

## SAR图像模拟方法研究

张朋, 黄金, 郭陈江, 许家栋

(西北工业大学电子信息学院, 陕西西安 710072)

摘要: 分析讨论了一种合成孔径雷达成像模拟方法。阐述了合成孔径雷达图像模拟的基本原理, 建立复杂自然场景目标模型的方法以及合成孔径雷达图像的基本特征, 并且分析了成像回波信号的组成。最后完成了对自然场景目标的成像仿真实验, 实验结果与理论分析相符。

关键词: 合成孔径雷达; 成像; 模型; 模拟

中图分类号: TN957.52 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2006)03-0026-04

合成孔径雷达 SAR(Synthetic Aperture Radar)作为一种主动式微波遥感工具,具备全天时、全天候工作能力。伴随着 SAR 技术研究的深入和应用领域的拓展,SAR 图像模拟技术的研究也在不断发展。SAR 图像模拟技术有助于 SAR 系统的分析设计和验证、辅助 SAR 图像解译、SAR 图像处理算法验证以及 SAR 图像几何校正等,因而具有重要的理论意义和实用价值。本文以真实自然场景机载 SAR 图像模拟技术为中心,就 SAR 图像模拟原理、模拟数据源的准备、模拟系统结构和流程以及 SAR 图像模拟应用等内容展开详细分析和论述。

## 1 SAR 图像模拟流程

一般情况下 SAR 图像的模拟可以分为基于回波成像的原始信号模拟和面向 SAR 图像应用的功能模拟两种。回波成像的原始信号模拟从雷达成像的原理出发根据回波模型求取地物目标每个雷达可分辨单元的回波信号,而后经过 SAR 成像算法获得模拟目标或区域的 SAR 图像。这种模拟方法,能够真实地还原出 SAR 成像的过程,便于我们进一步深入挖掘和利用图像数据进行 SAR 全系统的设计和验证,这也是本文中要讨论的问题。第二种方法从 SAR 的图像特征出发,模拟结果由 SAR 的成像参数、成像模型以及模拟区域的地形和地物特征所决定。模拟过程主要包括地面数字特征的产生,地面散射特征和 SAR 图像特征的产生以及机载、SAR 系统特征参数的产生 3 部分,下面我们就分别讨论。

### 1.1 地面的数字特征处理

地面的数字特征描述就是搭建整个模拟场景的骨架,制造出要模拟区域的结构模型,它是 SAR 图像模拟的第一步。在模拟过程中我们用数字高程模型 DEM(Digital Elevation Model)来描述地面的数字特征<sup>[1-4]</sup>。数字高程模型 DEM 的概念最早于 1958 年提出。它是针对地形地貌的一种数字建模,是描述地球表面形态多种信息空间分布的有序数值阵列。从数学的角度出发,可以用下述二维函数系列取值的有序集合来概括地表示数字地面模型的丰富内容和多样形式:

$$K_p = f_k(u_p, v_p) \quad (k=1, 2, \dots, m; p=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: $K_p$  为第  $p$  号地面点(可以是单一点,但一般是某点及其微小邻域所划定的一个地表单元)上的第  $k$  类地面特性信息的取值; $u_p, v_p$  为第  $p$  号地面点的二维坐标,可以是采用任意地图投影的平面坐标,或者是经纬度、矩阵的行列号等; $m$  ( $m$  大于等于 1)为地面特性信息类型的数目; $n$  为地面点的个数。当上述函数的定义域为二维地理空间上的面域、线段或网络时, $n$  趋于正无穷大。

收稿日期:2005-07-06

基金项目:航空科学基金资助项目(05F53032)

作者简介:张朋(1977-),男,河北大兴人,博士生,主要从事雷达回波信号仿真研究;

许家栋(1948-),男,安徽合肥人,教授,博士生导师,主要从事微波电路、天线设计、电磁计算研究。



地面场景的原始 DEM 数据通常是按照一定的空间采样间隔进行勘测获得的,其空间采样间隔同 SAR 图像的分辨率相比要大很多,达不到要模拟的 SAR 图像的精度要求,因此需要对场景的 DEM 数据进行插值处理,以满足仿真 SAR 图像的要求。自然地表是一个随机过程,它满足分形布朗运动 FBM (Fractal Brown Motion) 特征<sup>[5]</sup>,因此,对原始 DEM 数据插值后的结果也要满足 FBM 特征。在这里我们对 DEM 数据采用的插值方法称为随机中点位移法,它具有算法简单、易于实现以及计算速度快等优点,其插值过程如图 1 所示。

设第  $n$  次插值后的 DEM 网格图如图 1(a) 所示,此时 DEM 网格间距为  $\Delta d$ ;每一次插值都先对 DEM 网格中每个正方形求其中点(图 1(b)中 \* 所在位置)的插值高程,该值由网格 4 个顶点高程的平均值再加上一个随机量计算得到。而后求取每个正方形 4 条边的中点处(图 1(c)中空心的  $\square$  所在位置)的插值高程,该高程值由中点邻近的 4 个点(这 4 个点如图 1(c)所示形成一个菱形包围着待插值点,)高程的平均值再加上一个随机量计算得到。各插值点的高程计算公式如下:

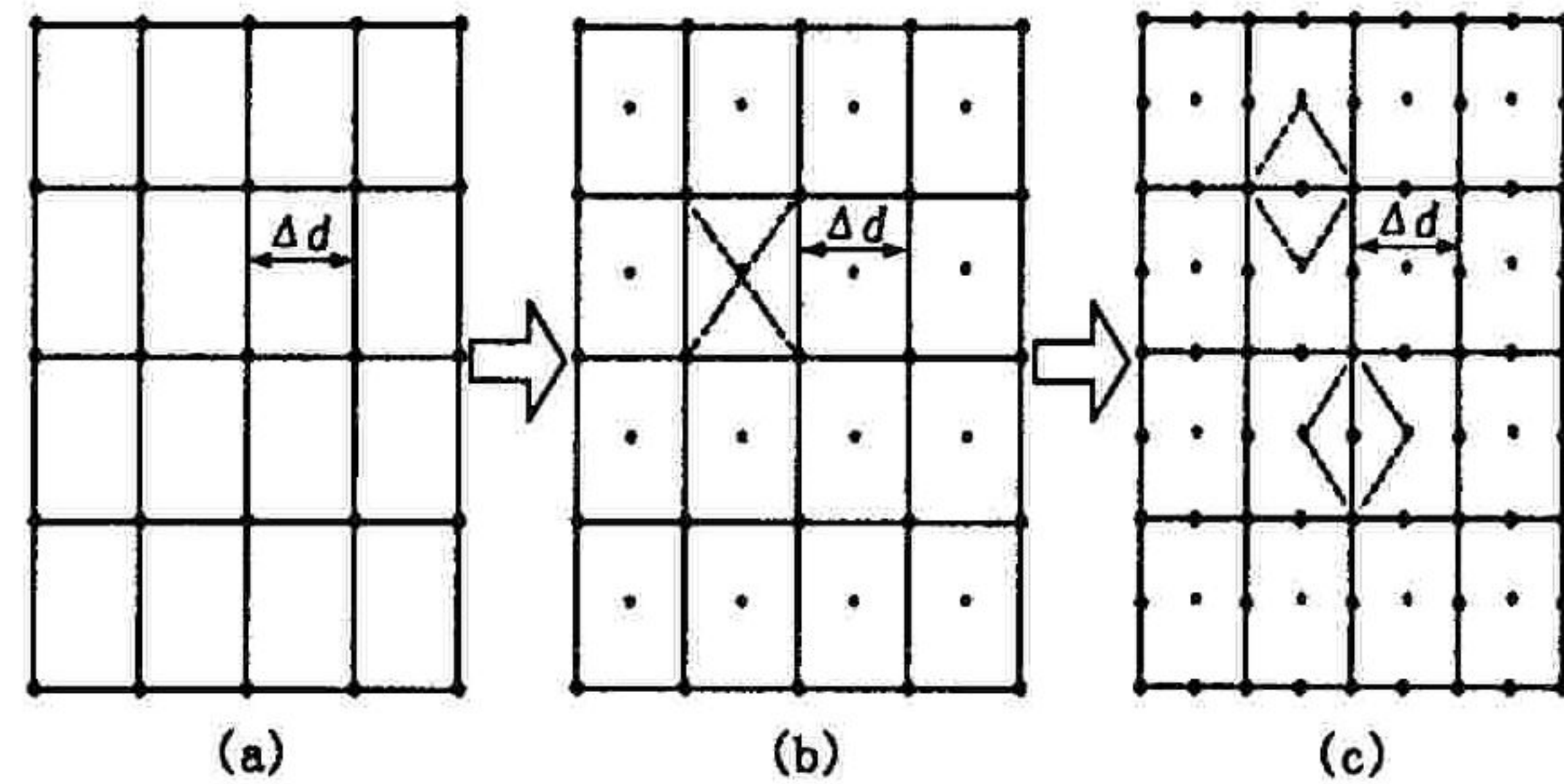


图 1 DEM 插值图

\* 号位置高程:

$$Z_{ij}^{n+1} = \frac{(Z_{i-1,j-1}^n + Z_{i+1,j-1}^n + Z_{i+1,j+1}^n + Z_{i-1,j+1}^n)}{4} + s_n \quad (2); \quad s_n = 2^{-H/2} \sqrt{(1-2^{2H-2})} (\Delta d)^H \sigma \text{Gauss}(\cdot) \quad (3)$$

□ 号位置高程:

$$Z_{ij}^{n+1} = \frac{(Z_{i,j-1}^n + Z_{i,j+1}^n + Z_{i-1,j}^n + Z_{i+1,j}^n)}{4} + s_n \quad (4); \quad s_n = \sqrt{(1-2^{2H-2})} (\Delta d)^H \sigma \text{Gauss}(\cdot) \quad (5)$$

## 1.2 地面散射特征模拟

### 1.2.1 小面单元模型<sup>[1,2,6-7]</sup>

在计算整个地面场景的回波电磁散射特性时将用到小面单元模型。每个小面单元均与实际平面相正切,地面场景的电磁散射特性是所有小面单元的后向散射场相干叠加的结果。小面单元的尺寸应小于分辨率,但大于入射波长,每个小面必须足够小,以便更好地近似地表的起伏。小面单元的空间几何参数由其中心位置矢量和法矢量确定,它的电磁散射特性是表面粗糙度和物质电磁参数(介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\sigma$ ) 的函数。根据最小二乘原理,我们可以由 DEM 分形插值所得到的多个相邻数据点拟合一个与场景表面相切的小面单元,进而可求出小面单元表面法向量和相对于雷达入射波的局部入射角。

如果我们也知道小面单元的中心点坐标  $G(x_1, y_1, z_1)$  和载机位置坐标  $X(x_2, y_2, z_2)$  就可得到每个小面单元的局部入射角  $\theta_i$  (小面单元的局部入射关系图如图 2 所示),  $\theta_i$  值可由式(10)得到:

$$\theta_i = \arccos \frac{\vec{n} \cdot \vec{GX}}{|\vec{n}| |\vec{GX}|} \quad (6)$$

在模拟过程中,雷达的发射波长及极化性质是确定的,可以认为各小面单元后向散射系数取决于地物的种类和局部入射角,其散射特征可根据雷达散射截面的经验公式模型获得,模型公式如下<sup>[4-5]</sup>:

$$\sigma^0 = A(\theta + C)^B \exp \left[ -D / \left( 1 + \frac{0.1\sigma_h}{\lambda} \right) \right] \quad (7)$$

式中:  $\theta$  为小面单元的局部入射角(rad);  $\sigma_h$  为地形表面高度起伏的标准差(cm),它由地形平均高度的平方值与其二阶距差的二次根值决定;  $\lambda$  为雷达波长;  $A, B, C$  及  $D$  是根据经验获得的常数。

### 1.2.2 SAR 图像特征模拟

我们知道 SAR 是以距离进行分辨的,在自然场景的高低起伏变化中,尤其是地面的倾角与 SAR 天线的

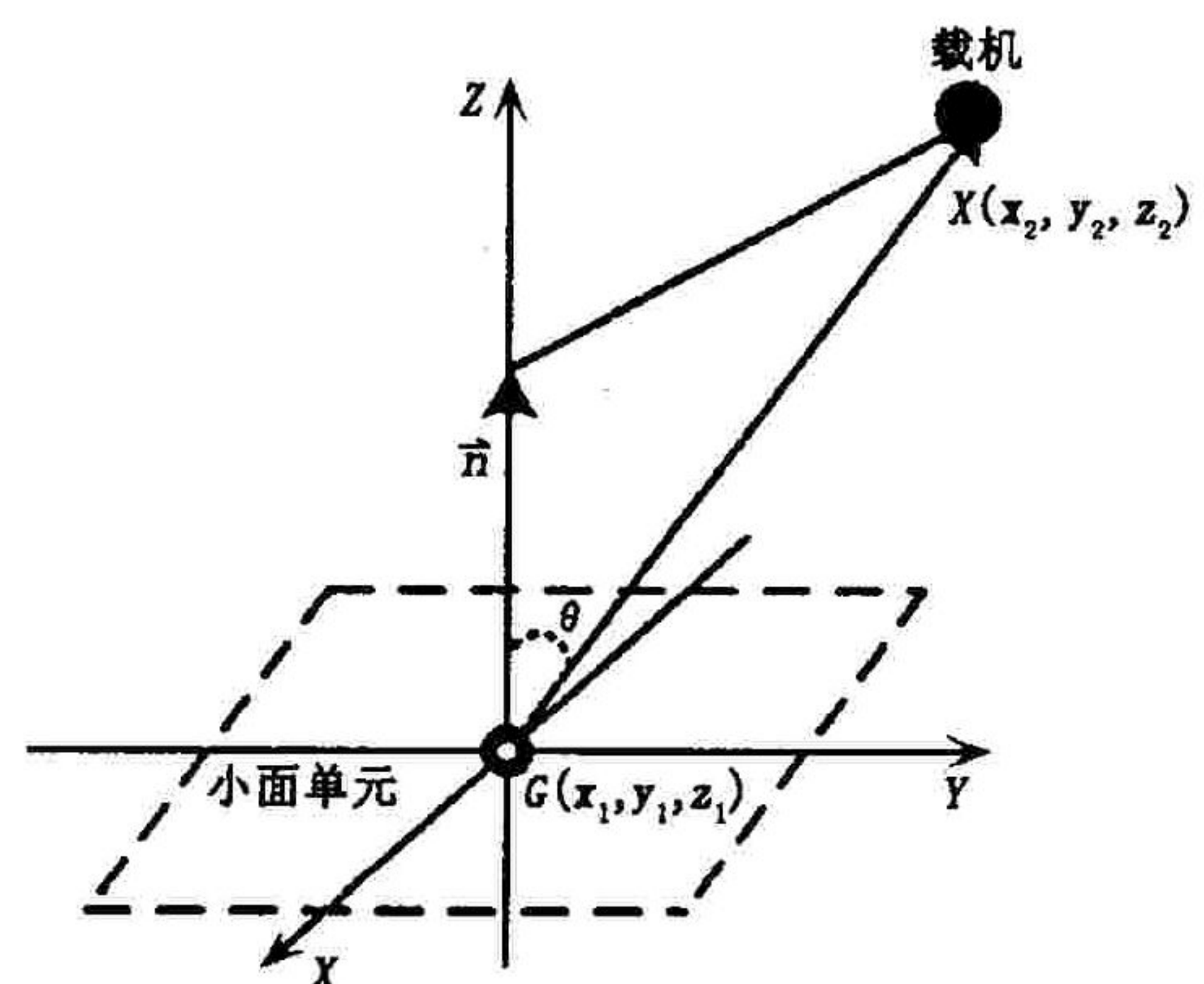


图 2 小面单元的局部入射关系图



波束俯角可以比拟时,产生的图像结果与实际现象相比将出现“失真”,具体说来主要包括迎坡缩短,掩叠,阴影等现象。

前面我们得到了地面场景插值后的 DEM 数据,由 DEM 数据值我们又建立了地面场景的小面单元模型。因此所有小面单元的位置高程关系我们就是知道的,如果在一段地面场景中  $\sigma$  为迎坡倾角,  $\beta$  为背坡倾角,  $\theta$  为波束俯角,如图 3 所示。SAR 图像中的各种特征产生的条件可归纳为<sup>[8]</sup>:

$$0 < \alpha < \theta, -\theta < \beta < 0 \text{ (迎坡缩短)} \tag{8}$$

$$\alpha \geq \theta \text{ (掩叠现象)} \tag{9}$$

$$\beta \leq \theta \text{ (阴影情况)} \tag{10}$$

因此,对于迎坡缩短和掩叠现象的模拟,可以通过每个小面单元的位置关系计算出其在图像中的缩短尺寸和掩叠程度。而对于阴影情况的模拟可以采用射线追踪法和几何光学法,引入遮蔽函数,遮蔽函数的定义如下:

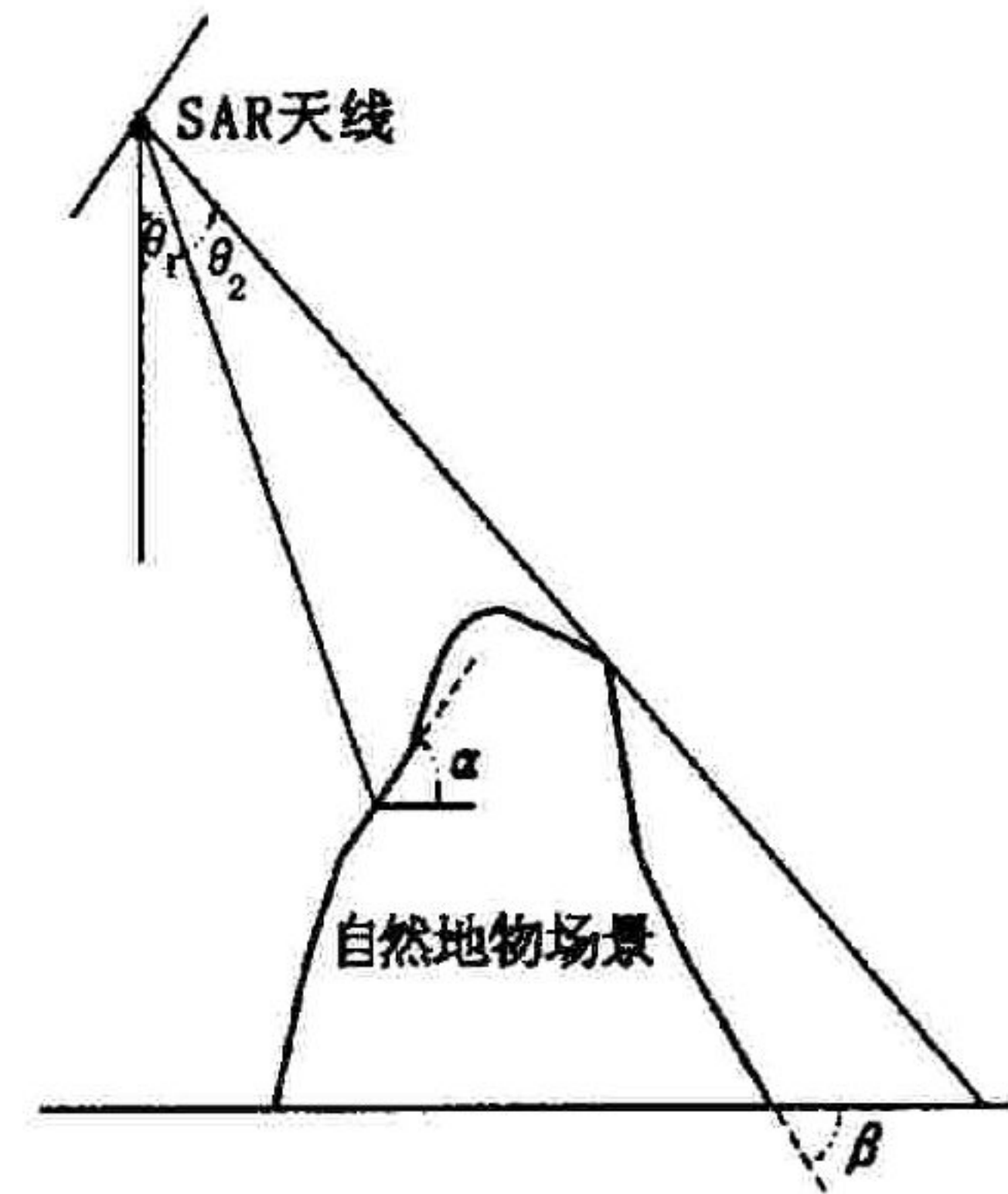


图 3 雷达波束照射关系图

$$sd(\theta_{i,j}, r_{i,j}) = \begin{cases} 1 & \text{照明区} \\ 0 & \text{阴影区} \end{cases} \tag{11}$$

如果只考虑距离向和方位向标号为  $i, j$  的小面单元的回波情况,根据雷达方程可得到回波信号为

$$S(\theta_{i,j}, r_{i,j}) = \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r_{i,j}^3} \sigma^\circ(\theta_{i,j}) dx dy P\left(t - \frac{2r_{i,j}}{c}\right) sd(\theta_{i,j}, r_{i,j}) \tag{12}$$

式中:  $G$  为收发天线增益;  $c$  为光速;  $\theta_{i,j}$  为第  $i, j$  个小面单元的局部入射角;  $r_{i,j}$  为该小面单元与载机之间的瞬时距离;  $P(\cdot)$  为线性调频脉冲串。

假设模拟目标由  $N$  个小面单元组成,那么对于该仿真模型总体回波信号强度是所有小面单元回波信号强度之和,可以记为

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r_{i,j}^3} \sigma^\circ(\theta_{i,j}) dx dy P\left(t - \frac{2r_{i,j}}{c}\right) sd(\theta_{i,j}, r_{i,j}) \tag{13}$$

### 1.3 SAR 系统特征参数的产生

选择模拟系统参数时要考虑到既能满足仿真要求,又要符合实际系统的情况,综合考虑各参数的取值,在本次仿真中所采用的仿真参数为:载频 5.30 GHz;波长 5.66 cm;脉冲长度  $\mu s$ ;信号带宽 24 MHz;采样频率 60 MHz;雷达视角  $45^\circ$ ;线性调频率 3.125 Hz/s;距离分辨率 3;方位分辨率 3;脉冲重复频率 500 Hz/( $m \cdot s^{-1}$ );载机高度 6 km;飞行速度 200 m/s

## 2 仿真试验

图 4 和图 5 是  $S$  和  $M$  两个地区的模拟 SAR 影像。这两个地区的地形比较有代表性,前者海洋面积占了多数,且地形起伏不大,后者为山区地形,且地形起伏很大。由于输入的俯仰向波束宽度较大,使得测绘带宽达到 11 km 之多,能够保证覆盖模拟区域东西向宽度。图 4 中由于  $S$  地区地形起伏不大,阴影和叠掩现象不太明显,相反在图 5 中则可以明显地看到 SAR 图像的叠掩现象,这是因为在高山地区,各相邻小面单元与 SAR 的斜距相差在一个距离分辨单元以内,这些小面单元的回波都落在同一个像素中,造成该像素亮度很大。图中的水域部分由于之前已经采用高程分带的方法提取出来,仿真时该部分直接当成镜面反射处理,因而在模拟 SAR 图像中呈现黑色。

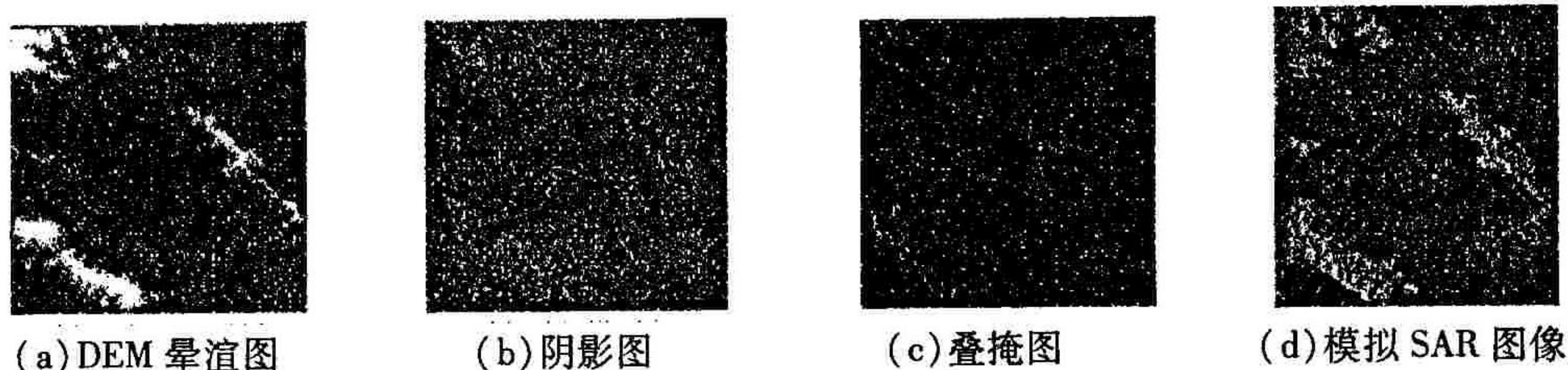


图 4 S 地区 SAR 图像模拟



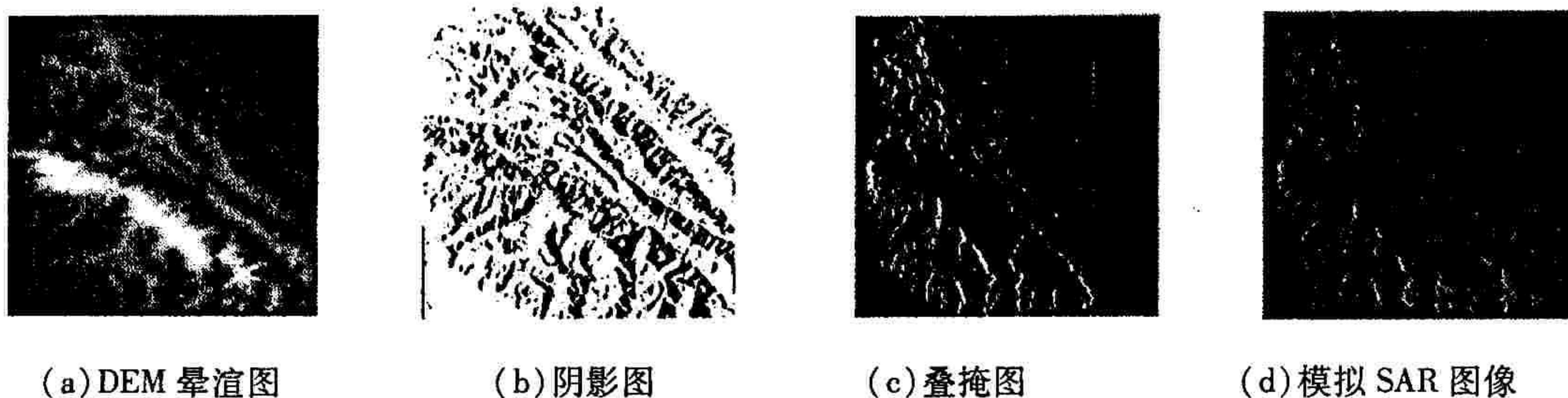


图5 M地区 SAR 图像模拟

### 3 结束语

从所得结果可以看出仿真实验结果与理论分析基本相符。但是我们也应看到此次仿真实验是在诸多理想假设条件基础之上得到的。在真实场景中实验结果不可避免的要受到环境、载机非匀速直线运动等情况的影响,这些外部因素都会降低 SAR 图像的质量,因此还需要我们不断地改进方法,减小外来干扰。

#### 参考文献:

- [1] Giorgio Franceschetti. SARAS: A Synthetic Aperture Radar Raw Signal Simulation[J]. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(1): 110 - 122.
- [2] Giorgio Franceschetti, Maurizio Migliaccio, Daniele Riccio. SAR Raw Signal Simulation of Actual Ground Sites Described in Terms of Sparse Input Data[J]. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(6): 1160 - 1168.
- [3] M. Gelautz. SAR Image Simulation and Analysis of Alpine Terrain[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry&Remote Sensing, 1998, 53: 17 - 38.
- [4] Jerry L Eaves, Edward K. Reedy. Principles of Modern Radar[M]. New York: Artech House, 1988.
- [5] 张捷,包浩生. 分形理论及其在地貌学中的应用[J]. 地理研究, 1994, 13(3): 104 - 112.
- [6] 汤志伟,赵志欣,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.
- [7] 李凌杰,王建国,黄顺吉. 基于真实反射场景 SAR 原始数据模拟[J]. 电子科技大学学报, 1996, 25(6): 566 - 568.
- [8] 郭华东. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京: 科学出版社. 2000.

(编辑:田新华)

A Simulation Method of SAR Imaging

ZHANG Peng, HUANG Jin, GUO Chen-jiang, XU Jia - dong

(School of Electronic and Information Science, Northwestern Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: A method of the natural scenes simulation of SAR (Synthetic Aperture Radar) is discussed. The imagin fundamentals of SAR are expatiated, model of the complex natural scenes is established and the characteristic c SAR images is showed. The echo signal of SAR is given and the simulation imaging is finished.

Key words: synthetic aperture radar; imaging; models; simulation