小平面对 SAR 的几何关系, 实现了基于小平面对后向散射系数的算法。

2 小平面对模型

为了模拟出接近真实情况的地面场景后向散射系数图, 用三维高度轮廓图 (Profile) 来描述地面场景的高度非常必要。在这种情况下, 可以同时考虑 SAR 所特有的错位 (Layover), 阴影 (Shadow) 现象和随机变化的后向散射系数。一个给定的数字高程图 (DEM) 可以有众多的小平面来表征^[7]。小平面对的尺寸大于信号波长, 但远远小于雷达分辨率单元^[3]。

小平面对模型 (facet model) 是一种模拟地面散射特性的物理模型。自然地面场景可以用大量与场景表面相切的、尺度很小的四边形平面单元来近似描述, 地面场景的电磁散射特性是所有小平面对的后向散射相干叠加的结果。小平面对的空间几何参数由其中心位置及其法向量确定。小平面对电磁散射特性取决于小平面对的表面粗糙度和介电常数^[2]。

3 Kirchhoff 近似和后向散射系数的计算

3.1 Kirchhoff 近似理论

图 1 为小平面对的回波模型, 平面方程可表示为 $ax + by + cz + d = 0$ 。当入射场为 $E_i = eE_0 \exp(-jk \cdot R)$ 时, 小平面对的后向散射电磁波波前可以用 Kirchhoff 方程的远场^[6]近似表示为

$$E_s(R) = \frac{jk \exp(-jkR)}{4\pi R} E_0 (I - k \cdot k) F(a, b, c) \int_A \exp(2jk \cdot \rho) dA$$

其中 k 和 k 分别为天线照射方向矢量及其标量, E_0 为入射场幅度, R 为天线到小平面对的法向量距离, I 为单位阵, (a, b, c) 为小平面对法向量 n 的各部分, $F(a, b, c)$ 为小平面对 Fresnel 反射系数, ρ 为小平面对任一点到中心点的矢量。

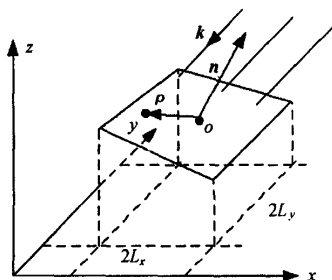


图 1 小平面对的回波模型

3.2 小平面对后向散射系数的计算

如果只考虑 HH 极化, 后向散射系数可以表示为

$$\delta = F(a, b, c) \cdot \int_A \exp(2jk \cdot \rho) dA = I \cdot II$$

$$I = F(a, b, c), \quad II = \int_A \exp(2jk \cdot \rho) dA$$

Franceschetti 给出了第一部分的计算公式^[3]:

$$I = S_{HH} = \frac{2(c \sin \Delta \theta - b \cos \Delta \theta)}{a^2 + (b \sin \Delta \theta + c \cos \Delta \theta)^2} \cdot [a^2 R_q - (b \sin \Delta \theta + c \cos \Delta \theta)^2 R_p]$$

其中 θ_0 为天线到照射区域中心的视角, θ 为天线到小平面单元中心的视角,

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0, \quad \cos\delta = \mathbf{n} \cdot \mathbf{k}, \quad R_p = \frac{\cos\delta - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\delta}}{\cos\delta + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\delta}}$$

$$R_q = \frac{\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\delta} - \varepsilon_r - \cos\delta}{\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\delta} + \varepsilon_r - \cos\delta}$$

如图 1 所示, 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. 以上第二部分可以表示为

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

4 分布目标回波信号模型

当分布目标采用小平面单元模型时我们可以取一些点目标, 它们的后向散射系数为小平面单元的后向散射系数, 它们的坐标为小平面单元的中心点的坐标. 当小平面单元由这样的点目标来表征时, 分布目标的回波可以看成是众多的点目标回波的叠加. 假设 r_c 为所有小平面单元距卫星的最短距离, 且雷达接收机是从 $t = 2r_c/c$ 的时刻开始进行距离向的采样. 当 s_{ik} 为小平面单元 A_{ik} 的回波信号, 则分布目标的信号可以表示为

$$s = \sum_i \sum_k s_{ik}$$

表示成二维离散形式为

$$\begin{aligned} s(m, n) &= \sum_i \sum_k \sum_{n=-\frac{T_S}{2T}}^{\frac{T_S}{2T}} \sum_{m=-\frac{1}{2}f_s}^{\frac{1}{2}f_s} \delta_{ik} \cdot W_{rik} \left[\frac{m}{f_s} \right] \cdot W_{aik}(nT) \cdot a \left[\frac{m}{f_s} - \frac{2(r_{ik}(nT) - r_c)}{c} \right] \\ &\quad \cdot \exp \left[j \cdot \Phi \left[\frac{m}{f_s} - \frac{2(r_{ik}(nT) - r_c)}{c} \right] \right] \exp \left[-j \frac{2\pi r_{ik}(nT)}{\lambda} \right] \end{aligned}$$

其中对于小平面单元 A_{ik} , δ_{ik} 为后向散射系数, $r_{ik}(nT)$ 为时刻 nT 时距卫星的距离, $W_{rik} \left[\frac{m}{f_s} \right]$ 为天线距离向增益, $W_{aik}(nT)$ 为 nT 时刻天线方位向增益, T_S 为合成孔径时间, f_s 为雷达接收机的采样频率, T 为发射脉冲的重复周期.

原始数据模拟中, 本文对分布目标的模拟反映了地面场景的随机分布特征. 分布目标原始数据的随机分布特性是由以下两个原因造成的. 首先由于小平面单元在水平坐标系下的高度满

足 Gauss 分布, 造成了各个小平面对单元的后向散射系数满足 Rayleigh 分布。其次小平面对单元在水平坐标系下的高度满足 Gauss 分布又决定了它们的中心点在雷达斜面坐标系下的坐标满足 Gauss 分布。这样小平面对单元到卫星的距离满足 Gauss 分布。

5 分布目标回波信号模型

星载 SAR 平台运动轨迹采用椭圆轨道模型, 地球采用椭球体模型, 分布目标采用小平面对单元模型。分布目标原始数据的模拟主要包括两大步: 第一, 小平面对单元的后向散射系数及阴影区域模拟; 第二, 分布目标原始数据的模拟。

5.1 小平面对单元的后向散射系数及阴影区域的模拟步骤

- (1) 产生水平坐标系内符合 Gauss 随机分布的 DEM 数据, 作为各小平面对单元顶点的高度。
- (2) 根据小平面对单元的模型, 计算出各小平面对单元中心的坐标。
- (3) 根据 SAR 与地面场景之间的空间几何关系, 建立雷达斜面坐标系, 并把各小平面对单元顶点及中心点坐标转换到斜面坐标系中。

(4) 计算斜面坐标系下的后向散射系数。根据 Kirchhoff 模型, 在距离向上, 所有数据根据 R 坐标排序, 以距离向的采样间隔最小单元进行数据的采样, 如果落在同一个单元内数个采样点则进行数字平均。在方位向上, 把距离向采好的数据以方位向的采样间隔最小单元进行数据采样, 如果落在同一个单元内数个采样点则进行数字平均。计算出各小平面对单元的后向散射复系数 (幅度、相位)。

(5) 确定阴影区域。在距离向, 根据天线视角和分布目标信息, 求出天线照射方向在 yz 坐标系里的斜率 k ; 对于每一个小平面对单元, 计算过它中心点斜率为 k 的直线, 判断右边各点处于该直线的位置, 如果处于该直线之下则在阴影中。此外对于小平面对单元, 若 $\cos \delta = n \cdot k < 0$ 时, 它没有被天线直接照射, 处在阴影区。如图 2 所示。

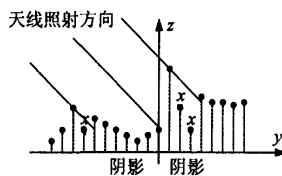


图 2 阴影区域的确定

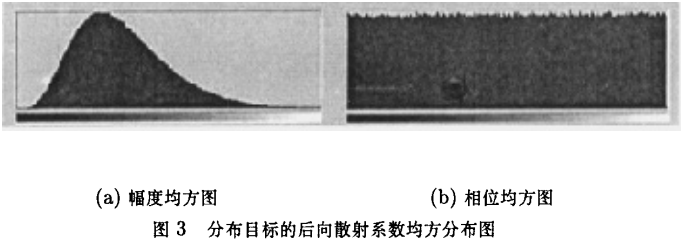
5.2 分布目标原始数据的模拟

- (1) 按照方位向上的时间顺序 $x_a = -N_a/2, \dots, N_a/2 - 1$, 确定各个方位向的时刻 t_i , i 变化范围为: $-N_a/2, \dots, N_a/2 - 1$ 。
- (2) 在某一时刻 t_i , 确定哪些小平面对单元是在天线照射范围之内, 计算出当前时刻的这些小平面对单元的坐标和卫星坐标并计算它们之间的距离。
- (3) 根据距离计算出各成像点的方位向多普勒相位并求出多普勒数据, 再根据方位向的位置乘上各成像点方位向天线加权值。
- (4) 根据距离远近, 划分各个距离门里的成像点数。对各个距离门得到的回波数据进行延时处理。根据距离门由近向远的顺序, 同一距离门各个成像点回波乘以各自的后向散射系数进行叠加。这样就得到了时刻 t_i 的距离向数据。
- (5) 按照方位向的顺序重复以上步骤, 就可以模拟得到完整的回波数据。

6 自然地面场景的原始数据模拟结果分析

6.1 固定表面粗糙度和介电常数的分布目标

模拟的三维地面场景的表面粗糙度为 0.15、介电常数为 3 时, 它的后向散射系数幅度均方图和相位的均方图如图 3 所示。



从上图可以看出后向散射系数幅度满足 Rayleigh 分布、相位满足均匀分布。

6.2 表面粗糙度和介电常数对后向散射系数的影响

图 4 所示, 在 xy 坐标系内把所有的小平面单元分成 16 块, 每一块有各自的表面粗糙度和介电常数. 16 块区域的变量值按顺序 1, 2, 3, 4, 8, 12, 16, 15, 14, 13, 9, 5, 6, 7, 11, 10 递增. 取区域 14 的值为中间值 ($m_tempabs$), 每次变化值为 m_tempz . 图 5 为各小平面对不同参数时的幅度图, 图 5(a) 中各小平面的介电常数皆为 3, 表面粗糙度的参数值: $m_tempz=0.01$, $m_tempabs=0.16$; 图 5(b) 中各小平面的表面粗糙度皆为 0.16, 介电常数的参数值: $m_tempz=0.2$, $m_tempabs=3$.

可以看出, 后向散射系数的值随着表面粗糙度的值增大而增大, 随着介电常数的值增大而减小。

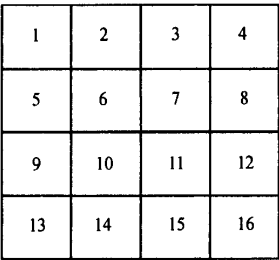


图 4 16 块区域的划分

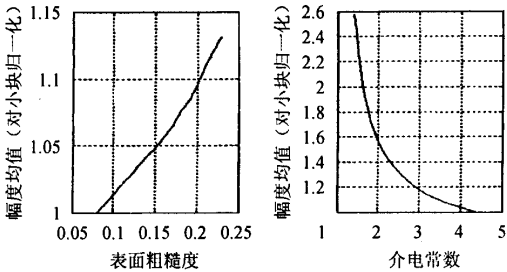


图 5 各小块为不同参数时的后向散射系数幅度

7 自然地面背景下的三维几何体数据模拟结果分析

图 6 为本文模拟的目标几何体的几何结构图. 自然地面场景为背景, 几何体下部分为圆台, 中间为长方体, 最上为圆柱. 其中模拟的自然地面表面高度满足 Gauss 分布, 而圆台的高度值等于同一 xy 坐标下随机地面场景的高度加上理想的圆台的高度, 这样圆台与自然地面满足相同的随机分布. 长方体、圆柱的高度是固定的值.

图 7 显示了水平坐标系与斜面坐标系下图 6 所示几何体后向散射系数幅度. 必须指出 SAR 在水平坐标系与斜面坐标系下的分辨率的关系为: 假设 R 轴与 y 轴的夹角为 θ , 雷达的距离向分辨率为 D_r , 则雷达在水平坐标系内的地面距离向分辨率为 $D_r/\cos\theta$. 可以看出自然地面场景和圆台的后向散射系数满足 Gauss 分布. 而长方体和圆柱的后向散射系数都是固定的值. 另外可以明显看出迎坡缩短现象 (也称透视收缩 Foreshortening), 这种几何畸变是由于在 xyz 坐标系中各点转换到 xRS 坐标系后相对位置的改变造成的. 由图也可以看出阴影区域的存在。

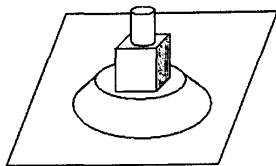


图 6 几何体的几何结构图

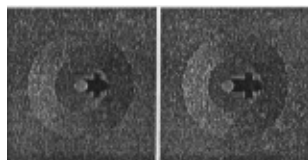
(a) xyz 坐标下 (b) xRS 坐标系下

图 7 地面场景背景下几何体的后向散射系数幅度图

采用经典的 RD 算法, 以中心点的参数作为参考函数, 可获得压缩后的图像, 如图 8 所示。可以看出, 压缩后的图像与 xRS 坐标系下的后向散射系数的幅度图非常接近。

8 结论

本文讨论了 Kirchhoff 近似及小平面对单元模型, 给出了计算小平面对单元后向散射系数的算法, 介绍了分布目标原始数据模拟的实现方法。通过对随机的三维地面场景和随机地面背景下的三维几何体的原始数据模拟, 结果表明: 本文提出的方法是有效的, 它模拟得到的原始数据正确反映了分布目标随机特性和 SAR 图像特有的几何畸变现象。



图 8 RD 算法地面场景下几何体的图像

参 考 文 献

- [1] Julian C, et al.. Radar image simulation[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing* [J], 1978, 16(4): 296-303.
- [2] 陈杰, 周荫清, 李春升. 星载 SAR 自然地面场景仿真方法研究. 电子学报, 2001, 29(9): 1202-1205.
- [3] 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.
- [4] 李凌杰, 王建国, 黄顺吉. 基于真实反射场景的 SAR 原始回波数据模拟. 电子科技大学学报, 1996, 25(6): 566-568.
- [5] Moccia A, Vetrella S, Ponte S. Passive and active calibrator characterization using a spaceborne SAR system simulator. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(3): 715-721.
- [6] F. T. 乌拉比, R. K. 穆尔著, 冯健超译. 微波遥感雷达遥感和面目标的散射、辐射理论. 北京: 科学出版社, 1987, 第二卷: 231-247.
- [7] Ch. Gierull, Ruppel M. An end-to-end synthetic aperture radar simulator. EUSAR'96, Königswinter, Germany, 1996: 569-572.

万 锋: 男, 1979 年生, 硕士, 主要从事 SAR 数据模拟及信号处理研究。

岳海霞: 女, 1975 年生, 博士, 主要从事 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。