

基于模型迭代匹配的单幅高分辨 SAR 图像遮挡建筑物高度估计方法

蒋李兵¹, 王壮¹, 雷琳¹, 郁文贤²

(1. 国防科学技术大学 ATR 重点实验室, 湖南 长沙 410073; 2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 分析了高分辨 SAR 图像中受遮挡建筑物的特点, 提出了一种针对遮挡情况建筑物的高度估计方法。该方法基于模型迭代匹配的思想, 将一系列高度参数假设依所提构建的计算模型变换为特征信号并与 SAR 图像进行匹配, 使似然函数达到最大的高度假设为待估计的遮挡建筑物高度。基于仿真和实测 SAR 数据的实验结果表明, 和已有方法相比, 所提方法可以更准确地实现对部分被遮挡建筑物的高度估计。

关键词: 高分辨 SAR 图像; 建筑物高度估计; 局部遮挡; 建筑物特征信号; 似然函数

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)03-0068-08

Occluded building height estimation from single HR SAR image based on an iterative model matching technique

JIANG Li-bing¹, WANG Zhuang¹, LEI Lin¹, YU Wen-xian²

(1. ATR Key Lab, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the analysis of occluded buildings in high resolution SAR images, a novel method for occluded building height estimation was proposed. First, a projection model for SAR building signature prediction from a 3D parametric model was constructed. Second, a likelihood function for SAR building signature evaluation was formulated. Finally, the parametric models with different height parameters were evaluated with the actual SAR image by the likelihood function. The estimated building height corresponded to the parametric model which reached a maximum likelihood value. Comparative experimental results show that the proposed method is more effective in estimating building height even under partial occlusion.

Key words: HR SAR image; building height estimation; partial occlusion; SAR building signature; likelihood function

1 引言

SAR 是一种以主动模式工作的微波遥感设备, 具有全天时、全天候工作的特点, 在遥感对地观测体系中扮演着重要的角色。近年来, 灾害监测和评估成为高分辨 SAR 遥感应用的新热点^[1]。例如, 在 2008 年的四川汶川地震和 2009 年的意大利拉奎拉地震中, TerraSAR-X 和 Cosmo-SkyMed 卫星在震后及时获取了受灾地区的高分辨 SAR 图像, 为灾害评估提供数据支持。建筑物作为一类重要的人造目标, 其高度是灾后评估中的一项重要指标。

雷达立体测量^[1] (radargrammetry) 和干涉测量 (interferometry)^[2] 是 2 种经典的 SAR 建筑物高度估计方法。然而, 这 2 种方法对 SAR 图像数据均有一定的前提要求: 立体测量法需要事先对已配好的 2 幅或多幅 SAR 图像, 干涉测量法则常需借助于额外的辅助数据 (如地面高程数据、光学图像数据等) 来解决高度估计中的关键问题——相位解缠, 这令它们的应用范围受到一定的限制。在一些时效性要求很强的场合 (如地震灾害应急救援), 受卫星重返周期、航空飞行气象条件等因素的影响, 在某个时间段内往往只能可靠地获得单幅 SAR 图像。如

收稿日期: 2012-01-06; 修回日期: 2012-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61105031)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61105031)

何从单幅 SAR 图像中估计建筑物高度信息已成为一个现实而亟待解决的问题。特别地，在城区等建筑物密集分布区域，相邻建筑物在沿雷达视线方向（RLOS, radar line of sight）上易形成遮挡而导致其图像特征发生变化，给高度估计问题带来新的挑战。

围绕着单幅 SAR 图像的建筑物高度估计问题，相关领域学者开展了一系列的研究工作^[3-12]。目前已有的成果主要集中在孤立情况下的建筑物高度估计，按照处理思路的不同，可以归纳为直接测量法^[3-5]、电磁反演法^[6,7]和模型匹配法^[8-12]3 大类。直接测量法人工或半自动地提取叠掩和阴影特征，通过测量它们的尺寸来推算建筑物高度，其估计误差受特征提取精度的制约。电磁反演法则依据电磁散射理论，构建 SAR 图像中的可观测量与建筑物电磁参数、几何参数之间的确定性方程关系来求解高度。此类方法不仅要求构建准确的后向散射模型，而且还需要目标的粗糙度、介电常数等多个电磁参数作为先验，前提条件苛刻，实用性不高。模型匹配法从一系列模型假设中搜索与观测图像最为匹配的解，是目前高度估计研究的一大热点。其中，用于模型匹配可以发生在图像域^[8,9]，也可以选择**在强散射点、边缘等低层特征域^[10,11]进行**。在图像域上进行的模型匹配需要通过电磁仿真来模拟 SAR 图像，算法的计算复杂度偏高。而在低层特征域上进行模型匹配时，除了要根据模型假设计算建筑物的理论低层特征外，还需要额外地从 SAR 观测图像中提取相应的实际低层特征，易受相干斑和特征提取算子的影响而导致匹配错误。而针对遮挡情况下的建筑物高度估计研究目前尚处于探索阶段，由于遮挡情况的建筑物 SAR 图像特征与孤立建筑物有显著不同，直接沿用现有的孤立建筑物高度估计方法并不合理。

本文从遮挡情况下的建筑物图像特征出发，提出了一种针对遮挡情况的平顶建筑物高度估计方法。该方法首先通过本文构建的遮挡情况建筑物特征信号计算模型，将建筑物几何模型假设变换为特征信号。接着设计了度量特征信号与 SAR 观测图像一致程度的似然函数，在模型假设空间中搜索最优解。与经典的单幅 SAR 图像建筑物高度估计方法相比，本文方法既不需要从观测 SAR 图像中提取低层特征，也无须进行复杂的 SAR 图像模拟计算。

2 受遮挡建筑物图像特征分析

建筑物在 SAR 图像中呈现为叠掩、二面角、阴影等多类区域的集合，它们是 SAR 侧视距离成像的结果^[13]，其形状、尺寸和位置与建筑物几何参数直接相关。图 1 给出了 2 种孤立平顶建筑物的特征区域分布情况。来自墙面、地面及屋顶的等距单次反射叠加于同一分辨单元内，形成较亮的叠掩反射区（图 1 中 a 区）；同时，正对 RLOS 方向的建筑物墙面和地面构成二面角反射器，在图像上形成一条亮细线（图 1 中 b 区）；屋顶的单次反射构成了次亮的屋顶反射区（图 1 中 c 区）；而在背向 RLOS 方向的一侧，则因无反射回波而形成阴影（图 1 中 d 区）。本文将上述区域的集合定义为建筑物特征信号，它不包含建筑物的散射强度信息，但却刻画了建筑物在斜距平面上全体特征区域的形状、尺寸和位置，因而可以理解为是表征建筑物结构的二维掩模。孤立建筑物特征信号与高度的关系如式(1)所示。

$$h = \begin{cases} d \cdot \cos \beta \text{ 或 } (a+b)/\cos \beta, & \beta < \tan^{-1}(l/h) \\ (a+b+c)/\cos \beta, & \beta > \tan^{-1}(l/h) \end{cases} \quad (1)$$

$$(a) \beta < \tan^{-1} \left(\frac{l}{h} \right)$$

$$(b) \beta > \tan^{-1} \left(\frac{l}{h} \right)$$

图 1 2 类孤立平顶建筑物的特征信号

然而，当建筑物分布密集时，相邻建筑物会在沿 RLOS 方向上产生遮挡，其特征信号也随之发生改变。图 2 以 2 个相邻的建筑物 B₀ 和 B₁ 为例，给出了不同高度配置时建筑物特征信号剖面图。B₀ 的

高度固定为 h_0 ，当 B_1 的高度为 h_1 时，两建筑物间不存在遮挡，它们的斜距剖面均完整地包含着叠掩、二面角、屋顶反射和阴影。随着 B_1 的高度增加至 h_2 ，两建筑物之间一部分对 B_0 的叠掩有贡献的地面被 B_1 所遮挡，导致两者的特征信号均有所变化： B_1 的阴影被缩短， B_0 的叠掩则被划分为强度不一的 2 部分，且其二面角反射强度也有所减弱。这种效应随着 B_1 高度的增加而加剧。当 B_1 的高度增加至 h_3 时， B_1 对 B_0 的遮挡不仅使 B_1 自身的阴影被进一步缩短，还导致 B_0 的二面角彻底消失。

图 2 中的例子说明，受遮挡建筑物的特征信号不仅与自身的几何参数有关，而且还与引起遮挡建筑物和被其遮挡的建筑物有关。因此，要估计受遮挡建筑物高度，必须将受遮挡影响的所有相邻建筑物目标同时进行考虑。

图 2 相邻平顶建筑物在不同高度配置时的特征信号

3 遮挡情况的建筑物高度估计问题建模

以往在研究建筑物高度估计问题时，一般均假定建筑物除高度之外的其他几何参数（如长、宽、方位角、空间位置）是已知的^[6,7,9,10]。这些几何参数可以通过灾前的光学图像或地理信息系统直接获知，也可以经由特征提取步骤从当前的单幅 SAR 观测图像中估计，文献[10]和文献[14]对此有详细的介绍。本文依然沿用这一假定，并以常见的一类建筑物——平顶建筑物为例，研究遮挡情况的建筑物高度估计问题。

将平顶建筑物用参数模型表示，记为 $B(l, w, h, a, C)$ ，其中 l, w, h, a 分别代表建筑物的长、宽、

高和方位角， $C = (dx, dy)$ 是建筑物底面中心坐标。SAR 传感器的高度和入射角分别是 H 和 β 。为方便表述，将建筑物和 SAR 的已知参数用矢量形式表示，分别记为 $? = (l, w, a, C)$ 和 $f = (H, \beta)$ 。依据模型匹配方法^[9]的一般思路，基于单幅 SAR 图像的建筑物高度估计问题可以表示为如下形式

$$\hat{h} = \arg \max_h L\{S(B(h, ?), f), I\} \tag{2}$$

式(2)中的 $S(B(h, ?), f)$ （在下文中简记为 $S(g)$ ）是在成像条件 f 下，从建筑物几何参数模型 $B(h, ?)$ 到某一特征域的计算模型。 I 是已知的 SAR 观测图像， $L\{g\}$ 是度量 $S(g)$ 与观测图像 I 一致程度的似然函数。

考虑到受遮挡建筑物高度估计问题的特点，需要同时估计其周围受到遮挡影响的所有建筑物高度，式(2)相应地改写为

$$\hat{h} = \arg \max_h L\{\bigcup_{i=1}^n S(B(h_i, ?_i), f), I\} \tag{3}$$

其中， $h = (h_1, h_2, \dots, h_n)$ 是受遮挡影响的相邻建筑物目标集 $\{B(h_i, ?_i), i = 1, \dots, n\}$ 的高度矢量。

求解式(3)需要确定用于模型匹配的特征域，并设计相应的计算模型 $S(g)$ 和似然函数 $L\{g\}$ 。如引言中所述，图像域和低层特征域是用于模型匹配的 2 种常用特征域，但当面对遮挡情况时，它们均存在着局限性：图像域上的模型匹配过程涉及电磁仿真计算，其复杂度将随着建筑物数目的增加而急剧上升；而在低层特征域进行模型匹配时，相干斑现象会直接影响低层特征提取的精度。考虑到遮挡情况建筑物高度估计问题的实际特点，本文并没有选择在上述 2 种特征域上进行模型匹配，而是将匹配过程作用了建筑物特征信号域，并定义了与之相适应的似然函数。

4 遮挡情况的建筑物高度估计方法

本文提出了一种从单幅 SAR 图像中估计受遮挡平顶建筑物高度的方法。算法从 SAR 成像参数和建筑物几何参数模型出发，首先根据建筑物高度假设计算对应的特征信号。接着通过本文所设计的似然函数，与 SAR 观测图像进行匹配。该“高度假设——特征信号计算——匹配验证”过程中的最优高度假设求解通过遗传算法实现。图 3 归纳了算法的主要流程。

图 3 遮挡情况的建筑物高度估计方法流程

4.1 遮挡情况的建筑物特征信号计算模型

雷达散射机理表明，建筑物的叠掩、阴影等特征区域的形状和尺寸主要取决于建筑物及其所处环境与雷达之间的照射关系，而它们在斜距平面上的位置则由起主导作用的后向反射决定。对于本文所研究的平顶建筑物（如图 2 所示），其叠掩是由受雷达回波直接照射的建筑物表面及地面的单次反射相叠加而成，阴影取决于被遮挡的建筑物表面及地面，而二面角则固定地位于墙—地交线处。结合图 1 和图 2 中的例子和前文的特征信号定义可以得出如下结论：平顶建筑物在斜距平面上的特征信号可以由单次反射完全确定。于是，根据斜距成像原理，建筑物表面上直接被雷达照射的点 (x, y, z) 经单次反射后在 SAR 斜距平面上的位置 (r, a) 可以由正交投影来近似，投影方程为

$$(r, a) = ((x, y, z) \bullet \hat{R}(\varphi_s), (x, y, z) \bullet \hat{A}(\varphi_s)) \quad (4)$$

其中， (\bullet) 是点积运算， $\hat{R}(\varphi_s)$ 和 $\hat{A}(\varphi_s)$ 分别是构成斜距平面的距离向和方位向单位矢量。

于是，遮挡情况的建筑物特征信号计算模型可以分为 2 步：1) 计算直接被雷达照射的建筑物表面及周围地面；2) 将 1) 中的点投影至斜距平面。

将建筑物 B 的表面点用集合形式表示，记为 $\{(x_i, y_i, z_i) | (x_i, y_i, z_i) \in B, i=1, L, K\}$ ， K 是表面点的个数。另记与 B 相邻的建筑物集合为 $\{B_{\text{ner}}^i, i=1, L, n\}$ ，则第 i 个相邻建筑物 B_{ner}^i 沿 RLOS 方向在 B 上产生的遮挡 O_i 可表示为

$$O_i = U(x, y, z) \quad (5)$$

上式中的 (x, y, z) 满足方程组(5)的条件为

$$\begin{cases} x - x_i = y - y_i = z - z_i = t \\ p \quad \quad q \quad \quad r \\ A(x - x_0) + B(y - y_0) + C(z - z_0) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中， $(x_i, y_i, z_i) \in B_{\text{ner}}^i$ ， $(x_0, y_0, z_0) \in B$ ， (p, q, r) 是 RLOS 的方向矢量， (A, B, C) 是点 (x_0, y_0, z_0) 所在平面的法矢量。于是，建筑物 B 未被遮挡的表面 B^{un} 为

$$B^{\text{un}} = B - \bigcup_{i=1}^n O_i \quad (7)$$

建筑物 B 周围未被遮挡的地面 G^{un} 也可根据式(5)~式(7)类似地计算得到，此处不再赘述。

对于给定的建筑物高度假设 h ，按式(5)~式(7)逐一计算其中每一个建筑物及周围地面未被遮挡的部分并相加，代入式(4)中，就得到了相邻建筑物的特征信号 $U(r, a)$ 。它虽然不包含反射强度，但却描述了叠掩、阴影和单反射区域的形状、尺寸及位置信息。

4.2 似然函数

4.1 节给出了遮挡情况下建筑物特征信号的计算模型。尽管该特征信号并不包括散射强度信息，但却完整地刻画了建筑物在斜距平面上的叠掩、阴影等不同特征区域的形状、尺寸及位置。将该特征信号叠加于 SAR 观测图像上，就可以比较两者之间的相似程度，从而间接地实现高度参数假设与 SAR 观测图像之间的匹配。

记 $P_i(h)$ 为特征信号 $U(r, a)$ 叠加于 SAR 观测图像 I 之上所得到的图像区域，它可以用全体特征区域的集合 $\{R_i\}$ 表示，也可以等价地用特征区域边缘段的集合 $\{E_j\}$ 表示。

$$P_i(h) = \{R_i, i=1, L, N\} = \{E_j, j=1, L, M\} \quad (8)$$

其中， N 、 M 分别是特征区域和边缘段的个数。

建筑物的特征区域是由具有不同局部入射角和反射类型的后向反射叠加形成的，一般来说，属于同一特征区域的像素强度趋于一致，而不同特征区域间的像素强度则差异明显。从这个性质出发，

分别构建了区域均匀度函数 $C_{\text{region}}(g)$ 和边缘段对比度函数 $C_{\text{edge}}(g)$ 。

$$C_{\text{region}}(P_I(\mathbf{h})) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N (\mu_i - \mu_j)^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{k \in R_i} (\log I(k) - \mu_i)^2} \quad (9)$$

$$C_{\text{edge}}(P_I(\mathbf{h})) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \sum_{k \in E_j} \text{grad}(\log I(k)) \quad (10)$$

其中, $I(k)$ 是图像 I 在 k 处的像素值, μ_i 是区域 R_i 的对数均值, $\text{grad}(g)$ 是梯度算子。

从而, $P_I(\mathbf{h})$ 的似然函数定义为区域均匀度函数和边缘段对比度函数的加权和。

$$L(\mathbf{h}) = C_{\text{region}}(P_I(\mathbf{h})) + w \cdot C_{\text{edge}}(P_I(\mathbf{h})) \quad (11)$$

其中, w 是预定义的加权因子。

4.3 基于遗传算法的高度参数求解

式(3)是一个目标函数极大值求解问题,通常可由确定性方法或随机优化方法进行求解。由于似然函数 $L(\mathbf{h})$ 的空间曲面性质未知,为了避免陷入局部极值,本文采用随机优化算法中的遗传算法求解式(3)。遗传算法是一种自适应全局优化概率搜索算法,其求解主要包括染色体编码、种群初始化、适应度函数、遗传算子和终止条件 5 个方面的内容。针对本文的似然函数极值求解问题,遗传算法的具体参数设置如下。

1) 染色体编码

由于待求解的高度参数 \mathbf{h} 是由 n 个实值变量构成,因此采用实数编码方式,即染色体由长度为 n 的实数向量 (q_1, q_2, \dots, q_n) 表示。

2) 种群初始化

初始种群采用指定和随机相结合的方式生成。设初始种群规模为 p , 其中,一定比例的染色体由沿建筑物不同剖面上的叠掩和阴影尺寸从式(1)计算得到,剩余的染色体则在参数取值范围内随机生成。尽管大部分直接指定的染色体受测量误差的影响而与真值相差甚远,但从概率上来说,也会存在位于真值附近的染色个体。采用这种方式对种群进行初始化,可以在保证种群多样性的同时提高种群收敛到真值附近的概率。

3) 适应度函数

遗传算法中的适应度标识了个体生存的概率,适应度较高的个体遗传到下一代的可能性较大。这

与本文所构建的用于度量高度假设 \mathbf{h} 的似然函数 $L(\mathbf{h})$ 是一致的,因此直接以式(11)定义的似然函数作为适应度函数。

4) 遗传算子

遗传算子主要包括选择、交叉和变异 3 部分。本文采用比例选择算子的方法来进行选择运算,采用算术交叉的方法来进行交叉运算,采用均匀变异的方法进行变异运算。这 3 种算子均是遗传算法中的常用算子,此处不再赘述。

5) 终止条件

遗传算法的终止条件设置为迭代次数达到预设的最大迭代次数 g 或连续 c 代平均适应度不发生变化。

5 实验结果与分析

为验证本文方法的有效性,首先对模拟图像进行了实验,分析了高度估计的误差,并与直接测量法的估计结果进行了比较。随后,在模拟图像实验的基础上,将本文方法用于实测图像。其中,模拟图像是基于 Lambertian 反射模型,根据不同的建筑物几何参数模型、噪声强度及成像条件仿真生成的。实测图像来源于德国 DLR 公开发布的 Noerdlingen 地区 TerraSAR-X 卫星遥感图像。

图 4 以包含 2 个相邻平顶建筑物的场景为例,给出了高度估计的中间过程和最终结果。图 4(a)是仿真场景的三维示意,两相邻建筑物的参数模型分别为 $B_1(h_1, ?_1) = (60, (80, 30, 0^\circ, (25, 100)))$ 和 $B_2(h_2, ?_2) = (40, (80, 30, 0^\circ, (95, 80)))$ 。图 4(b)是根据图 4(a)的场景按 Lambertian 反射模型计算得到的模拟 SAR 图像,成像参数 $?_s(H, \beta) = (5000, 45^\circ)$, 图像尺寸 90×350 , 距离和方位分辨率均为 0.3m , 等效视数 (ENL, equivalent number of looks) 为 3。遗传算法种群数设为 20, 依直接测量法得到的 2 组高度估计值 $(65.0, 43.1)$ 和 $(24.0, 43.1)$ 作为初始种群中的高度假设初值。图 4(c)中的灰色细轮廓代表高度 $(24.0, 43.1)$ 所对应的建筑物特征信号。随着遗传进化的进行,每一代最优高度假设个体所对应的特征信号不断逼近 SAR 观测图像中实际建筑物各个特征区域的真实边界。图 4(d)中的灰色细轮廓是对应着高度估计值 $\hat{\mathbf{h}} = (59.7, 39.1)$ 的建筑物特征信号,其与建筑物的实际特征区域轮廓相吻合。从数值上看,估计结果 $(59.7, 39.1)$ 与高度真值 $(60, 40)$ 非常接近,相较于直接测量法的 2 个估计结果 $(65.0, 43.1)$ 和 $(24.0, 43.1)$,

精度有了较大提高,表明本文方法用于估计遮挡情况的建筑物高度是有效的。图 4(e)是最优个体适应度随遗传代数的演化曲线。由于具有可靠的高度初值,使得遗传进化过程能较快地以大概率收敛于真值附近。

进一步选取不同方位角、成像入射角和图像噪声方差的 SAR 仿真图像共 40 幅来测试本文方法的性能。仿真场景中包含 2 个相互平行的建筑物,建筑物方位角范围选取为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° 和 90° 共 10 组,每组包含 40° 和 50° 这 2 种成像入射角,噪声方差则取为 0.1 和 0.3 (对应的 ENL 分别为 3 和 1)。图 4(f)给出了本文算法得到的高度估计绝对值误差统计结果,其中 h_1 和 h_2 分别为近雷达侧和远雷达侧建筑物的高度。经统计得到的高度估计绝对误差均值约为 0.5m,最大估计误差在 1m 左右。图 4(f)的统计结果曲线说明,本文方法能有效估计受遮挡程度不一的建筑物高度。同时,在不同方位角下的 h_1 和 h_2 误差曲线起伏不明显,表明本文的高度估计方法对建筑物方位角不敏感。不同噪声方差下的误差曲线也较为接近,说明估计误差并未随噪声水平的增大而显著变大,算法具有一定的顽健性。

针对上述同样的数据集,还选用了文献[10]中经典的单幅 SAR 图像孤立建筑物高度估计方法与本文方法进行比较。其中,文献[10]算法涉及的图

像先验统计分布选用 Gamma 分布,且假定特征信号的最优匹配位置已知。仿真实验得到的绝对估计误差统计曲线如图 4(g)所示。高度估计 h_1 的误差曲线与本文算法得到的结果相近,但由于受建筑物部分区域被遮挡的影响,绝对误差均值上升为 1.2m。而 h_2 的误差曲线则远高于本文算法所得到的结果,绝对误差均值达到 8.6m。同时,从 h_2 误差曲线的走势可以发现,文献[10]方法的估计误差随着受遮挡程度的加剧而趋于增大。上述比较实验进一步印证了本文算法针对遮挡建筑物目标高度估计的有效性。

图 5 给出了基于实测 SAR 图像的建筑物高度估计结果。图 5(a)是德国 Noerdlingen 地区的 TerraSAR-X 卫星在高分辨聚束 (HighRes SpotLight 300 MHz) 模式下所获得的 SAR 图像切片,分辨率为 1m,局部入射角为 32° ;图 5(b)是对应的光学图像 (@Google Earth),其中包含了 3 栋相邻的平顶建筑物 (分别记为 A、B、C)。图 5(c)是由本文算法估计得到的高度参数所对应的特征信号 (灰色细轮廓) 与原图叠加的结果。可以看出,该特征信号与 3 栋相邻建筑物的整体特征区域轮廓基本吻合,较准确地反映了建筑物目标 A 和 C 之间由于遮挡所引起的特征信号变化。图 5(d)是依据高度估计结果反演的三维场景示意。上述基于实测 SAR 图像的实验结果进一步说明了本文算法的有效性。

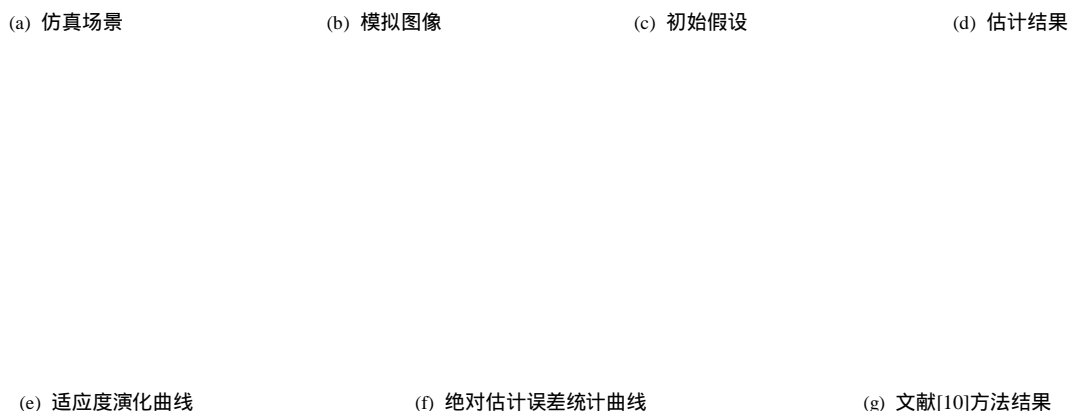


图 4 两相邻建筑物遮挡情况的高度估计结果

6 结束语

对城区中建筑物进行高度估计在雷达遥感领域有着重要的应用。遮挡效应导致建筑物图像发生变化,使得现有的方法难以对遮挡建筑物特征进行准确的描述,降低了高度估计的精度。本文从遮挡效应产生的几何机理出发,通过分析受遮挡建筑物的图像特征,构建了其特征信号的计算模型,进而提出了一种基于模型迭代匹配的单幅 SAR 图像受遮挡建筑物高度估计方法。基于模拟和实测 SAR 图像的实验结果表明,本文方法用于估计遮挡情况下的建筑物高度是可行的。

需要指出的是,本文提出的方法目前仅限于平顶建筑物。对于外形不规则的一类建筑物,其与雷达波的相互作用类型较为复杂,仅用单次和二次反射无法完整描述。下一步的研究将致力于解决该问题。

参考文献:

[1] SOERGEL U. Radar Remote Sensing of Urban Areas[M]. Berlin: Springer, 2010. 1-8.

[2] 马仑,廖桂生,李真芳. 利用分布式小卫星 InSAR 系统获取宽域、高分辨、高精度三维地形[J]. 电子学报, 2009, 37(9):1900-1906.

MA L, LIAO G S, LI Z F. Using constellation InSAR system to reconstruct three-dimensional topography with wide swath, high resolution and high precision[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1900-1906.

[3] TUPIN F. Extraction of 3D information using overlay detection on SAR images[A]. 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas[C]. Berlin, Germany, 2003. 72-76.

[4] BENNETT A J, BLACKNELL D. The extraction of building dimensions from high resolution SAR imagery[A]. IEEE Radar Conference[C]. Huntsville, Alabama, USA, 2003. 182-187.

[5] THIELE A, CADARIO E, SCHULZ K, *et al.* Analysis of gable-roofed building signature in multiaspect InSAR data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(1):83-87.

[6] FRANCESCHETTI G, GUIDA R, IODICE A, *et al.* Building feature extraction via a deterministic approach: application to real high resolution SAR images[A]. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS2007)[C]. Barcelona, Spain, 2007. 2681-2684

[7] GUIDA R, IODICE A, RICCIO D. Height retrieval of isolated buildings from single high-resolution SAR images[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(7):2967-2979.

(a) 实测星载 SAR 图像切片

(b) 同一地区的光学图像

(c) 高度参数估计结果

(d) 建筑物三维重建示意图

图 5 实测 SAR 图像建筑物高度估计结果

- [8] QUARTULLI M, DATCU M. Stochastic geometrical modeling for built-up area understanding from a single SAR intensity image with meter resolution[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(9):1996-2003.
- [9] BRUNNER D, LEMOINE G, BRUZZONE L, *et al.* Building height retrieval from VHR SAR imagery based on an iterative simulation and matching technique[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(3):1487-1504.
- [10] SPORTOUCHE H, TUPIN F, DENISE L. Building detection and height retrieval in urban areas in the framework of high resolution optical and SAR data fusion[A]. 2010 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS2010)[C]. Honolulu, Hawaii, USA, 2010.3660-3663.
- [11] 赵凌君. 高分辨率 SAR 图像建筑物提取方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009. 107-128.
ZHAO L J. Building Extraction from High Resolution SAR Imagery[D]. Changsha: National University of Defense Technique, 2009. 107-128.
- [12] BARTHELET E, MERCIER G, DENISE L. Building change detection in a couple of optical and SAR high resolution images[A]. 2011 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS2011)[C]. Vancouver, Canada, 2011. 2393-2396.
- [13] XIA Z G, HENDERSON F M. Understanding the relationship between radar response patterns and the bio-and geophysical parameters of urban areas[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(1):93-101.
- [14] FERRO A, BRUNNER D, BRUZZONE L. Detection and reconstruction of building footprints from single VHR SAR images[A]. European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)[C]. Aachen, Germany, 2010. 1094-1097.

作者简介：

蒋李兵(1982-), 男, 江苏启东人, 国防科学技术大学博士生, 主要研究方向为 SAR 图像解译、图像融合。

王壮(1973-), 男, 满族, 陕西西安人, 博士, 国防科学技术大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为图像理解、数据融合与自动目标识别。

雷琳(1980-), 女, 湖南衡阳人, 博士, 国防科学技术大学副教授, 主要研究方向为遥感图像处理、信息融合与目标识别。

郁文贤(1964-), 男, 上海人, 博士, 上海交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为先进探测技术和多维信号与信息处理。