

文章编号: 1007-4619 (2002) 01-0007-05

星载极化 SAR 数据模拟

林捷, 洪峻

(中国科学院 电子学研究所, 北京 100080)

摘要: 介绍了自行开发的星载极化 SAR 数据计算机模拟系统, 此系统采用的模拟方法遵循了星载极化 SAR 系统实际运行的情况, 按发射脉冲时间序列, 分别依次计算各发射脉冲相应的回波数据, 与常用的以点目标为基础逐点模拟方法相比, 计算效率高, 更贴近实际系统, 便于模拟各种误差的影响和保持其对所有目标回波影响的一致性和相关性。给出了星载极化 SAR 数据模拟的实例。

关键词: 合成孔径雷达 极化 SAR SAR 回波数据模拟

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A

1 引言

随着 SAR 技术的发展以及应用需求的不断提高, 用于极化测量的极化 SAR 是新一代先进 SAR 技术发展的重要方向。开展星载极化 SAR 数据模拟研究以及开发相应的模拟系统, 对于星载极化 SAR 系统研制、极化定标方法、成像处理算法和极化数据应用的研究有着重要的作用。

极化 SAR 具有 4 个通道, 用于测量地物目标极化散射矩阵^[1], 与单通道常规 SAR 相比系统复杂程度大大提高, 因此模拟的难度也相应提高。在极化 SAR 模拟时必须考虑诸如各通道间的耦合、幅度相位的非平衡性、姿态变化、发射功率变化、接收增益变化、噪声等各种误差源的影响。这些误差有些是满足一定统计分布的随机误差, 有些是满足一定变化规律的系统误差。因此在模拟中必须考虑误差影响的一致性和相关性, 所谓一致性指的是在某一时刻误差对于所有目标回波的影响是相同的, 相关性指不同时刻某些误差变化满足某种相互约束规律而具有相关性。

目前常用的星载 SAR 数据模拟方法主要是逐点模拟^[2-4](如图 1), 对每个点目标, 首先确定其相应合成孔径时间内所包括的 SAR 发射脉冲, 并分别计算该点目标对其中每一个脉冲的回波, 然后综合

所有发射脉冲回波构成此点目标的回波原始数据。在多个目标或分布目标(等效于多个点目标)情况下, 对各点目标逐个进行模拟, 再将各点目标的回波原始数据相加。在对较大区域进行模拟时, 必须考虑上述误差影响的一致性和相关性, 由于该方法采用逐点模拟, 误差影响也是逐点计算, 同一时刻系统误差影响对不同目标点不一致, 例如一些随机误差模拟计算时, 不同的点产生不同的随机误差值, 因此要保持系统误差对于所有目标的一致性和相关性比较困难。同时对于同一脉冲发射时刻的卫星轨道位置、姿态、天线的指向, 发射信号等, 在逐点计算时被大量重复计算(每个被此发射脉冲照射到的目标点均算一次)。要克服上述缺陷, 则必须保存每个发射脉冲时刻的各种数据(包括误差数据), 但由于 PRF 很高, 脉冲很多, 要保存的数据量大, 势必占用大量内存, 影响效率。另外此方法要求存储每一点目标的回波数据, 然后相加得最后结果, 可通常每个点目标的合成孔径时间内对应有很多脉冲回波, 每个回波又有大量接收机 AD 采样数据, 所以在较大区域模拟时必然带来存储量大, 各点回波相加算法复杂等问题。

本文采用的模拟方法从结构上进行了改进, 如图 2。它遵循星载极化 SAR 系统实际运行的情况, 以发射脉冲时间序列为基础, 发射一个脉冲, 计算一个回波数据(被照射区域内所有目标回波之和)。由

收稿日期: 2001-01-11; 修订日期: 2001-04-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“新型成像雷达对地观测机理及地物识别技术(49989001)资助。

作者简介: 林捷(1973-), 男, 1996年毕业于浙江大学信息电子系, 获学士学位。现为中国科学院电子学研究所现代信息技术研究室硕士研究生。1999年起至今从事 SAR 系统模拟和定标技术研究。

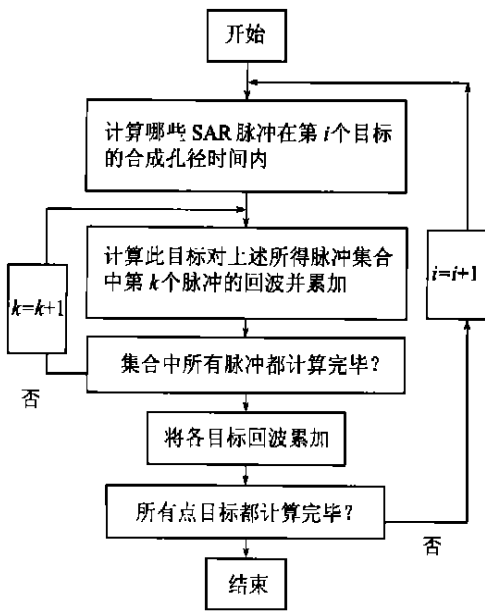


图 1 基于点目标模拟方法流程

Fig. 1 The simulation process based on each point target scatter signal

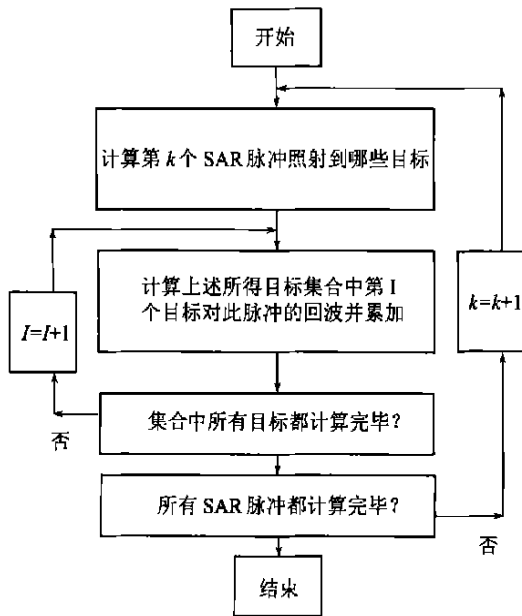


图 2 基于发射脉冲序列模拟方法流程

Fig. 2 The simulation process based on transmit pulses array

便地相加得到最终结果。同时由于以发射脉冲时间序列为基础,计算脉冲发射时刻的各参数时,可方便地引入各种类型的误差,对各点回波的计算中,误差就保持了对所有目标的一致性和相关性。

2 星载极化 SAR 数据模拟系统

极化 SAR 有 H 极化和 V 极化通道(发射和接收通道复用),其输出为 4 种极化(HH, HV, VH 和 VV)的复图像数据。极化 SAR 用于测量目标的散射矩阵 S 。极化 SAR 发射和接收通道存在着许多误差源,如各通道本身的幅度和相位失真引起通道不平衡性,通道之间还存在互偶现象,发射和接收极化信号不纯。极化 SAR 的测量失真模型可表示为:

$$M = Ke^{i\phi} \begin{bmatrix} R_{HH} & R_{HV} \\ R_{VH} & R_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{HH} & T_{HV} \\ T_{VH} & T_{VV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{HH} & N_{HV} \\ N_{VH} & N_{VV} \end{bmatrix} = Ke^{i\phi} RST + N \quad (1)$$

其中 M 为测量矩阵, S 为目标散射矩阵, N 为等效噪声矩阵, R 和 T 分别定义为接收失真矩阵和发射失真矩阵, ϕ 是相位传播因子, K 是幅度因子。(1) 式推导以及各矩阵元素具体定义详见文献[1]。

2.1 模拟系统构成

图 3 为星载极化 SAR 数据模拟系统总体构成框图,主要由卫星轨道姿态模型、天线模型、地面目标模型、系统参数设置、各种误差模型、原始数据生成和成像处理 7 个部分组成。

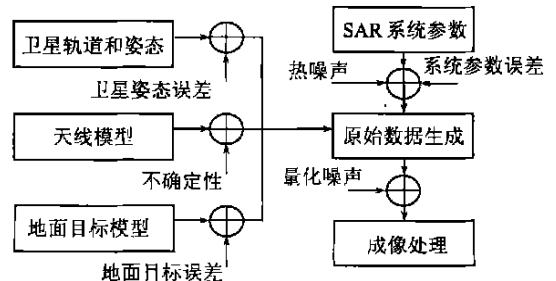


图 3 星载极化 SAR 数据模拟系统总体构成框图

Fig. 3 The process of spaceborne polarimetric SAR data simulation system

于这种结构上的改进,使得对每个脉冲发射时刻的卫星轨道位置、姿态、天线的指向等只需计算一次,然后利用这些数据逐点计算被此脉冲照射到的目标点的回波,再相加得到此脉冲的回波,这样就克服了上述大量重复计算的缺陷,也使各点回波数据很方

(1) 卫星轨道姿态模型。首先根据卫星轨道六要素计算卫星在给定时刻的位置和速度^[5],然后考虑卫星姿态^[6],进行坐标变换,计算出天线的位置和指向,并用于几何关系的计算。

(2) 天线模型。此模块用于模拟天线方向图。本模拟系统提供了几种常用的天线方向图模型和用户自定义天线方向图模型, 由用户根据需要进行选择。

(3) 地面目标。输入地面实况(或虚拟)数据, 主要包括目标分类、地形数据和目标的散射特性。地面目标主要分为点目标和分布目标两大类。对于点目标用散射矩阵 S 描述其特性; 对于分布目标采用的模型是: 将分布目标网格化, 网格大小小于图像分辨单元, 首先确定各网格分布目标的复散射系数, 然后将网格细分为若干个(>9)子网格, 同一网格中的子网格的散射系数幅值服从瑞利分布, 相位值服从 $(0, 2\pi)$ 均匀分布(均值为网格的散射系数)。然后将这些子网格作为点目标处理^[2]。

(4) SAR 系统参数。为使系统具有方便性, 此模块可对缺省的系统参数进行修改。

(5) 误差模型。在模拟的各个环节中相应地引入各种类型的误差。

(6) 原始数据生成。综合以上各模块, 模拟计算生成 SAR 原始数据。

(7) 成像处理。成像处理采用了常用的 R-D 算法, 分别处理 4 种极化的回波原始数据, 生成极化 SAR 模拟数据。

2.2 模拟算法流程

图 4 为模拟算法流程, 采用此流程由于很好地贴近了实际系统, 所以给实际系统误差的模拟带来了很大方便, 可引入随时间变化的各种误差模型。

3 模拟结果与分析

3.1 模拟条件与结果

本文中的模拟系统采用 Visual C++6.0 编程环境实现, 可运行于 Windows NT, Win9x 平台上, 由用户自行输入卫星轨道、SAR 系统、误差模型等参数。输入的主要参数如表 1—3。

表 1 SAR 系统参数

Table 1 SAR system parameters

发射信号频率	信号脉冲宽度	重复频率 PRF	调频斜率	接收机采样率
5.3 GHz	42 μ s	1257 Hz	$-7.215476e \times 10^{11}$	32.32 MHz

表 2 轨道参数

Table 2 Orbit parameters

轨道半长轴	轨道偏心率	轨道倾角	近地点幅角	升交点赤经	近地点时刻
7167106 m	0.001149	1.720563 rad	1.293289 rad	1.577254 rad	0

接收失真矩阵和发射失真矩阵分别为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.77 \angle 58.4^\circ & 0.08 \angle 123.6^\circ \\ 0.06 \angle 96.2^\circ & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0.17 \angle -34.7^\circ \\ 0.08 \angle 41.1^\circ & 0.83 \angle -102.3^\circ \end{bmatrix}$$

图 5—图 8 为成像后的模拟结果(依次分别为 HH, HV, VH, VV 极化)。

3.2 模拟结果分析

3.2.1 点目标分析

从 4 幅极化图像上来看, 4 个点目标比较清晰(从左至右依次为点目标 1—4), 第 2 个点目标由于其散射矩阵中所有散射系数模都为 1, 故在各个极化图像中都很亮, 第 3 个点目标和第 4 个点目标从理论上应分别只有 HV 和 VH 极化回波, 而实际情况分别在其它 3 种极化图像上都有微弱的影像, 这是由于极化通道间的偶合误差引起的。

在模拟中设定目标点 450×450 , 其中点目标 4

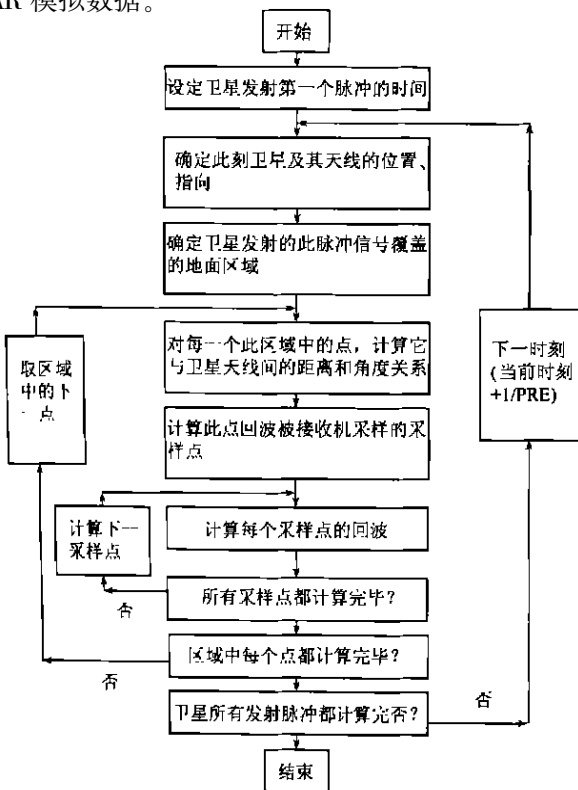


图 4 模拟算法流程

Fig. 4 The program of simulation

个,其余为 5 类分布目标(表 3)。

表 3 地面目标

Table 3 Targets parameters

	点目标 1	点目标 2	点目标 3	点目标 4	分布目标
S	$\begin{bmatrix} 1 & 0.21\angle 118.0^\circ \\ 0.14\angle -174^\circ & 0.94\angle 161.3^\circ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & i \\ i & -1 \end{bmatrix}$
σ/dB	60	60	60	60	

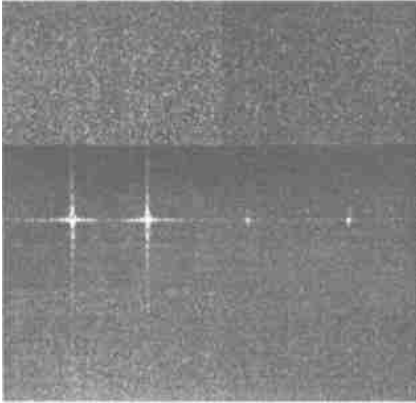


图 5 成像后的模拟结果(HH 极化)

Fig. 5 The final result (HH)

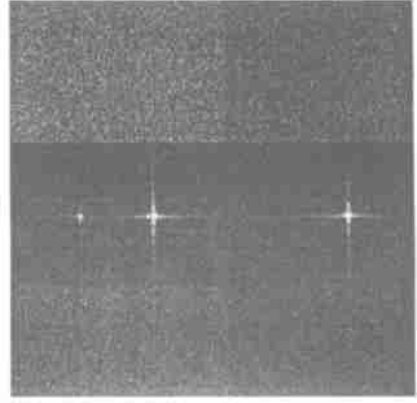


图 7 成像后的模拟结果(VH 极化)

Fig. 7 The final result (VH)

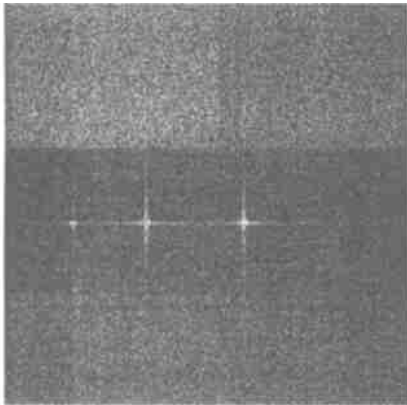


图 6 成像后的模拟结果(HV 极化)

Fig. 6 The final result (HV)

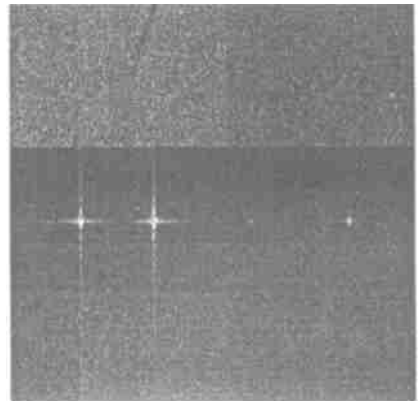


图 8 成像后的模拟结果(VV 极化)

Fig. 8 The final result (VV)

图 9 是点目标 2 的 HH 图像响应剖面图,其峰值旁瓣比为 13.27 dB, 3dB 带宽为 1.5 像素。由图 9 看出,由于加入了天线指向误差、轨道误差,导致成像时聚焦不十分理想。通过图像目视检验和点目标分析,模拟图像与预期结果相符。

3.2.2 分布目标分析

模拟中采用了散射系数为 12.0 dB, 15.0 dB, 18.0 dB, 21.0 dB, 24.0 dB 的分布目标,模拟时采用了 facet 模型,由图 5—8 可以清晰分辨这 5 块区域。其强度统计分布服从瑞利分布,如图 10,说明模拟结果正确。

3.2.3 模拟效率分析和结果比较

此模拟过程运行于配置为 CPU 为 P III 533 的微机,内存 256 M, Win98 操作系统,运行时间为 42 h。为了比较,在同样参数和条件下用逐点模拟的常用方法模拟同样区域(已按引言中所述进行了修改,保证了误差的一致性和相关性),需要 80 h 以上。最终两种模拟结果是一致的,主要是计算效率问题,限于篇幅,不具体列出图像结果了。由结果的比较可见,本文所采用的方法生成的模拟结果正确、质量高,且大大提高了计算效率。如果模拟区域增大,本文采用的方法将更加优越。

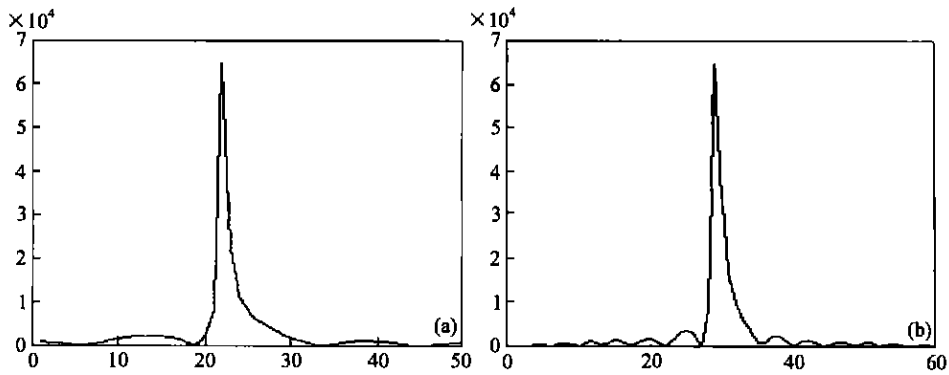


图9 点目标2的HH响应的剖面图((a)为方位向,(b)为距离向)

Fig. 9 The HH response pluse of point target 2

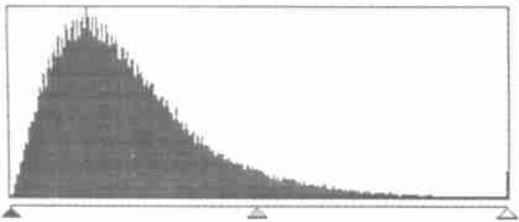


图10 分布目标强度统计分布图

Fig. 10 The statistic distribution of distributed target backward seatter power

4 结论

本文开发的星载极化SAR数据模拟系统采用了一种更贴近实际运行系统的模拟方法,此方法计算效率高,适用于大区域的模拟,且便于模拟各种误差的影响和保持其对所有目标回波影响的一致性和相关性。在实际模拟应用中,取得了满意的效果。

参 考 文 献 (References)

- [1] Borgeaud M, Shin R T, Kong J A. Theoretical Models for Polarimetric Radar Clutter [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 1987, 1(1) 73-78.
- [2] Li B H. Spaceborne Polarized SAR Simulation [D]. The Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing, 1999. [李保洪, 星载极化SAR数据模拟[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 1999]
- [3] Klaus F. SiSAR: Advanced SAR Simulation [C]. European Symposium on Satellite Remote Sensing II, Paris, Frankreich, 1995.
- [4] Giorgio Franceschetti, Maurizio Migliaccio, Dnaiele Riccio. SAR Raw Signal Simulation of Actual Ground Sites Described in Terms of Sparse Input Data[J]. *IEEE Trans. on GRS*, 1994, 32, (6).
- [5] Zhang R W. Kinetics of satellite orbit, attitude and satellite control [M] Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Publishing Company, 1998. [章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.]

Spaceborne Polarimetric SAR Data Simulation

LIN Jie, HONG Jun

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

Abstract: This paper introduces a new Spaceborne Polarimetric SAR Data Simulation system. The simulation method used in this paper is based on the view of real system; and according to the sequence of the transmit pulses, each return wave formed by the reflection of all the targets which are irradiated by the transmit beam is calculated one by one, all these return wave data form the result. Compared with the usually used method based on single point target simulation, this method is much more efficient especially in case of simulating a large area. It is also conveniently to simulate all kinds of error and keep the correlation and consistency of the errors. At last, a simulation example is also given.

Key words: SAR; polarimetric SAR; SAR data simulation