

典型地形 SAR 回波模拟与 SAR 图像仿真

夏伟杰, 周建江

南京航空航天大学 信息科学与技术学院, 江苏 南京 210016

摘要: SAR 成像算法的验证需要相应的回波数据, 同时 SAR 图像目标识别算法的检验需要大量的 SAR 图像, 针对这一要求, 提出了一种典型地形 SAR 回波模拟与图像仿真的方法。首先分析了分形布朗曲面及其水平集的特征。在此基础上, 运用中点位移法生成了描述山脉地形的数字高程数据, 提出了生成海岸地形(“归零法”)及河流沟壑地形(“归零取反法”)的新方法。引入电磁散射模型, 计算了每个分辨单元的后向散射系数。给出了基于二维快速傅立叶变换的 SAR 回波模拟算法的推导过程及相应的仿真结果, 并对结果进行了分析和讨论, 证明了该方法的正确性。

关键词: 回波模拟, 合成孔径雷达, 分形布朗曲面, 随机中点位移法

中图分类号: TN951

文献标识码: A

1 引言

SAR 回波模拟和图像仿真指的是通过计算机模拟的方法, 通过相关的数学模型来得到典型目标和地形的 SAR 回波数据和 SAR 图像, 它对于 SAR 成像算法的验证、SAR 图像的判读和几何校正以及 SAR 图像目标和特征的识别等具有很大的应用价值。目前许多机构已经开展了这方面的研究, 其中 Franceschetti(1992; 2006)等开发了 SAR 高级模拟器(SARAS)系统, 先采用 Kirchhoff 方法计算地面网格的散射率, 采用基于二维傅里叶变换的方法计算 SAR 回波信号。Tsuchida (2004)等人基于各种地面的散射率模型进行了 SAR 图像仿真。Balz(2005)等则从计算机图形学角度出发, 进行了飞行器目标、城市场景的 SAR 图像仿真。近年来岳海霞(2005)、于明成(2006)等在 SAR 回波算法进行了相关的研究。但以上方法或者偏重于回波计算, 或者偏重于单纯的 SAR 图像模拟, 均未涉及到典型地形的生成及其 SAR 回波模拟和图像仿真这一部分内容。近年来针对 SAR 图像的目标自动检测算法成为研究热点, 其中典型地形中特定目标比如海岸线、河流等的自动检测识别算法是其中重要的研究内容(种劲松等, 2006), 这些算法需要大量相关的 SAR 图像来验证, SAR 仿真能够适应这一需求。本文在上述研究

基础上, 提出了一种典型地形的 SAR 回波模拟与图像仿真的方法, 对山脉地形、沿海地形和河流沟壑地形进行了仿真, 给出了相应的仿真结果。仿真所获得的回波数据可用于检验 SAR 成像算法, 仿真的 SAR 图像可以用于海岸线检测、河流检测等 SAR 图像自动识别算法的验证。

2 分形布朗曲面

自然界中的地形千变万化且无明显规则, 传统的欧氏几何并不能描述这类情况, 对于这类情况, Mandelbrot 提出的分形几何是一种最适合的数学工具。分形几何与布朗运动相结合形成了分形布朗运动理论。通常分形布朗运动是以单个变量 t 为自变量的函数, 现用坐标 (x, y) 代替分形布朗运动中的变量 t , 则随机变量 $X(x, y)$ 可以被认为是曲面在点 (x, y) 的高度。相应地, 分形布朗运动的概念可以被推广到分形布朗曲面(fractal Brown surface)上。分形布朗曲面定义为(Falconer, 1990):

对 $0 < H < 1$, 定义指数为 H 的布朗函数 $X: R^2 \rightarrow R$ 为一高斯随机函数, 且满足:

(1) 以概率 1, $X(0, 0)=0$, 且 $X(x, y)$ 为 (x, y) 的连续函数。

(2) 对 $(x, y), (h, k) \in R^2$, 高维增量 $X(x+h, y+k) - X(x, y)$ 服从均值为 0, 方差为 $(h^2 + k^2)^H$ 的正态分

收稿日期: 2008-05-19; 修订日期: 2008-11-10

第一作者简介: 夏伟杰(1979—), 男, 博士研究生, 讲师, 2004 年硕士毕业于南京航空航天大学信号处理专业。主要研究领域为地形模拟和 SAR 回波仿真。发表论文 5 篇。E-mail: nuaaxwj@nuaa.edu.cn。

布, 即:

$$P[X(x+h, y+k) - X(x, y) < Z] \\ = \frac{1}{\sqrt{2\pi(h^2 + k^2)^H}} \int_{-\infty}^Z \exp\left(\frac{-u^2}{2(h^2 + k^2)^H}\right) du \quad (1)$$

则称曲面 $\{(x, y, X(x, y)) : (x, y) \in R^2\}$ 是指数为 H 的布朗曲面。相应的布朗曲面的豪斯多夫维数和盒维数都以概率 $1=3-H$ 。

下面讨论分形布朗曲面被某一水平面截取后得到的水平集, 也就是分形布朗曲面的等高线的分形维数性质, 该性质被用到接下来的海岸地形和河流沟壑地形的生成中。

定义水平集 $X^{-1}(c) = \{(x, y) : X(x, y) = c\}$ 为分形布朗曲面的等高线。则对几乎所有的 c 的豪斯多夫维数, 必然以概率 1 有

$$\dim_H X^{-1}(c) = \dim_H((\text{graph} X) \cap S_c) \leq 2 - H \quad (2)$$

这里 S_c 是水平截面 $Z=c$, 否则由文献(Falconer, 1990)中的推论 7.10, 有分形布朗曲面的分形维数 $\dim_H(\text{graph} X) > 3 - H$, 与上述的结论不相符合。因此水平集 $X^{-1}(c)$ 的分形维数的上限是 $2-H$ 。

更进一步地, 根据文献(Falconer, 1990)中的定理 16.5 的推广, 对于给定的 c , 以概率 1 有 $\dim_H X^{-1}(c) = 2 - H$ 成立。

3 基于分形的典型地形生成

迄今为止, 已构造出多种符合分形布朗运动特性的空间曲面的合成方法, 包括泊松阶跃法(poisson faulting)(Mandelbrot, 1988)、逆傅里叶变换法(inverse Fourier transformation)(Reed 等, 1995)、随机中点位移法(random middle-point displacement) (李庆忠和高秀荣, 2008)等方法。其中随机中点位移法由于易于实现且运行速度快, 已成为计算机地形模拟中一种代表性的方法。依据随机中点位移法在实际使用中的构网方式的不同, 可以分为三角形网, 四边形网等。考虑到 SAR 仿真的需要, 本文采用四边形网方法, 用经典的 Diamond-Square 方法来实现分形布朗曲面。

3.1 山脉地形生成

山脉地形采用菱形方形(Diamond-Square)方法实现, 该方法是将随机中点位移法用于正方形平面, 对二维矩阵进行插值, 插值得到的矩阵存储相应的高度值, 而矩阵元素所对应的索引值即是相应的水

平和垂直地理坐标。Diamond-Square 算法是一种迭代算法, 每个迭代可以分成 3 个步骤, 如图 1。

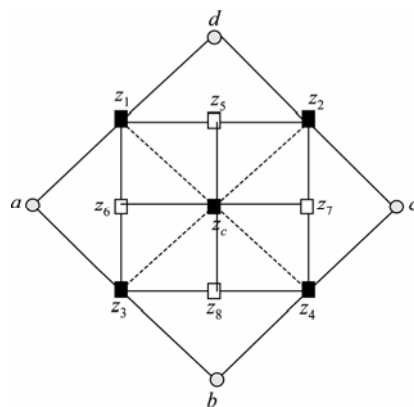


图 1 菱形方形算法迭代过程图

3.1.1 Diamond 步骤

如图 1, 取正方形的 4 个顶点, z_1, z_2, z_3, z_4 , 设 4 个点的初始高度为 0, 在其中心位置生成一个点 z_c , 其中

$$z_c = (z_1 + z_2 + z_3 + z_4) / 4 + \Delta_0 \times G_c \quad (3)$$

式中, G_c 是服从高斯分布的随机量, Δ_0 为初始步长。

3.1.2 Square 步骤

以正方形 4 条边的中点为中心, 相邻的 4 个点构成一个棱锥, 对棱锥的中心实施同 Diamond 相同的步骤, 在正方形 4 条边的中点重新生成 4 个新的点: z_5, z_6, z_7, z_8 。新点的高度值可以表示如下:

$$\begin{aligned} z_5 &= (z_c + z_1 + z_2 + d) / 4 + \Delta_0 \times G_5 \\ z_6 &= (z_c + z_1 + z_3 + a) / 4 + \Delta_0 \times G_6 \\ z_7 &= (z_c + z_2 + z_4 + c) / 4 + \Delta_0 \times G_7 \\ z_8 &= (z_c + z_3 + z_4 + b) / 4 + \Delta_0 \times G_8 \end{aligned} \quad (4)$$

式中, G_5, G_6, G_7, G_8 是相互独立的高斯随机变量。 a, b, c, d 均为 0 值。

3.1.3 步长修改

完成上述步骤后, 需要修改下一次迭代时的步长, 令 $\Delta_1 = \Delta_0 \times P$, 其中 Δ_1 是下一次迭代时候的步长, P 是迭代缩放因子,

$$P = (1/2)^H \sqrt{1 - 2^{2H-2}} \quad (5)$$

式中, H 即是分形指数, H 是介于 0 和 1 之间的数, H 越小, 地形越粗糙。如此反复迭代, 迭代到预定步数的时候停止。

3.2 海岸地形生成——归零法

海岸地形中最显著的特点是海岸线的分布, 海面暂时只考虑平静海面的情况, 也就是认为海面是一个水平面。

使用 Diamond-Square 方法生成初始地形, 运用第 2 节所论述的“水平集法”来截取地形的水平截面, 凡高度值低于水平截面的地形点均置为水平截面的高度值。完成截取后, 整个地形再对水平截面高度进行归零操作。这样依据水平截面的高度值的不同, 可以得到海岸和海岛地形。根据上一节的论述, 水平截面得到的海岸线的豪斯多夫分形维数为

$$\dim_H X^{-1}(c) = 2 - H \quad (6)$$

式中, $H \in (0, 1)$, 因此采用该方法得到的海岸线的分形维数在 1 和 2 之间, 相关的参考文献(朱嘉伟等, 2005)表明, 真实世界里的海岸线的分形维数在 1 和 1.5 之间, 在初始的 Diamond-Square 方法中选取合适的 H , 就可以得到与参考文献中相同的海岸线的分形维数。

3.3 河流沟壑地形生成——归零取反法

在这里同样应用 Diamond-Square 方法生成初始地形, 在初始地形中, 对于那些高度值小于某一个设定阈值 T_1 的地形点均进行“求反”操作, 得到沟壑地形, 在对沟壑地形中高度小于阈值 T_2 的地形点均置为高度值 T_2 , 从而得到河流地形。显然, 河流相当于是初始地形的某一组特定等高线, 根据上一节所论述, 这组特定等高线的分形维数同样为:

$$\dim_H X^{-1}(c) = 2 - H \quad (7)$$

根据相关的参考文献(李旭涛等, 2007), 河流的分形维数 $D \in (1, 1.5)$, 只要在初始地形中选取合适的分形指数 H , 就可以生成相应的符合实际情况的河流沟壑地形。

4 地形的反射率模型

地表对于雷达波束的特性通常用单位面积的后向散射系数 σ_0 表示, 它是一个与雷达参数及地表特性均相关的一个复杂的物理参量。因反射率不是本文考虑的重点, 因此采用如下较为简单的模型(Long, 1983; 姜斌, 2006):

$$\sigma_0 = \gamma \cos \theta \quad (8)$$

式中, θ 是雷达波入射角, γ 是与地形相关的一个参量, 不同地形的 γ 有较大的差异, 结合相关的参考文献和实际数据, 对于不同的地形, 采用如下典型的 γ 值, 如表 1。

表 1 不同地形的反射系数值

地形	山脉	平原陆地	水域
反射系数值/dB	-9	-15	-40

5 基于二维 FFT 的快速回波生成算法

典型的 SAR 原始回波生成算法是距离时域脉冲相干法(RTPC), RTPC 方法计算精度高, 但是运算量大, 计算费时。为了解决这个问题, 根据 SAR 回波信号是目标散射系数和系统冲激响应的卷积, 借助二维快速傅里叶变换(2DFFT)来完成这个卷积, 从而显著的减少运算时间, 提高运算效率。并且计算精度也在可接受范围内, 因此本文采用了 2DFFT 方法。

如图 2, 考虑正侧视成像综合孔径雷达的基本几何关系, 取载机前进方向为 x 方向, 与之相垂直方向为斜距 R 方向建立坐标系(Franceschetti 等, 1992)。

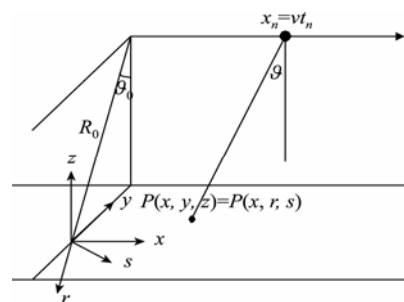


图 2 条带式合成孔径雷达成像几何关系图

在照射带的中心同时定义两个坐标系, 分别为 (x, y, z) 直角坐标系和 (x, r, s) 斜距坐标系, 两个坐标的关系及其定义如 2 图所示。 R_0 代表平台到照射带中心的斜距。 $P(x, r, s)$ 代表照射带中的一点。 θ_0 代表平台到照射带中心的入射角, θ 代表平台到 $P(x, r, s)$ 的入射角。

SAR 回波原始数据可以表示为如下形式:

$$h\left(x' = vt, r' = \frac{ct'}{2}\right) = \iint \gamma(x, r) g(x - x', r - r'; x, r) dx dr \quad (9)$$

在式(9)中, $t' = t - t_n - 2R_0/c$, 式中, (x', r') 分别是回波信号输出所对应的方位及距离向坐标, (x, r) 是相应的观测条带地面坐标。 $\gamma(x, r)$ 是反射率。 $g(x - x', r - r'; x, r)$ 是系统传递函数, 该传递函数与观测地面的物理特性、平台运动特性以及平台和地面的距离等参数相关。

对式(9)进行二维傅里叶变换得到:

$$H(\xi, \eta) = \iint h(x', r') \exp(-j\xi x' - j\eta r') dx' dr' = \iint \gamma(x, r) \exp(-j\xi x - j\eta r) dx dr G(\xi, \eta, x, r) \quad (10)$$

$G(\xi, \eta; x, r)$ 是 $g(x' - x, r' - r; x, r)$ 所对应的傅里叶变

换。式中, $\gamma(x, r)$ 是已知量, $G(\xi, \eta; x, r)$ 是未知量。下面推导 $G(\xi, \eta; x, r)$ 。

对于一个线性调频信号:

$$f_1(t-t_n) = \exp \left[j\omega(t-t_n) - j\frac{\alpha}{2}(t-t_n)^2 \right] \times \text{rect} \left[\frac{t-t_n}{\tau} \right] \quad (11)$$

式中, α 为调频斜率, t_n 为第 n 次发射信号时所对应的时刻, τ 为雷达信号发送持续时间。

考虑上图 2 位于 $P(x, y, z)$ 处点目标的回波信号, 暂时不考虑该点目标的反射率, 在 (x, r, s) 坐标系下有如下近似关系成立,

$$R(x, y, t_n) = R_0 + r + \frac{(x_n - x)^2 + r^2 + s^2}{2R_0} \quad (12)$$

将 $R(x, y, t_n)$ 的近似表达式代入到上述点目标回波信号表达形式中, 令

$$t' = t - t_n - \frac{2R_0}{c}, \quad \frac{(x_n - x)^2 + r^2 + s^2}{2R_0} = \Delta R$$

得到如下的点目标回波表达形式:

$$f(t-t_n; x, y) = e^{j\omega t'} e^{-j\frac{4\pi r}{\lambda}} e^{-j\Phi} \times \text{rect} \left[\frac{t' - \frac{2r}{c} - \frac{2\Delta R}{c}}{\tau} \right] w^2(x_n - x, y) \quad (13)$$

式中, $\Phi = \frac{4\pi\Delta R}{\lambda} + \frac{\alpha}{2} \left(t' - \frac{2r}{c} - \frac{2\Delta R}{c} \right)^2$, 第一个相位项 $\omega t'$ 在 SAR 成像处理中被消除掉, 不予考虑。第二个相位项 $4\pi r/\lambda$ 和反射系数 $\gamma(x, r)$ 相关联, 考虑到 $\gamma(x, r)$ 相位的随机性, $4\pi r/\lambda$ 的影响较小, 不予考虑。第三个相位项是我们考虑的重点。

总的回波信号 $h(x_n, t')$ 是地面反射系数 $\gamma(x, r)$ 和 $f(t-t_n; x, y)$ 的卷积。经过推导之后, 总的回波信号可以用如下公式来表示:

$$h(x', r') = \iint \gamma(x, r) w^2(x' - x) \times \text{rect} \left[r' - r - \frac{2X}{c\tau\Delta R} \right] e^{-j\phi} dx dr \quad (14)$$

式中, $\frac{r'}{c\tau/2} \rightarrow r'$, $\frac{r}{c\tau/2} \rightarrow r$, $\Delta R/X \rightarrow \Delta R$; 基于上面同样的归一化定义, 由 Φ 经过推导可以得到:

$$\phi = a^2 \frac{2R_0}{X} \Delta R + b^2 \left(r' - r - \frac{2X}{c\tau} \Delta R \right)^2 \quad (15)$$

式中, $a^2 = 2\pi X/D$, $b^2 = \alpha\tau^2/2$, Δf 是所发送的线性调频信号的最大频率偏移, 地面的方位向照射距离为 $X = vT$, T 是合成孔径时间。 R_0 表示平台到成像带中心的距离。

对式(14)进行傅里叶变换并与式(10)比较得到

传递函数:

$$G(\xi, \eta; x, r) = \iint w^2(p) \times \text{rect}[q] e^{-j\phi} \times e^{-j\xi(x'-x) - j\eta(r'-r)} dx' dr' \quad (16)$$

式中, $p = x' - x$, $q = r' - r - \frac{2X}{c\tau} \Delta R$ 。

对式(16)应用驻定相位定理进行求解, 最终求解得到近似解:

$$G(\xi, \eta; x, r) \approx \frac{d \left(\frac{\eta}{b^2} \right) w^2 \left(-\frac{\xi}{2a^2} \right) \sqrt{1 + \beta r}}{\sqrt{1 + \varepsilon \frac{\eta}{2b^2} - \frac{3}{2} \gamma^2 \frac{\xi^2}{4a^4}}} \exp(-j\psi) \quad (17)$$

式中, $\psi = \frac{\eta^2}{4b^2} + \frac{\xi^2}{4a^2} \frac{1 + \beta r}{1 + \varepsilon \frac{\eta}{2b^2}}$ 。

这样, 考虑到上式中变量 r , 回波信号的傅里叶变换可以表达成如下形式(Franceschetti 等, 1992):

$$H(\xi, \eta) = G_0(\xi, \eta) \Gamma'(\xi', \eta') \quad (18)$$

这里 $\Gamma'(\xi', \eta')$ 是修正后的地面反射率 $\gamma\sqrt{1 + \beta r}$ 的傅里叶变换, $G_0(\xi, \eta)$ 是 $r=0$ 时的 $G(\xi, \eta; x, r)$ 。在得到 $H(\xi, \eta)$ 之后, 通过逆傅里叶变换即可以得到回波数据 $H(x', r')$ 。

6 仿真与结果分析

根据前文所述, 典型地形的 SAR 回波产生与图像仿真的步骤如图 3。

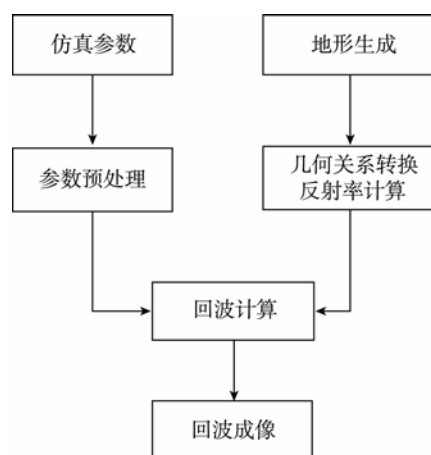


图 3 仿真流程图

首先进行仿真的第一步: 地形生成。先生成山脉地形, 采用前文所述的 Diamond-Square 算法, 选用的分形指数为 $H = 0.6$ 。生成的地形点数为 512×512 点。仿真生成的地形如图 4。

接下来进行海岸地形的生成, 初始地形生成的

时选用的地形分形指数为 $H=0.7$ ，生成合适初始地形，应用前文所述的归零法得到海岸地形。生成的地形如图 5。

最后进行河流沟壑地形的生成，同样取分形指数为 $H=0.7$ 。生成的初始地形经过如前文所述的方法处理过后得到的地形图如图 6。

完成地形的生成，引入 SAR 系统参数，进行每个分辨单元的散射率计算、分辨单元的坐标转换，从直角坐标系转换到 SAR 仿真的斜距坐标系，同时

考虑相应的地形的遮挡关系。所采用的 SAR 系统的相关参数如表 2。

表 2 SAR 系统参数

波长	0.05m	载波频率	6GHz
带宽	60MHz	脉冲宽度	5us
载机高度	5000m	脉冲重复频率	200
载机速度	100m/s	天线尺寸	5m

完成上述计算后，本文采用基于二维 FFT 的回波计算方法计算回波得到每类地形的回波数据后，应用二维匹配滤波成像算法，得到每类地形的 SAR 图像。其中山脉地形在 45° 入射角下所对应的回波和 SAR 图像如图 7 和图 8。更改入射角为 30° ，重新计算回波，应用成像算法得到如图 9 所示的 SAR 图像。

海岸地形所对应的 SAR 图像如图 10。

河流沟壑地形所对应的 SAR 图像如图 11。

仿真过程及结果的分析：

(1) 对图 5 中海岸地形提取其海岸线，得到的海岸线如图 12。用朱嘉伟(2005)中介绍的方法采用

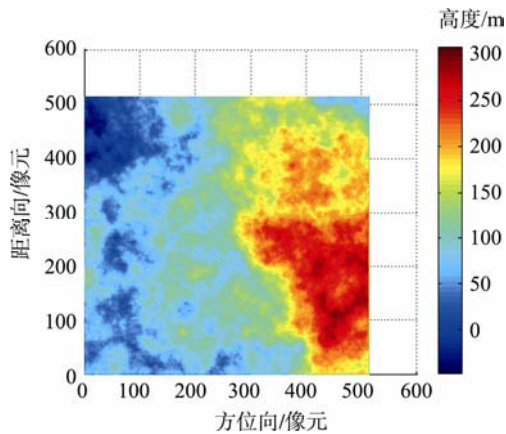


图 4 山脉地形图

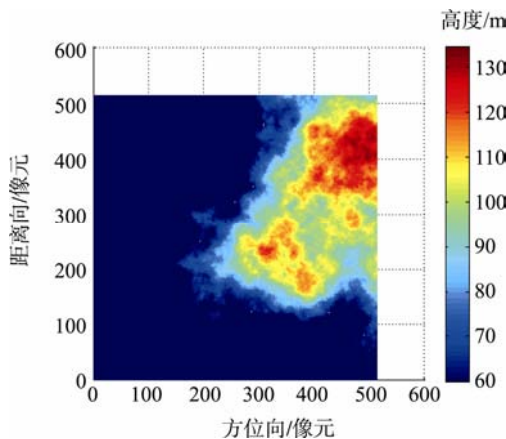


图 5 海岸地形图

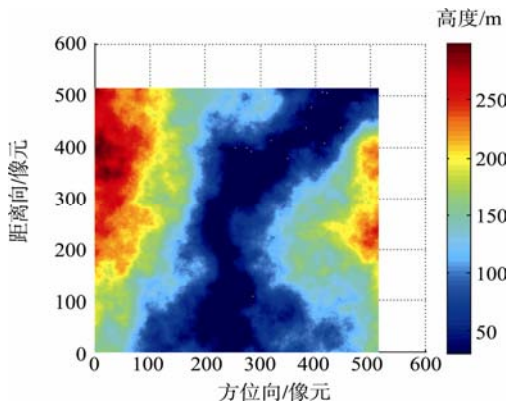


图 6 河流沟壑地形

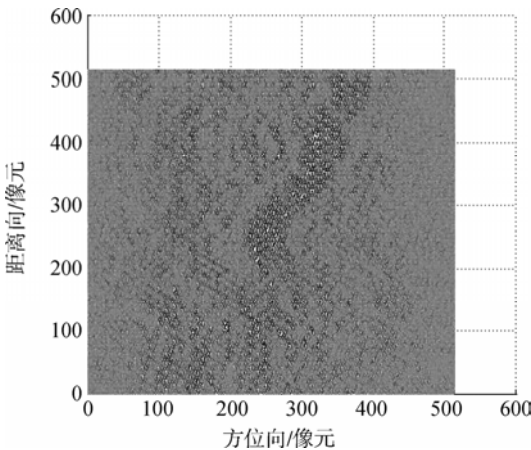


图 7 45° 入射角下山脉地形 SAR 部分回波的实部图

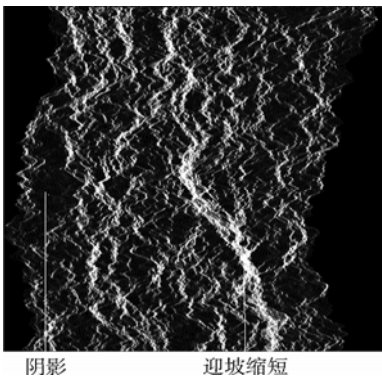
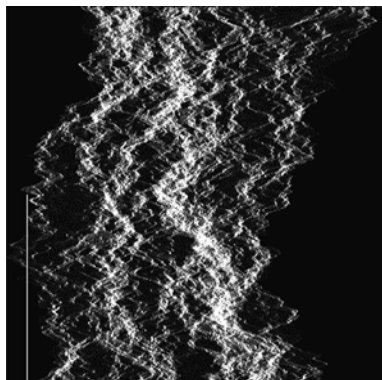


图 8 45° 入射角下山脉地形 SAR 仿真图像



顶底倒置

图 9 30°入射角下山脉地形 SAR 仿真图像

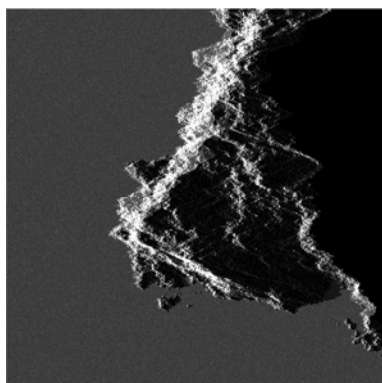


图 10 海岸地形 SAR 仿真图像

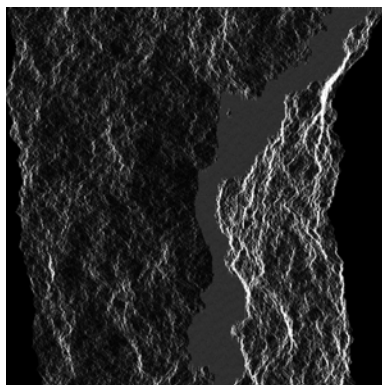


图 11 河流沟壑地形 SAR 仿真图像



图 12 提取出的海岸线图

网格法计算其分形维数为 $D=1.24$, 而第 2 节中理论推导的分形布朗曲面的水平集的分形维数 $D=1.3$ 近似相等, 从而验证了第 2 节中理论推导的正确性, 证明了从分形布朗曲面的水平集算法出发推导出的海岸线模拟方法的正确性。

(2) 对图 11 中的河流沟壑地形进行分析, 提取其河流地形图如图 13, 如作为一种简化处理方法, 取河流的中心线来进行分形特征的分析, 应用王林和陈兴伟(2007) 中的计算方法计算分形维数, 得到其分形维数为 $D=1.17$, 与王林和陈兴伟(2007) 中给出的河流的分形相符合, 证明了本文中所用到的方法的正确性。



图 13 提取出的河流地形

(3) 对于 SAR 成像系统, 由于其侧视特点, 会造成在 SAR 图像中山脉地形产生迎坡缩短、顶底倒置和遮挡效应(图 14)。当入射角大于山脉坡度时候, 产生迎坡缩短和遮挡效应(图 15)。

当入射角小于山脉坡度, 由于山顶到平台的斜距反而小于山底到平台的斜距, 因此会产生顶底倒置效应, 从图 9 可以看出这种效应。

为了进一步说明本文仿真方法的有效性, 下面给出了和本文地形类似的真实 SAR 图像, 如图 14 和图 15。

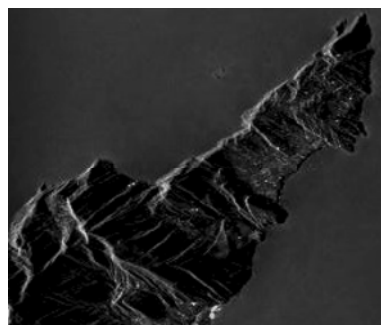


图 14 意大利那不勒斯部分地区的海岸 SAR 图像



图 15 四川自贡地区的河流 SAR 图像

图 14 体现了山脉地形和海岸地形, 图 15 体现了河流地形。对比可以得出结论, 本文仿真得到的 SAR 图像和真实的 SAR 图像之间具有较好的相似性。

7 结 论

本文中采用基于二维傅里叶变换的快速回波模拟算法, 该算法采用了傅里叶变换来快速计算时域中的卷积, 和传统的时域方法相比较, 在速度上要加快了很多。在本文的仿真中, 程序采用 matlab 编写, 计算 512×512 点的场景时, 2DFFT 计算时间约为 10s, 而之前我们所做的工作中, 用 RTPC 方法耗时约 400s, 比较之下显示出基于二维傅里叶变换的快速回波模拟方法的优越性。

仿真结果中, 山脉地形的 SAR 图像体现了实际 SAR 图像几何畸变的特点。海岸地形中海岸线以及河流沟壑地形中河流的分形特性和实际地形的分形特性相符合, 表明了本文中方法的正确性。仿真得到的回波可以用于检验 SAR 成像算法, SAR 图像可以用于 SAR 图像处理和自动目标识别方面的研究。

作为本文的进一步研究, 下一步是建立包含更多地形在内的典型地形集, 同时考虑和典型目标相结合, 以进行复杂真实场景的 SAR 回波模拟和图像仿真工作。

REFERENCES

- Balz T and Haala N. 2006. Improved real-time SAR simulation in urban areas. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*
- Falconer K. 1990. *Fractal geometry*. Chichester, London: Wiley Press
- Franceschetti G, Iodice A, Perna S and Riccio D. 2006. Efficient simulation of airborne SAR raw data of extended scenes. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**(10): 2851—2860
- Franceschetti G and Lanari R. 1999. *Synthetic Aperture Radar Processing*. London: CRC Press.
- Franceschetti G, Migliaccio M, Riccio D and Schirinzi G. 1992. SARAS: A synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **30**(1): 110—123.
- Jiang B. 2006. *Modeling and Simulation of the Land and Sea Clutter and Study on the Techniques of Target Detection*. Changsha. National University of Defense Technology
- Li Q Z and Gao X R. 2008. Study on generating method for 3-d controllable and realistic terrain. *Journal of System Simulation*, **20**(11): 2938—2941
- Li X T, Zhu G X, Cao H Q and Peng F Y. 2007. Anisotropy multi-scale self-similarity random field and terrain construction. *Journal of Image and Graphics*, **12**(7): 1286—1290
- Long W M. 1983. *The Radar Reflect Characteristic of Land and Ocean*. Beijing: Defense Industry Press
- Mandelbrot B B. 1988. *The Fractal Geometry of Nature*. New York: Freeman
- Reed I S, Lee P C and Truong T K. 1995. Spectral representation of fractional brownian motion in n dimensions and its properties. *IEEE Trans. on Information Theory*, **41**(5): 1439—1451
- Tsuchida M, Suwa K and Iwamoto M. 2004. A simulator of synthetic aperture radar images; land, ocean surface, and man-made targets. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Anchorage
- Wang L and Chen X W. 2007. Study on relationship between extracted river network and fractal dimension based on dem. *Geo-Information Science*, **9**(4): 324—330
- Yu M C, Xu J, Peng Y N and Wang X T. 2006. Fast simulation of SAR raw signal. *Journal of System Simulation*, **18**(2): 122—125
- Yue H X. 2005. *Study on Synthetic Aperture Radar Echo Simulation*. Beijing. Chinese Academy of Science
- Zhong J S, OUYANG Y and Zhu M H. 2006. *The Target Detection of the Ocean SAR Image*. Beijing: Ocean Press
- Zhu J W, Zhao Y Z, Yan Z P and Xu L. 2005. The fractal characteristics of the riverway physiognomy of lower yellow river. *Science of Surveying and Mapping*, **30**(5): 28—30

附中文参考文献

- 姜斌, 2006. 地、海杂波建模及目标检测技术研究, 国防科学技术大学
- 李庆忠, 高秀荣. 2008. 三维可控真实感地形生成方法研究. 系统仿真学报, **20**(11): 2938—2941
- 李旭涛, 朱光喜, 曹汉强, 彭复员. 2007. 各向异性多尺度自相似随机场与地形构建, **12**(7): 1286—1290
- 王林, 陈兴伟. 2007. 基于 DEM 的流域水系分维计算与结果分析. 地球信息科学, **9**(4): 324—330
- 于明成, 许稼, 彭应宁, 王秀坛. 2006. SAR 原始信号的快速仿真. 系统仿真学报, **18**(2): 122—125
- 岳海霞. 2005. 合成孔径雷达回波信号模拟研究. 中国科学院研究生院
- 种劲松, 欧阳越, 朱敏慧, 2006. 合成孔径雷达图像海洋目标检测. 海洋出版社
- 朱嘉伟, 赵云章, 闫振鹏, 徐莉, 田明中. 2005. 黄河下游河道地貌分形分维特征研究, **30**(5): 28—30