

文章编号: 1007-4619(2006)05-0727-05

星载合成孔径雷达回波数据仿真研究

郭 丁^{1, 2, 3}, 顾行发^{1, 2, 3}, 余 涛^{1, 2}, 李 震¹, 李小英^{1, 2}(1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2 国家航天局 航天遥感论证中心, 北京 100101;
3 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 本文对星载合成孔径雷达 (SAR) 图像仿真方法进行了研究, 在分析并建立合成孔径雷达回波信号数学模型的基础上, 提出了基于分布目标的 SAR 回波信号数据仿真, 进而提出了一种与传统实现方法不同的 SAR 原始回波数据的生成方法, 并用这种方法进行了初步的建模和仿真, 验证了其有效性。

关键词: 合成孔径雷达 (SAR); 原始数据; 分布目标

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A

Study on Simulation of the Spaceborne Synthetic Aperture Radar Echo Data

GUO Ding^{1, 2, 3}, GU Xing-fa^{1, 2, 3}, YU Tao^{1, 2}, LI Zhen¹, LI Xiao-ying^{1, 2}(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;
2. The Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing 100101, China;
3. School of Automation Engineering, the University of Electronic Science and Technology of China, Sichuan Chengdu 610054, China)

Abstract This paper studies “the imagery simulation methods of the spaceborne synthetic aperture radar”. Based on the analysis “the echo data mathematic model” is built, the authors then propose “the method of echo data simulation based on the stochastic distributed target”, based on which the authors further set forth a method of creating raw data different from the conventional one, whose availability is validated by modeling and simulating.

Key words synthetic aperture radar (SAR); raw data; distributed target

1 引 言

合成孔径雷达 (SAR) 的基本思想是, 分别利用脉冲压缩技术和合成孔径技术, 来实现雷达图像在距离向和方位向上的高分辨率。作为获取地面信息的重要手段, 它具有可见光、红外等传感器所不具备的全天候工作能力及穿透一定覆盖物的能力, 在经济、科学研究和军事领域正在得到越来越广泛的应

用。进入 20 世纪 90 年代, 随着 SAR 成像基础研究的逐步完善, 有大量的星载、机载 SAR 系统研制成功与应用, 并且由于多频、多极化、干涉等技术的采用, SAR 研究表现为更加深入和实用化的发展趋势。SAR 成像原理复杂, 参量繁多, 成像和误差校正处理都具有相当的难度。在新的 SAR 方案的设计、数据处理等算法研究和系统验证等场合, 需要符合特定参量要求的 SAR 原始回波数据, 这种数据又无法取得已有的 SAR 雷达系统的真实数据, 只能通

收稿日期: 2006-04-10; 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

作者简介: 郭 丁 (1980—), 男, 硕士研究生, 2002 年毕业于电子科技大学自动化工程学院。目前主要从事合成孔径雷达仿真方面的研究。

过模拟算法来获得。

国外在卫星的研制过程中,普遍采用数字仿真技术来实现卫星系统总体方案的优化设计。美国的 JPL、意大利的 Alenia 公司、英国的 Marconi 公司等,都开发了 SAR 卫星系统仿真软件。自然地面场景 SAR 图像仿真是 SAR 卫星系统仿真的重要组成部分,能够为星载 SAR 系统误差的仿真分析、图像处理(几何校正、辐射校正)以及干涉 SAR 技术研究提供带有先验知识的图像数据,对 SAR 卫星的工程研制和应用研究都具有十分重要的意义。

目前国内对回波数据仿真的研究尚少,大致可分为两种,参考文献[1-4]为一种,其主要思想是通过模拟真实反射场景的地物结构,通过构造目标模型(主要是模拟雷达目标后向散射系数)来模拟雷达回波数据;参考文献[5,6]为一种,其主要思想是利用已有的近似波段雷达图像数据通过逆向运算来获得雷达回波数据。这些方法虽然能够取得比较好的仿真效果,但是测试准备工作量大、计算量大、处理比较繁琐。

本文给出了一种星载 SAR 分布目标原始数据模拟方法。通常星载 SAR 分布目标原始数据的模拟方法是:首先模拟雷达的系统转移函数及目标的后向散射系数,然后通过对二者做卷积处理得到分布目标的回波数据。但是这种方法是建立在比较简单的模型下的,所以用它模拟得到的星载 SAR 原始数据不是很精确。本文给出了一个比较精确的分布目标原始数据时域模拟方法。该方法基于这样一个假设:分布目标看成由这样的点目标组成,这些点目标的后向散射系数等于小平面的后向散射系数,它们的坐标等于小平面的中心点的坐标。因为小平面的随机分布特性,造成了分布目标的随机特性。生成分布目标原始数据的方法是:在每一个方位向时刻,计算得到所有这些点目标到卫星之间的距离,然后分别模拟各个点目标的回波,再对这些点目标的回波进行累加处理,这样便得到了当前时刻的雷达回波数据。重复对成像的所有时刻进行模拟,最终可以得到星载 SAR 分布目标原始数据。

2 SAR 回波信号模型

在具体回波仿真时,将面目标或几何体目标分解成一系列的点目标,任一时刻,雷达回波信号就是这些点目标回波信号的叠加。设在 t 时刻,目标与雷达的距离为 $R(t)$,在很短的时间内,可以认为目

标与雷达的相对运动是匀速的。雷达在一个驻留期内发射 N 个脉冲,则相对于第 k 个脉冲, $k=0, 1, \dots, N-1$, 雷达接收到的射频信号为:

$$r(t, k) = S_u(t, k) + J_u(t, k) + C_u(t, k) + W_u(t, k) \quad (1)$$

式中, $S_u(t, k)$ 为接收到的第 k 个脉冲经目标反射后的回波信号; $J_u(t, k)$ 为接收到的干扰信号(包括有源干扰和无源干扰); $C_u(t, k)$ 为杂波信号(为地杂波、气象杂波或海杂波的组合); $W_u(t, k)$ 为噪声。此处只考虑 $S_u(t, k)$ 项。这样,考虑到方位向和距离向的坐标 x, r t 时刻接收到的回波信号为^[4]:

$$s_r(x, r, t) = \iint \sigma(x-x', r-r') W_a(x') W_r(r-r') \cdot \left[t - \frac{2R(x', r')}{c} \right] dx dr \quad (2)$$

式中, $W_a(x')$, $W_r(r-r')$ 分别为方位向、距离向的天线方向性函数; c 为光速; $R(x', r')$ 为波束中心线上的雷达与目标的距离。为方便仿真,把影响幅度的函数归一化为 A 式(2)可以表示为:

$$s_r(x, r, t) = \iint A \cdot \sigma(x-x', r-r') \cdot \left[t - \frac{2R(x', r')}{c} \right] dx dr \quad (3)$$

2.1 点目标二维回波信号离散数学模型

为便于在计算机上仿真计算,把式(3)经过时间采样后可得到离散的点目标回波信号数学模型:

$$S_r(m, k) = \sigma \cdot A \cdot \text{rect} \left\{ \frac{kT + mT_s - 2R(kT + mT_s)}{T_p} \right\} \times \exp \left\{ j\omega_0 \left[kT + mT_s - \frac{2R(kT + mT_s)}{c} \right] \right\} + j\pi k \left\{ kT + mT_s - \frac{2R(kT + mT_s)}{c} \right\}^2 \quad (4)$$

式中, k 表示脉冲个数, m 为采样个数, T_s 为采样周期。

2.2 面目标二维回波信号的数学模型

雷达接收到的平面目标回波信号是 t 时刻雷达波束照射范围内点目标回波信号的叠加,其离散的目标回波信号数学模型为:

$$s_r(m, n) = \sum_{i=1}^N \sigma_i \cdot A_i \cdot \text{rect} \left\{ \frac{kT + mT_s - 2R_i(kT + mT_s)}{T_p} \right\} \times \exp \left\{ j\omega_0 \left[kT + mT_s - \frac{2R_i(kT + mT_s)}{c} \right] \right\} + j\pi k \left\{ kT + mT_s - \frac{2R_i(kT + mT_s)}{c} \right\}^2 \quad (5)$$

式中, m 为采样个数, T_s 为采样周期, i 为点目标个数。

2.3 平面 SAR 成像回波信号的三维模型

本文三维回波信号的产生要考虑到高度信息,对三维目标利用平面 SAR 进行目标辨别,因此把高度信息转化为相位信息来加以利用。在这里,把目标高度看作是成像平面坐标的函数,把它包含于波束中心线上的斜距 $R(x', r')$ 中,通过影响相位信息进一步改变回波信号的幅度。在任何时刻雷达回波信号就是点目标回波信号的叠加:

$$S_r'(x, r, h, t) = \iint \sigma(x - x', r - r') \cdot A \cdot \left[1 - \frac{2R'(x', r', h)}{c} \right] dx' dr' \quad (6)$$

式中, h 为点目标的高度, $h = g(x', r')$, $R'(x', r', h)$ 为波束中心线上点目标与雷达中心的距离。它的离散数学模型为:

$$S_r(n, m) = \sum_{i=1}^N \sigma_i \cdot A \cdot \text{rect} \left\{ \frac{kT + mT_s - \frac{2R'_i(kT + mT_s)}{c}}{T_p} \right\} \times \exp \left\{ j\omega_0 \left[kT + mT_s - \frac{2R'_i(kT + mT_s)}{c} \right] + j\pi k \left[kT + mT_s - \frac{2R'_i(kT + mT_s)}{c} \right]^2 \right\} \quad (7)$$

式中, i 为点目标个数。加上高度信息后,为防止同一个分辨单元内多个散射体的回波产生干涉现象,在实现上把同一分辨单元内多个散射体的散射强度合并成为一个散射体。

3 基于分布目标反射场景的 SAR 原始回波信号的叠加原理

假设构成反射场景的目标体有 $1, 2, \dots, m$ 个,响应的每个目标体又是由 n_1, n_2, \dots, n_m 个点目标构成,由式 (5) 或式 (7) 不难发现,回波信号的离散数学模型可以表示成下面的形式:

$$S_r = \sum_{i=1}^{n_1} S_{n_{1i}} + \sum_{i=1}^{n_2} S_{n_{2i}} + \dots + \sum_{i=1}^{n_m} S_{n_{mi}} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} S_{n_{ji}} \quad (8)$$

式中, $S_{n_{ji}}$ 是第 j 个目标体的第 i 个点目标的回波,如前所示。本文称之为基于分布目标反射场景的 SAR 原始回波信号的叠加原理。在使用时要注意保证每个目标体采用相同的最大最小回波时间,并且方位向采样点数和距离向采样点数保持一致。

4 目标后项散射系数及地面网格的模拟

雷达是通过接收目标的反射波来获取目标信息的。目标的大小和性质不同,对雷达波的散射特性就不同,雷达所能接收到的反射能量也不一样。为了便于讨论问题,统一表征目标的散射特性和估算雷达作用距离,人们把实际目标等效为一垂直电波入射方向的截面积,而这个截面积所截获的入射功率向各个方面均匀散射时,在雷达处产生的功率密度与实际目标所产生的功率密度相同,称为雷达平均截面积。在此,取目标散射截面积为 0.01m^2 。不同性质目标的散射系数由参考文献 [7] 获得。

如有两个靠得很近而分辨不开的散射体,就可以把这两个散射体的复散射系数相加,产生一个新的散射体 [2]。基于这种思想,在地面建立一个 $\rho_a \times \rho_x$ 的网格单元 (ρ_a, ρ_x 分别为方位向分辨率和距离向分辨率)。因为本文中方位向和距离向的分辨率相同,因此形成方形网格。

5 自然地面场景下 SAR 回波数据的模拟结果分析

在现实的 SAR 图像中,目标具有地理坐标和一定的雷达散射截面,它是由许多点目标所构成的。自然地面背景下经常有突起的山峰或者建筑物。所以按照本文所述方法,给出了自然地面场景下简单的三维几何体的模拟结果。

图 1 为本文模拟的目标几何体的几何结构图。图 2 为其后向散射系数相位图。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高斯分布,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 2 给出了自然地面场景下的三维几何体在水平坐标系下后向散射系数的相位图,从中可以看出,自然地面场景与圆台的相位分布一样,从图 3(b) 可以看出,它们服从均匀分布。而长方体、圆柱的相位都是固定值。另外黑的地方为阴影部分,它的相位值为 0。

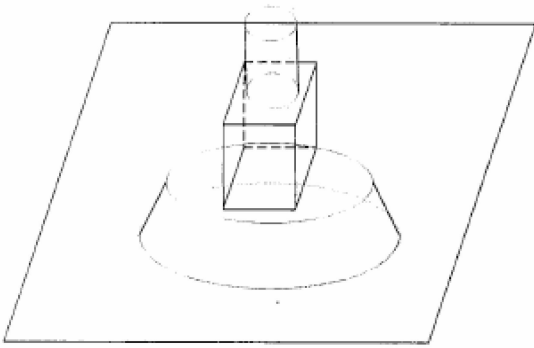


图 1 目标几何体的几何结构

Fig 1 The geometrical structure of the target

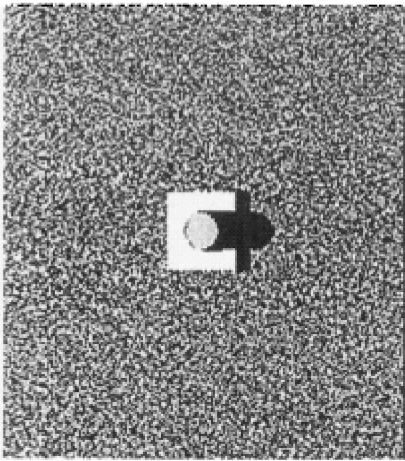
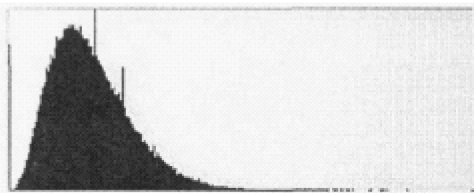
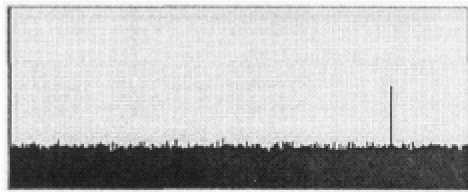


图 2 后向散射系数相位图

Fig 2 The phasic graph of back scatter coefficient



(a)



(b)

图 3 后向散射系数幅度、相位的均方图

Fig 3 The mean square graph of back scatter coefficient amplitude and phasic

定点之外,其他都与固定表面粗糙度和介电常数的分布目标的分布相同,幅度满足瑞利分布,相位满足均匀分布。而幅度、相位图里的三根线分别是长方体、圆柱及阴影区域的反映。

由图 2到图 3都可以看出阴影区域的存在。这是由于电磁波被高度较高的长方体、圆柱挡住造成的。考虑天线的照射方向与几何体之间的关系,这个阴影区域的模拟是正确的。

对自然地面场景背景下几何体原始数据进行成像压缩的处理采用了经典的 RD算法,方位向压缩中针对不同距离门的数据分段采用了不同的方位向参考函数。图 4为压缩成像后得到的图像。

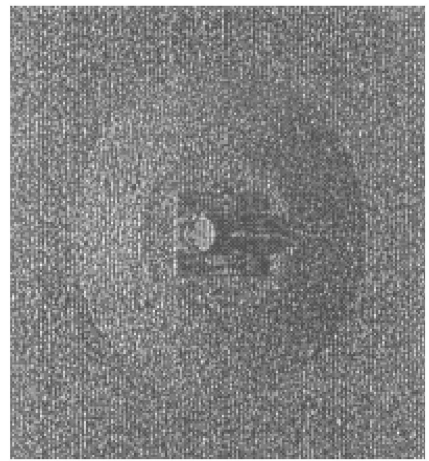


图 4 自然地面场景背景下几何体的成像图

Fig 4 The imagery graph of the geometrical target in the spontaneousness scene

图 5分别给出了自然地面场景下的三维几何体在水平坐标系和斜面坐标系下的后向散射系数幅度图。由图中可以看出,自然地面场景和圆台的后向散射系数的幅度部分满足随机分布,从图 3(a)可以看出,它们服从高斯分布。这是因为它们的高度的随机性造成了它们的后向散射系数的随机性。而长方体和圆柱的后向散射系数都是固定的值,它们的后向散射系数的幅度部分也都是固定的值。必须指出 SAR在 XYZ坐标系下的分辨率与 XRS坐标系下的关系为: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 $D_r / \cos\theta$ 。所以图 5(a)的距离分辨率是图 5(b) $\frac{1}{\cos\theta}$ 倍。

另外由图 5可以明显看出迎坡缩短现象,这种几何畸变是由于在 XYZ坐标系中各点转换到 XRS坐标

图 3为自然地面场景下的三维几何体的后向散射系数幅度和相位的均方图。它的分布除了几个固

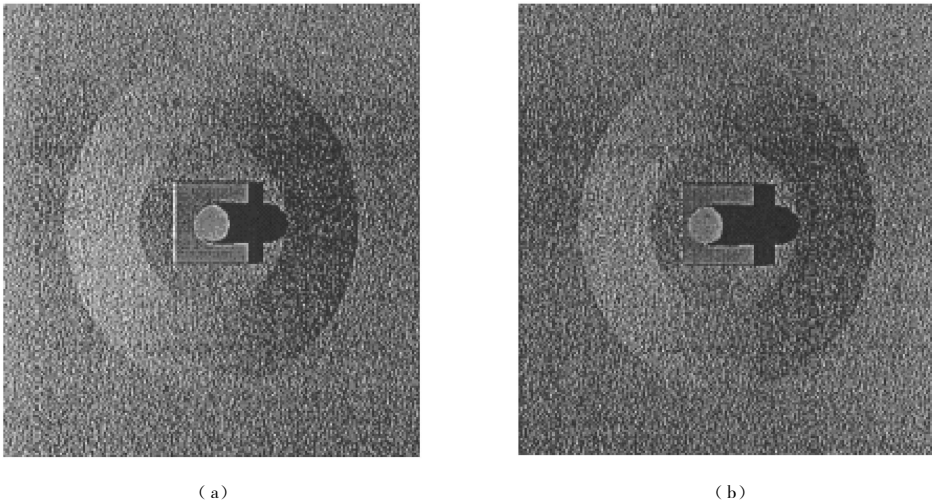


图 5 自然地面场景背景下几何体的后向散射系数幅度图

(a) 水平坐标系; (b) 斜面坐标系

Fig 5 The graph of back scatter coefficient amplitude in the spontaneousness scene

(a) Horizontal reference frame; (b) Slanting reference frame

系后相对位置的改变造成的。因为在 XYZ 坐标系中处于高处的点,相比相同 XY 坐标处于低处的点到雷达的距离要短,由于 XRS 坐标系的 R 坐标为点到雷达的距离,因此高处的点转换到 XRS 坐标系后会相对向右移动。由图 5 也可以看出阴影区域的存在。

由图 4 可以看出,压缩后的图像与图 5(b) 斜面坐标系下的后向散射系数的幅度图非常接近。这个结果表明:本文提出的方法是正确的,它模拟得到的原始数据正确反映出了分布目标的随机特性和 SAR 图像特有的几何畸变现象。

参考文献 (References)

- [1] Franceschetti G. SARAS: A SAR Raw Signal Simulator. IEEE Trans. GE, 1992.
- [2] Franceschetti G. SAR Raw Signal Simulation of Actual Ground Sites Described in Terms of Sparse Input Data. IEEE Trans. GE, 1992.
- [3] Tang Z W, Zhao Z Q, Huang S J. Study of SAR Raw Signal Simulation [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2000, 29 (1): 17-19. [汤志伟, 赵志钦, 黄顺吉. SAR 原始数据的模拟研究 [J]. 电子科技大学学报, 2000, 29 (1): 17-19.]
- [4] Liu Y T, et al. Sar Image. Harbin Institute Of Technology Press, 1999. [刘永坦等. 雷达成像技术. 哈尔滨工业大学出版社, 1999.]
- [5] Yu Y L. Spaceborn Synthetic Aperture Radar (SAR) Distributed Target Raw Data Simulation Based on Frequency Domain [D]. Paper for Master Degree. The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2004. [于艳丽. 星载合成孔径雷分布目标回波原始数据的频域模拟 [D]. 硕士学位论文, 北京: 中国科学院电子学研究所, 2004.]
- [6] Fernandes D, Waller G, et al. Registration of SAR Images Using the Chirp Scaling Algorithm. IGARSS, 1996: 800-801.
- [7] Howard A, Zebker, Daniel N, Hel, Richard M, Goldstein, et al. Synthetic Aperture Radar Target Simulator. NASA NPO-15024-1, N82-10286, 1982.
- [8] Ferdinand Klaus, Ute Blewonska, Ralf Knuefemann, et al. Simulation of Shuttle Trajectory and Attitude for a SAR. Geoscience and Remote Sensing Symposium [A]. IEEE Proceedings of IGARSS '93 [C], 1993, (4): 1771-1773.