基于曲波活性测度的 SAR 与多光谱图像融合*

路雅宁[†],郭 雷,李晖晖 (西北工业大学自动化学院,西安 710129)

摘 要:曲波变换是一种更适合于图像处理的多尺度几何分析方法,具有很强的方向性。结合活性测度将其应用于合成孔径雷达(SAR)图像和多光谱(MS)图像融合可以更好地表示图像中的有用特征。首先,对多光谱图像和 SAR 图像的 R、G、B 三波段分别进行曲波变换,粗尺度系数采用 3×3 窗口系数活性测度进行融合,细节尺度直接取大,对粗尺度和细节尺度系数重构后得到最终融合结果。采用熵、平均梯度、信噪比和扭曲程度对融合结果进行评价。实验结果表明,基于曲波活性测度的融合方法在保持 MS 光谱信息和提高空间分辨率上都有较好的结果。

关键词:曲波变换;多尺度几何分析;活性测度;合成孔径雷达图像融合 中图分类号:TP391.41 文献标志码:A 文章编号:1001-3695(2012)11-4360-04 doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.11.093

SAR and MS image fusion based on curvelet transform and activity measure

LU Ya-ning[†], GUO Lei, LI Hui-hui

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi' an 710129, China)

Abstract: Curvelet transform, as a method of multiscale geometric analysis, is more suitable for image processing and contains more directional information. This paper proposed the methods of integrating SAR and MS image based on curvelet transform and described activity measure in detail. It gave SAR and MS image by curvelet transform to obtain coarse coefficients and detail coefficients. Then, it applied the inverse transform to obtain the fusion product. Finally it used degree of distortion (DoD) and entropy etc to evaluate the result. The results of experiment indicate that the method excels those of based on traditional curvelet transform in preserving spectral information and enhancing resolution.

Key words: curvelet transform; multiscale geometric analysis(MGA); activity measure(AM); SAR image fusion

0 引言

多传感器图像融合是指多个传感器采集的关于同一目标 或场景的图像数据根据某个算法进行适当的综合处理,充分利 用多个被融合图像中包含的冗余信息和互补信息,增加信息 量,获得更可靠准确的信息,从而产生一幅新的满足某种需求 的新图像。

SAR 图像与可见光图像是目标对于不同电磁波波段的响 应,含有目标的不同信息。从可见光和 SAR 图像中提取互补 性特征,可以有效扩展目标在电磁波谱域的表达。因此,在获 得同时相光学图像和 SAR 图像的情况下,合理融合目标可见 光和 SAR 图像的特征能克服单源图像检测的局限性。在含有 背景杂波的 SAR 图像中能快速检测出典型军事战术目标,如 坦克、装甲车、火炮、卡车等,或由这些目标组成的目标群,并能 够在一定程度上检测部分被阻挡、伪装的目标。对应于图像中 这些目标多表现为有一定面积的亮斑,因此 SAR 图像有利于 大面积、快速地检测目标。相对而言,光学图像反映的目标几 何特征通常具有很强的区分性,且这些特征对目标姿态并不敏 感,所以能提供极好的鉴别性能。然而,直接从光学图像中检 测目标却是非常困难的。光学图像易受照度变化和成像噪声的干扰。同时受到光学照射角度的影响,目标周围还会产生阴影。在作战情况下,战场中还会放置许多虚假的目标。这些假目标也具有类似与真实目标的几何结构,甚至在色度、纹理、形状上与真实目标一致。在受到阴影干扰、照度变化和假目标等因素影响下,在光学图像中直接检测目标的效果也不佳。基于以上原因,有必要结合 SAR 和光学图像的互补优势研究融合技术。将 SAR 与多光谱图像融合,可以充分利用其互补信息,提高某些地物的分类精度以及提高遥感解译和信息提取的精度,特别是地面军事目标的检测和识别,具有重要的意义^[1.2]。

SAR 和多光谱图像的融合一直难以获得令人满意的效 果。本文主要研究的图像融合问题是将多光谱(MS)图像与空 间高分辨率合成孔径雷达(SAR)图像进行融合,得到一幅同时 具有高空间分辨率和光谱信息的融合图图像。传统的小波域 关于 SAR 图像与多光谱图像融合的研究成果比较多^[3,4]。小 波变换在图像处理中获得成功主要归结于其刻画一维分段光 滑函数的良好性能,但在二维并非同样适用,即小波在分析点 状瞬时状态奇异性时是最优的,但在表示图像结构的直线、曲 线奇异性时不是最优的。Curvelet 继承了小波分析优良的空域

收稿日期: 2012-03-30; 修回日期: 2012-05-08 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60802084);西北工业大学基础研究基金资助项目(JC20110266)

作者简介:路雅宁(1977-),女(通信作者),陕西宝鸡人,博士研究生,主要研究方向为多尺度几何分析、图像融合(luyaning816@163.com); 郭雷(1956-),男,山东海阳人,教授,博导,主要研究方向为神经计算、图像与视频处理、模式识别等;李晖晖(1974-),女,四川峨嵋人,副教授,博 士,主要研究方向为图像融合、多尺度几何分析及智能信息处理等. 和频域局部特性,是又一个新的图像多尺度几何分析工具,其 相对于小波的优势在于更加适合描述图像的几何特征,具有良 好的方向性和各向异性^[5],能准确将图像边缘捕获到不同尺 度、不同频率的子带中,更适应纹理信息丰富的 SAR 图像融 合。因此,对于曲波变换下系数的融合规则也有必要进行更深 入的研究。但是,现有的曲波域融合算法大都是基于多光谱和 全色[6-9]或是基于多聚焦图像[10-12]的融合算法,针对光谱差 异较大的 SAR 图像和多光谱的研究较少。在曲波域针对 SAR 和可见光的融合^[13,14]、SAR 和多光谱图像的融合^[15]采用的融 合算法的融合规则都较为简单,都是直接对系数进行处理,没 有考虑曲波变换系数间的相关性,影响了 MS 图像光谱信息的 保留,最终得到的融合图像的光谱分辨率也比较低。活性测度 用来度量源图像多分辨率系数的某种特征,从而可反映出哪一 幅源图像的特征更为显著。本文正是基于这一思路,根据图像 多尺度分解后的系数特征,对分解后的系数采用一种局部窗口 活性测度,将其应用于 SAR 和 MS 图像的融合,取得了较好的 效果。

1 基础理论

1.1 Curvelet 变换

Candes 等人^[5]提出了一种适合分析具有曲线或超平面奇 异性高维信号的曲波变换。Curvelet 变换结合了多尺度分析和 几何结构特征描述的思想,是在将多尺度分析和脊波变换各向 异性的特点相结合的基础上得到的一种新的多尺度分析工具。 其优点是在细尺度下各特征高度各向异性,能更优逼近曲线或 直线,对图像的边缘细节和曲线等特征有更好的描述,可以更 稀疏地表达图像,使信号能量集中,因此为图像描述提供了一 个更有利的数据表达。相对于小波的优势在于其更加适合描 述图像的几何特征,因此也更适合图像处理应用。与小波最大 的差异就是其具有任意角度的方向性,是各向异性的。在楔形 分块中,只有当逼近基与奇异性特征重叠,即其方向与奇异性 特征的几何形状匹配时,才具有较大的 Curvelet 系数。此外, Curvelet 较之小波具有更好的稀疏表达能力,它能将图像的边 缘,如曲线、直线特征用较少的大的 Curvelet 变换系数表表示, 克服了小波变换中传播重要特征到多个尺度上的缺点,更利于 跟踪和分析图像的重要特征。因此,将 Curvelet 变换引入图像 融合,可以利用 Curvelet 分析更好地提取原始图像的特征,为 融合图像提供更多的信息。

在源图像中,明显的图像特征,如直线、曲线、轮廓和区域等,往往表现为灰度值及其变化,而在 Curvelet 域表现为变换系数的模值大小。尤其是图像的边缘等细节特征在 Curvelet 域中表现为一些少数模值较大的高频 Curvelet 系数,即 Curvelet 域中模值较大的高频系数包含了更多的边缘等纹理信息。

1.2 HSI 变换

在 RGB 空间中,光谱信息与三个坐标 R、G、B 的耦合性较强,R、G、B 中任一分量的改变都会改变光谱信息,在图像处理过程中处理起来很困难。为了将高分辨率影像的结构信息叠加到低分辨率多光谱影像中,经典的方法是采用 HSI 变换法。

亮度 *I* 是指色彩的亮度;色度 *H* 是指组成色彩的主波长, 由红绿蓝色的比重所决定;饱和度 *S* 表示的是相对中性灰色而 言颜色的纯度,即颜色的鲜艳度。在 HSI 空间中,光谱信息主 要体现在色调 *H* 和饱和度 *S* 上,而亮度 *I* 主要反映地物辐射总 的能量及其空间分布,即表现为几何特征。从视觉特点上分析,亮度 I 的改变对光谱信息影响较小,便于处理。对于高空间分辨率影像和多光谱影像的融合问题,笔者希望在保留光谱信息的前提下,添加高空间分辨率影像的细节信息,因此更适于在 HSI 空间中进行处理^[16]。

1.3 活性测度[17,18]

图像的融合规则可大致分为三类,即基于像素点的融合、 基于像素点区域特征的融合和基于图像全局特征(感兴趣区 域或目标)的规则。基于单像素点规则的算法主要有基于绝 对值取最大、基于加权平均和直接对高频部分替换等方法。

基于单像素点的规则没有考虑区域信息,不适宜应用在源 图像未精确配准和源图像的光谱特征差别较大的情况,如本文 的 SAR 与 MS 图像间的融合。基于区域特征的融合的基本思 想是:在对某一分解层图像进行融合处理时,为确定融合后的 像素不仅要考虑参加融合图像中对应的各像素,而且要考虑参 加融合像素的局部区域。

活性测度是一种用来测定每个源图像质量的量。它用来 度量源图像多分辨率系数的某种特征,从而可以反映出哪一幅 源图像的特征更为显著。曲波系数的活性测度反映了该系数 以及由该系数扩展得到的相应空间的局部区域能量。因此,曲 波分解系数的活性测度越大就意味该像素包含的信息越丰富, 应该保留在融合图像中。

2 基于曲波变换活性测度的图像融合

2.1 融合规则设计

曲波变换是一种典型的多尺度几何分析方法,它可以很好 地逼近图像中的奇异曲线。Curvelet 变换能用极少的非零系数 精确表达图像边缘,因此可以在保证较低的均方误差基础上, 使图像数据达到较理想的精简性与精确性的平衡,从而体现出 它在噪声环境下优于小波的表达图像的能力。

在融合过程中,根据什么样的准则来选取特征是图像融合的关键技术。最大值准则和局部梯度准则在选取小波系数时,容易受孤立噪声点的干扰,从而可能会选择错误的分解系数。对于局部方差准则和能量准则来说,又都是对局部窗口内的分解系数作整体考虑,而对窗口内每个像素所包含的独立信息考虑不足。

为克服以上融合准则中存在的问题,在对曲波系数进行处 理时,在较小的邻域内,由于 Radon 变换的存在使得 Curvelet 变换系数之间具有与生俱来的相关性,应该考虑其邻域系数, 这样才能减少重要的系数被错误选择的情况,以尽可能保留图 像细节。本文提出了一种基于窗口活性测度的融合模型 (AM),对原图像曲波分解得到的某一分解尺度下的曲波系 数,通过窗口操作,对当前点的 Curvelet 系数进行活性测度处 理而得出新的 Curvelet 系数。

AM 有如下的优点:a)它同时考虑了曲波系数的单个系数 值和局部区域系数值;b)当窗口中噪声的曲波系数较大时,可 起到压制噪声的作用。

窗口大小会影响融合的效果,如果窗口过大的话,那样不 但对于保持图像的边缘毫无意义,而且会引入许多噪声,造成 图像融合的质量下降。而且窗口愈大,计算量也就愈大,由于 Curvelet 变换冗余度已经是 16*J*+1,所以 3×3 或 5×5 的窗口 比较可行。 本文选用3×3基于窗口的活性测度作为融合规则,提出 了一种基于曲波变换活性测度的遥感图像融合方法,利用曲波 对图像几何特征更优的表达能力有效地提取原始图像的特征, 为融合图像提供更多的信息。

若两组分解系数的活性测度为A₁(P)和A₂(P),采用基于 窗口的测度,窗口大小为3×3,窗口模板系数采用

$$w(s,t) = \begin{vmatrix} 1/16 & 1/16 & 1/16 \\ 1/16 & 1/2 & 1/16 \\ 1/16 & 1/16 & 1/16 \end{vmatrix}$$
(1)

则活性测度为

 $A_{I}(P) = \sum_{s \in S, t \in T} w(s, t) | D_{I}(i + s, j + t, k, l) | I = 1, 2$ (2)

其中:w(s,t)为权重系数,满足 $\sum_{s \in S_{t-T}} w(s,t) = 1_{\circ}$

2.2 基于曲波变换活性测度的图像融合

综上所述,具体融合步骤如下:

a) 对多光谱 MS 图像进行 HSI 变换。

b)对 I 分量和 SAR 图像进行基于曲波变换融合,采用的 融合规则为对粗尺度系数采用活性测度融合,细节尺度系数取 模值最大融合。

c)I分量与 SAR 图像进行曲波逆变换得到新的 I分量。

d)由新的I分量与H、S分量逆 HSI 变换得到最终融合图像。

步骤 b)中的曲波分解系数活性测度的计算及系数选择按照以下规则进行:

(a)计算分解尺度为 nscales 的曲波分解系数,粗尺度系数 记为 Cccoeff,细节尺度系数记为 Cdcoeff;由于图像的信息、能 量等主要由分解后的粗尺度系数来表达,所以采用活性测度可 有效地反映这些特征。

```
(b)计算曲波活性测度系数 A
```

```
AMS(m,n) = w(p,q) * modulMS(m,n);
ASAR(m,n) = w(p,q) * modulSAR(m,n);
(c) 粗尺度系数计算
```

```
if AMS(m,n) \ge ASAR(m,n)
```

```
Cnewccoeff = CMSccoeff
```

else Cnewccoeff = CSARccoeff

(d)细节度系数计算

Cdnew = max { CMSdcoeff, CSARdcoeff }

3 实验结果分析与评价

实验数据采用 2000 年 10 月 20 日获取的意大利 Pavia 城市的 MS 和 Radarsat SAR 图像(C 波段, HH 极化方式^[19], 如图 1(a) 和(b)所示), 在融合 SAR 与 MS 图像时, 既要保留 MS 图像的光谱信息又要加入 SAR 图像的重要目标信息。

为了说明本文基于曲波活性测度算法的有效性,设计如下 两种融合方法:

a)对 MS 图像的 R、G、B 分量进行提取后分别与 SAR 图像进行基于曲波活性测度的融合,记为 CAMDmax;

b)对 MS 图像进行 HIS 变换,将得到的 I 分量与 SAR 图像 进行基于曲波活性测度的融合,记为 HSICAMDmax。

为了方便与其他曲波域融合算法的对比,细节尺度的融合 规则都选用直接模值取最大。分解层数选2^[13]。文献中的算 法粗细尺度取平均细节尺度选最大的融合算法记为 CmeanDmax;文献[13]中的算法粗细尺度均选最大的融合算法记为 CmaxDmax;文献[15]中的经 HIS 变换后的算法记为 HSICmax。 实验结果分别如图 1(c)~(e)所示,本文基于活性测度算法的 融合结果如图 1(f)(g)所示。



(c) Curvelet(CmeanDmax) (d) Curvelet(CmaxDmax) (e) Curvelet(HSICmax)



(f) Curvelet(CAMDmax) (g) Curvelet(HSICAMDmax) 图1 不同方法的融合结果

对比分析融合前的 MS 和 SAR 图像以及融合图像可以看出,融合后的图像信息量都有所增加,集中了图像的信息优势, 使得融合后的图像既保持了 MS 图像的多光谱信息,又不同程 度地加入了 SAR 图像中的细节信息,目视效果上不仅具有光 谱特性,而且有助于 SAR 图像中亮点目标的识别。

在 MS 和 SAR 图像所示的 A 区域可以看出, MS 图像中仅 有光谱特征,无法看出地下掩体中的目标,而由于 SAR 图像的 穿透反射能力,使得地下掩体中的目标清晰可见。曲波方法的 融合结果中,对于 A 处目标都能部分显示出来。其中,本文方 法目视效果最好,基本全部显示了地下掩体中的目标;在使目 标清晰可见的基础上较好地保持了原多光谱图像的光谱特征, 增加了可信度。使得 SAR 和多光谱图像融合后能够确认同一 目标的存在。

对于遥感图像融合效果的评价,应综合考虑空间细节信息 的增强与光谱信息的保持。所以,一般应综合利用两类统计参 数来进行分析与评价:a)反映空间细节信息,如标准差、信息 熵和清晰度;b)反映光谱信息,如扭曲程度、偏差指数与相关 系数。本文采用熵、平均梯度、扭曲程度和偏差指数来进行融 合结果的客观评价。

1)熵 图像熵定义为

$$H = -\sum_{i=0}^{L-1} p_i \times \log_2(p_i)$$
(3)

熵是衡量图像信息丰富程度的一个重要指标,融合图像的 熵值大小表示图像所包含的平均信息量的多少。信息熵越大, 图像所含的信息越丰富,融合质量越好。

2) 平均梯度

平均梯度反映了图像中的微小细节反差表达能力和纹理 变化特征,同时也反映了图像的清晰度。平均梯度越大表明清

$$\nabla g = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1N-1} \sqrt{(\Delta f_x^2 + \Delta f_y^2)/2}$$
(4)

其中: ΔI_x 、 ΔI_y 分别为像素在X、Y方向上的一阶差分值。一般 g 越大,图像层次越多,图像越清晰。

3) 扭曲程度(degree of distortion)

它直接反映了融合图像的失真程度,定义为

$$DD = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \frac{|I_F(i,j) - I(i,j)|}{M \times N}$$
(5)

其中:*I_F(i,j)、I(i,j)*分别为融合后和原始图像上(*i*, *j*)点的灰度值。扭曲程度越小,表明图像的失真程度越小。

4) 信噪比(SNR)

SNR = 10 × lg
$$\frac{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} [f(i,j)]^{2}}{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} [F(i,j) - f(i,j)]^{2}}$$
(6)

其中:F(i,j)为融合后图像,f(i,j)为多光谱图像(i, j)点的灰 度值。

综上,融合结果的熵、平均梯度和信噪比这三个指标参数 值越大越好,扭曲程度则越小越好。

表1中列出了实验中各融合算法的原始图像与各融合图像的熵、梯度、扭曲度以及算法所耗时间评价参数值。为了区分,各项指标的最佳值用粗体标出。可以得出以下结论:

a) 与原 MS 影像相比, 各种融合方法的熵和梯度都有提高, 图像清晰度增强。

b)本文提出的基于曲波活性测度的融合方法 1(CAMDmax)与曲波变换系数直接处理得到的融合图像^[7,13]相比,扭 曲程度和偏差指数大大减小,说明 AM_Curvelet 方法融合的图 像损失的相关信息最少,扭曲度低。

c)本文提出的基于曲波活性测度的融合方法 2(HSICAM-Dmax)与 HIS 变换后对系数处理的融合图像^[15] 熵、平均梯度 大大增加,光谱扭曲度减小,说明与 HIS 变换相结合后的活性 测度方法融合的图像在光谱信息保持上优于其他曲波融合方 法,整体融合质量较高。

d)由于采用了邻域窗口计算活性测度使得算法的运算时 间稍大于其他直接处理系数的算法,不过相差不大,仍然可以 满足实时处理的要求。

表2中列出了融合图像与原多光谱图像的融合信噪比。 从信噪比参数可以看出,基于活性测度的方法融合信噪比值最 大,融合效果最好,在融合的同时一定程度上减少了噪声,算法 有一定的抗噪性能。

4 结束语

SAR 与 MS 图像由于成像方式以及接受波谱段不同,对地物的特征描述存在很大的差异,将 SAR 与 MS 图像融合可以更好地利用互补信息,使得融合图像在保持 MS 图像光谱特征的基础上增加 SAR 图像的目标信息和细节特征信息,增强了融合图像的目标识别能力。曲波变换作为一种新的图像多尺度几何分析的有力工具,在图像的融合应用上显示出了良好的特征提取和跟踪能力。本文提出了一种基于曲波活性测度的SAR 和 MS 图像融合方法,利用曲波变换窗口系数的活性测度规则对粗尺度系数进行了选择,然后重构得到了融合图像。实验结果表明,基于曲波活性测度的方法用于 SAR 和 MS 图像的融合是有效的。

表1 不同融合方法性能比较

融合方法	entropy	grad	degree of	time/s
			distortion	time/ 5
MS image	5.795 5	3.925 8		
SAR image	5.854 5	7.5307		
文献[7](CmeanDmax)	6.094 2	4.909 8	20.620 5	2.637
文献[13](HSICmax)	6.1702	5.542 1	4.253 0	2.705
文献[15](HSIC max)	6.2264	4.570 3	0.031 3	1.243
本文方法(CAMDmax)	6.1803	4.544 5	0.027 1	4.383
本文方法(HSICAMmax) 6.429 0	5.6854	0.015 9	1.725
融合方法	R	G	В	Ι
文献[7](CmeanDmax)	14.1428	15.101 2	16.755 3	
文献[13](CmaxDmax)	22.0312	21.7974	20.853 6	
文献[15](HSICmax)				21.873 9
本文方法(CAMDmax)	25.3184	24.6269	23.507 5	
本文方法(HSICAMmax)				24.764 5

参考文献:

- 陈东,李飚,沈振康. SAR 与可见光图像融合算法的研究[J].系 统工程与电子技术,2000,22(9):5-8.
- [2] 雷琳,王壮,粟毅. 高分辨率 SAR 与光学图像中目标融合检测方法[J].系统工程与电子技术,2007,29(6):844-847.
- [3] 郑永安,陈玉春,宋建社,等.基于提升机制小波变换的 SAR 与多 光谱图像融合算法[J].计算机工程,2006,32(6):195-197.
- [4] 何贵青,郝重阳.一种基于小波变换的遥感 SAR 图像与 TM 图像 融合新算法[J]. 弹箭与制导学报,2005,25(2):100-103.
- [5] CANDES E J, DEMANET L, DONOHO D L, et al. Fast discrete curvelet transforms, applied and computational mathematics [M]. California: California Institute of Technology, 2005.
- [6] 邱宣,周则明,胡友彬.应用邻域方差加权平均的 curvelet 变换融 合[J]. 计算机工程与应用,2010,46(9):166-168.
- [7] 张强,郭宝龙.应用第二代 Curvelet 变换的遥感图像融合[J].光 学精密工程,2007,15(7):1130-1136.
- [8] 杨晓慧,李登峰.基于 Curvelet 多尺度几何分解的快速 LHS 多传感器图像融合[J].传感技术学报,2009,22(4):489-494.
- [9] 蒋年德, 王耀南, 毛建旭. 基于2代 Curvelet 改进 IHS 变换的遥感 图像融合[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(12):2376-2382.
- [10] 吴芳平,狄红卫. 一种基于 Curvelet 变换的图像融合新算法[J]. 光电子·激光,2008,19(7):963-966.
- [11] 宋江山,徐建强,司书春.改进的曲波变换图像融合方法[J].中 国光学与应用光学,2009,2(2):145-149.
- [12] 王刚,马美仲,赵英路,等. Curvelet 变换域图像融合算法[J]. 仪 器仪表学报,2008,29(9):1841-1845.
- [13] 李晖晖,郭雷,刘坤.基于曲波变换的遥感图像融合研究[J].光 电子·激光,2008,19(3):400-403.
- [14] 李晖晖,郭雷,刘坤.基于 Curvelet 变换的 SAR 与可见光图像融合研究[J].光电子激光,2009,20(7):1110-1114.
- [15] 许星,李映,孙瑾秋,等. 基于 Curvelet 变换的 SAR 与 TM 图像融 合研究[J]. 西北工业大学学报,2008,26(3):395-398.
- [16] 杨旭红,敬忠良,李建勋.基于局部统计特性和 IHS 变换的遥感影 像融合[J].系统工程与电子技术,2005,27(4):627-631.
- [17] 李树涛. 多传感器图像信息融合方法与应用研究[D]. 长沙:湖南 大学,2001.
- [18] 王楠,赵淑清,郭建星. HIS 小波包活性测度融合 SAR 与 TM 图像
 [J]. 测绘学院学报,2004,21(4):262-265.
- [19] GARZELLI A. Wavelet-based fusion of optical and SAR image data over urban area[C]//Proc of International Symposium on Photogrammetric Computer Vision. 2002;59-62.