

全极化 SAR 数据反演桥面高度

王海鹏, 徐 丰, 金亚秋

复旦大学 波散射与遥感信息教育部重点实验室, 上海 200433

摘 要: 提出一种 SAR 数据检测桥面高度的反演方法。用几何射线描述桥梁散射机制, 依据去取向理论和分类参数分析, 得到 SAR 成像中桥梁结构目标单次、二次、三次散射的成像规律。通过 SAR 图像分类参数的聚类与细化、滤波和 Hough 变换直线检测算法, 检测出单次、二次和三次散射回波所成位置线图像, 进一步构成桥面高度的反演算法。用机载 Pi-SAR 数据反演了日本鸣门大桥的桥面高度和桥面宽度, 并与实测数据对比。按照该方法, 进一步采用星载 ALOS-PALSAR 数据检测中国东海大桥的桥面高度。反演方法是可行的。

关键词: SAR, 桥高反演, Pi-SAR, ALOS-PALSAR

中图分类号: TP722.6

文献标识码: A

1 引 言

中国河流海域广大, 拥有众多的大型桥梁。近年来, 中国第一座跨海大桥——东海大桥连接位于东海的洋山深水港, 是上海作为国际航运中心的重要枢纽。杭州湾跨海大桥长度为世界第一, 对于整个长三角地区的经济、社会发展具有重大的战略意义。

对于这些桥梁全天候、全天时的监测, 特别是复杂天气条件和非平常状态下的大桥监测是桥梁安全的重要工作。高分辨率极化 SAR 是最有效的手段之一。尤其是近年来 SAR 的分辨率不断提高, 机载 SAR 达到了厘米级, 更进一步提高了 SAR 监测能力 (Oliver & Quegan, 1998; Ouchi, 2004)。

星载 SAR 系统分辨率一般为几米到十几米, 2006 年 1 月发射的 ALOS-PALSAR 分辨率约为 5m (JAXA, 2007), TerraSAR-X 的分辨率达到了 2m (Roth, 2003)。机载 SAR 系统分辨率则有更高的分辨率, 从 10cm 级到米级不等。本文采用高分辨率全极化的机载 Pi-SAR 数据 (Kobayashi, 2000) 以及中等分辨率单极化的星载 ALOS-PALSAR 数据, 提出了大桥桥面高度的检测方法。

2 桥梁散射的几何射线描述与桥面高度反演

SAR 为侧视雷达, 它根据回波时间决定目标在 SAR 图像上的位置, 在地面高度起伏较大区域, 易发生阴影、前向压缩、叠掩等几何效应 (Oliver & Quegan, 1998; Ouchi, 2004), 因此对高度不一致的目标, 雷达图像上的距离并不简单代表地面真实距离。大型桥梁的桥上结构一般为钢构造, 回波往往较强, 在 SAR 图像中表现为高灰度值。图 1 描述矩形桥梁在 SAR 成像中散射的几何射线图 (Robalo & Lichtenegger, 1999), 其中 1, 2, 3 分别代表散射次数, 这里不考虑 3 次以上散射回波。由 SAR 成像的映射投影分析, 目标单次散射回波成像位置距雷达最近; 二次散射次之, 三次散射回波成像位置距离雷达最远。因此, 简单矩形结构桥梁的 SAR 成像会形成三条高亮度条状图像。大型桥梁的复杂结构, 如栏杆、吊索等, 或两层公路铁路桥结构, 会产生更为复杂的体散射和多次散射, SAR 图像上的亮点会变得复杂。如果 SAR 飞行方向和桥梁不平行, 二次散射和三次散射所成图像成为较宽条状图像。图 2 为

收稿日期: 2008-01-11; 修订日期: 2008-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 40637033, 60571050)

第一作者简介: 王海鹏 (1979—), 男, 2006 年获日本高知工科大学博士学位, 现为复旦大学讲师, 主要从事微波遥感方面的研究, 发表论文 20 余篇。

通讯作者: 金亚秋, E-mail: yqjin@fudan.ac.cn。

二次和三次散射 SAR 成像时等效距离图以及斜距 Δs 和地距 Δg 之间的关系, SAR 图像分斜距投影和地距投影 2 种, 斜距和地距之间为简单三角几何关系, 因此容易推导出对应的桥面高度 H 的反演公式。

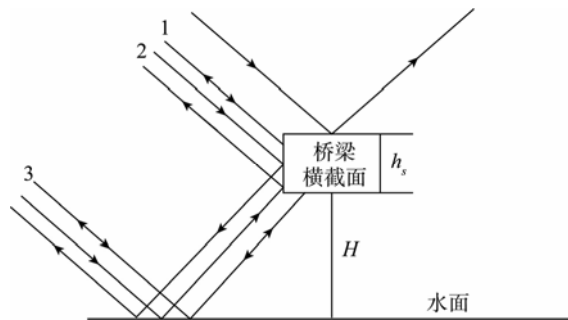


图 1 桥梁单次及多次散射的射线示意图

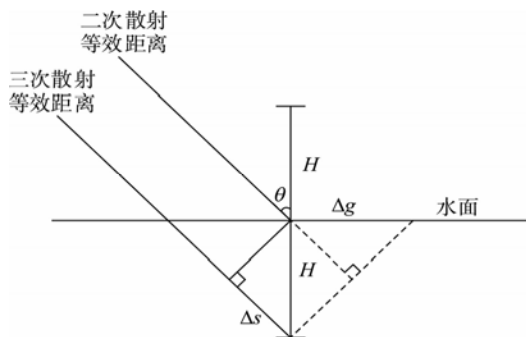


图 2 二次与三次散射距离等效图(地距与斜距之间关系)

本文利用二次散射与三次散射之间的关系来反演 H 。图 2 所示二次、三次散射回波等效距离图, 其中 θ 为入射角, Δs 为二次、三次散射回波在斜距上的距离差, Δg 为对应的地距差。地距差 Δg 与斜距差 Δs 之间关系为 $\Delta s = \Delta g \sin \theta$ 。用地距投影 SAR 图像, 桥梁距水面高度可得到为

$$H = \Delta g \times \tan \theta \quad (1)$$

同理, 也可根据式(1)推算桥体高度 h_s 。如前所述, 单次散射所成两条线形图像, h_s 与 SAR 图像上两条线直接距离之间的关系也可由式(1)来推算。

悬索所成图像也可以用来推算桥梁宽度 d 。图 3 可以看出, 桥两侧对应悬索之间的距离等于桥宽, 因此 d 可以直接通过 SAR 图像得到。

3 桥梁 SAR 图像模拟

通过 SAR 图像模拟进一步说明桥梁目标的散射成像机理。我们发展的映射投影算法(MPA)(Xu & Jin, 2006)用于综合自然场景包括植被、建筑物、复杂地形等的散射计算与 SAR 的成像模拟。它考虑了可穿透性植被目标的散射与衰减、树干及建筑物

墙面与地面之间的多次散射以及成像空间中任意位置地物的散射、吸收与遮蔽。利用 MPA 成像算法, 研究水面上桥梁目标的 SAR 成像模拟。

忽略桥梁本身的复杂钢架结构及附属结构, 将桥梁简化为水面上方的长方体, 用于吊索的桥墩用直立于桥梁两侧的细长方柱表示, 如图 3 为简化桥梁模型的效果图。图中桥梁的几何参数为: 桥长 1000m, 两主塔之间桥长 800 m, 桥宽 25m, 桥面高度 45m, 桥体厚度 10m, 主塔总高度 140m, SAR 飞行方向和桥梁所成角度为 25° 。水面与长方体的散射可以采用 IEM 粗糙面模型计算(Fung, 1994)。水面上长方体的 SAR 成像机理与地面上建筑物模型类似(Xu & Jin, 2006)。由于忽略了桥身的复杂结构, 在计算散射时通过增加长方体表面的粗糙度来增强来自桥身的散射。

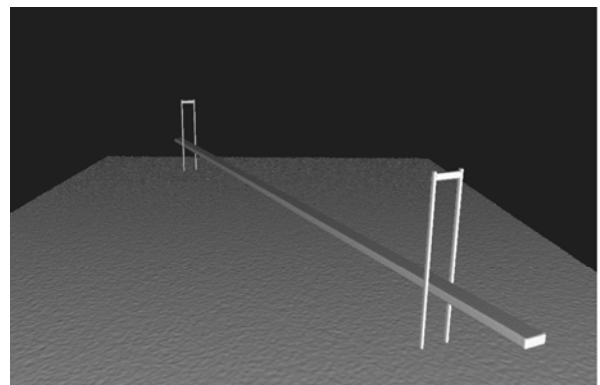


图 3 桥梁模型

对图 3 的桥梁模型进行 SAR 成像的 MPA 模拟, 所采用的 SAR 及飞行轨道的参数与真实 Pi-SAR 参数一致。模拟的 SAR 图像的总功率图如图 4(a)。从模拟计算和图上可以清晰看出桥身各散射项的分布以及桥墩的像。桥身呈现在模拟 SAR 图像上的散射像与前面对单次、二次、三次散射的分析预计是一致的, 即先由桥身本身的直接(一次)散射, 然后是较强的桥身与水面的二次散射, 紧接着是三次散射以及部分桥身的阴影。

将该模拟图像的 3 个分量并合成伪彩色图(其中 R: HH+VV, G: HV+VH, B: HH+VV), 如图 4(b)。可以看出, 除了桥身及桥墩与水面的二次散射外, 其他散射多呈现蓝色即奇数次散射特性。而桥身的二次散射呈红色, 注意到该二次散射存在两条线状的像, 这是由于桥面与雷达飞行方向成一定角度, 使得模型中桥身与水面构成的 2 种二次散射机制(桥面反射 + 水面散射, 水面反射 + 桥面散射)的路径存在一定的差异, 最终成像位置出现分离。但在实际 SAR 图像中 2 种散射的分离不会如此明显。

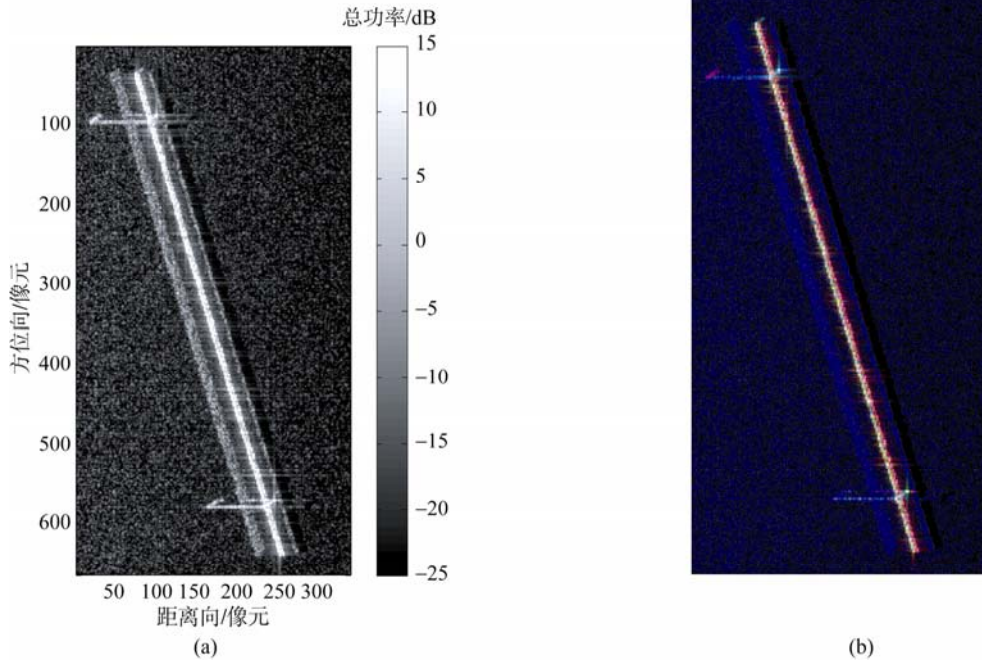


图4 大桥 SAR 成像模拟

(a) 模拟 SAR 图像的总功率图; (b) 模拟 SAR 图像三分量伪彩色图

4 Pi-SAR 图像的去取向分类参数

全极化 SAR 数据中散射矩阵 S 包含目标所有散射信息, S 为 2×2 维复矩阵。若将 S 矢量化, 可有“Pauli 展开”和“直序(Lexicographic)展开”(Oliver & Quegan, 1998), 采用“Pauli 展开”, 可得:

$$\mathbf{k}_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{hh} + S_{vv} & S_{hh} - S_{vv} & 2S_x \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

式中, 上标 T 表示转置, 下标 h 和 v 分别表示水平极化和垂直极化, 其中第一个表示入射极化, 第二个表示接收极化。 x 表示交叉极化, 一般满足 $S_x = S_{hv} = S_{vh}$ 。

去取向理论将目标旋转一定角度 ψ_m , 使新的目标散射矢量中的交叉极化分量达到最小, 以消除目标随机取向对目标分类的影响, 凸显目标本体特性。这样, 随机取向的 2 个同类目标通过去取向运算, 它们的散射信息应趋于一致, 视为同类。

由去取向旋转后的散射矢量 $\mathbf{k}'_p$ 定义了

$$\begin{cases} a = \tan^{-1}(|S'_{vv}|/|S'_{hh}|) \\ b = \frac{1}{2} \arg(S'_{vv}/S'_{hh}) \\ c = \cos^{-1}(\sqrt{2}|S'_x|/\|\mathbf{k}'_p\|) \end{cases} \quad (3)$$

式中, a 表示去取向后同极化散射 S'_{vv} 和 S'_{hh} 的模值

比; b 表示 S'_{vv} 和 S'_{hh} 之间的相位差; c 表示交叉极化的大小。根据 Xu & Jin (2005) 分析, 定义新的分类参数:

$$\begin{cases} u = \sin c \cos 2a \\ v = \sin c \sin 2a \cos 2b \\ w = \cos c \end{cases} \quad (4)$$

其中, w 反映交叉极化与同极化的相对大小; 在交叉极化较小时(此时 $\sin c \rightarrow 1$); u 反映了 2 个同极化分量的相对大小; v 反映了在 2 个同极化分量相对大小可比时($\sin 2a \rightarrow 1$)的相位差。参数(u, v)不但包含 Pauli 展开解析参数 α 所含信息, 还能提供散射机制的特征信息, 因此用新分类参数(u, v)得到新分类谱。本文用参数 v 来区分桥梁单次、两次和三次散射。

机载 Pi-SAR 是日本情报通信研究机构(NICT)和宇宙航空研究开发机构(JAXA)联合开发出来的 SAR 系统, 该系统装有 2 个 X 波段(9.55GHz)天线和一个 L 波段(1.27GHz)天线, 能提供全极化和干涉的 X 波段数据和全极化的 L 波段数据(Kobayashi, 2000)。对于 Pi-SAR 图像, 方位向 4 视图情况下, X 波段和 L 波段的分辨率分别为(方位向 $\times$ 距离向) $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 和 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 。

图 5 为日本鸣门大桥照片, 桥面距水面为 45m, 桥长 1629m, 桥宽 25m, 主塔高度 144.3m, 两主塔

间距离 876m, 桥分上下两层, 上层是 4 车道公路, 下层为铁路, 大桥为钢构造桁架。



图 5 日本鸣门大桥照片(该大桥连接本州岛与四国岛)

图 6(a), (b), (c)为日本鸣门大桥 Pi-SAR 全极化 X-波段 HH、VV、HV 图像, 采集于 2004-11-07。方位向是从上往下, 距离向为从左到右。

桥梁部分的同极化图像强度要明显高于交叉极化图像, 海面同极化回波也高于交叉极化, VV 要高于 HH, 这是可预期的。图像右上侧孤立的长方形目标为船舶, 右下角为陆地。主塔所成图像亮度很高, 悬索呈现许多亮点, 特别是 HV 图像中悬索成像要比同极化图像清晰, 这是因为悬索接头部分与 H 和 V 极化方向成一定角度, 交叉极化明显。还可发现主塔中类似 X 型的结构在 HV 图像中也较同极化图像清晰, 特别是图像下侧的主塔, 在 HV 图像中靠肉眼就能分辨出有 X 型结构。由于旁瓣效应, 造成桥梁主塔部分有明亮横线贯穿 HH 和 VV 图像, HV 图像强度较低而不易看出。

对 Pi-SAR 数据经特征矢量去取向转换(Xu & Jin, 2005), 得到分类参数 u, v, w , 如图 7(a)~(c)所示。在 u 图像中, 三次散射显示为蓝色, 单次和两次散射不

易区分。在 v 图像中, 奇数次散射显示为黄色和红色, 偶数次散射是显示为蓝色, 各类型散射能被区分出来, 因此本文采用 v 图像来构造类似图 4 的结果, 进而反演桥高 H 。 w 表示交叉极化与同极化的相对大小, 吊索在 w 图像中就特别明显。

采用滤波和聚类算法处理 v 图像。首先采用中值滤波法进行滤波, 采用 3×3 像元的窗口进行。滤波后, 用聚类算法进行处理。聚类滑动窗口大小设为 5×5 像元, 在此窗口内判断发生单次、两次和三次散射次数, 将滑窗中心像元点的散射特性设为发生次数最多的散射机制。最后将单次、两次和三次散射分别用绿色、红色和蓝色表示, 如图 7(d)。这里我们去除了海面船只和海岸图像。

根据上一节模拟仿真和 SAR 图像特征矢量去取向参数的分析, 可以得出结论: 从 SAR 图像近距到远距依次发生的主要散射分别为单次、两次和三次。最左边两条复合线是桥体厚度造成的单次散射。

图 7(d)中二次和三次散射成像线条宽度有几个像元点, 这里取中心作为测量基准。桥梁宽度 d 可由图 5(c)图或图 4 中(c)图反演, 两者反演结果一致。

表 1 为桥梁反演结果与实际数据的对比, 其中 h_s 没有实测数据。 H 反演误差为 3.8 m, 还是相当满意的。误差的可能原因主要在于: (1) SAR 图像分辨率 1.5 m, 比较粗。若能进一步提高分辨率, 反演精度会提高; (2) 复杂桥结构产生的散射图像实际上要比图 1 几何射线描述的复杂得多。而桥梁宽度反演似较高, 是由于细吊索产生的散射图像比较单一, 容易辨别。

表 1 桥梁实测参数与 SAR 图像反演结果比较

	H/m	h_s/m	d/m
实测数据	45	无	25
反演结果	48.8	10.1	25.7

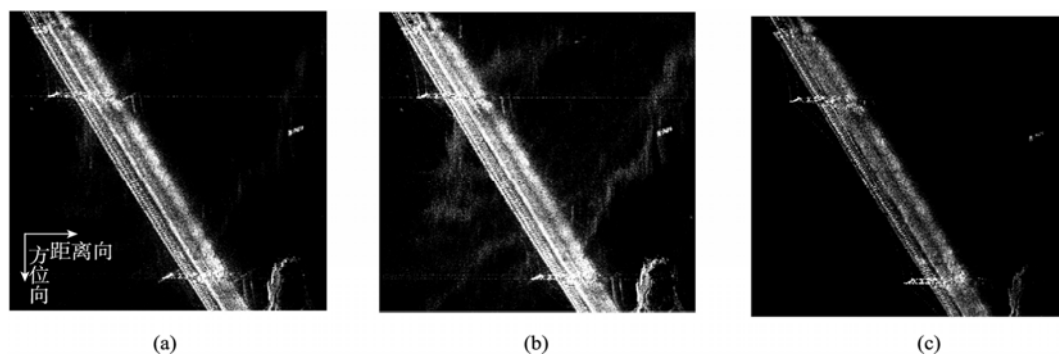


图 6 日本鸣门大桥 Pi-SAR X 波段 HH(a), HV(b), VV(c)幅值图像
中心点入射角为 41.8° , 中心位置($134^\circ 38'E$, $34^\circ 14'N$)

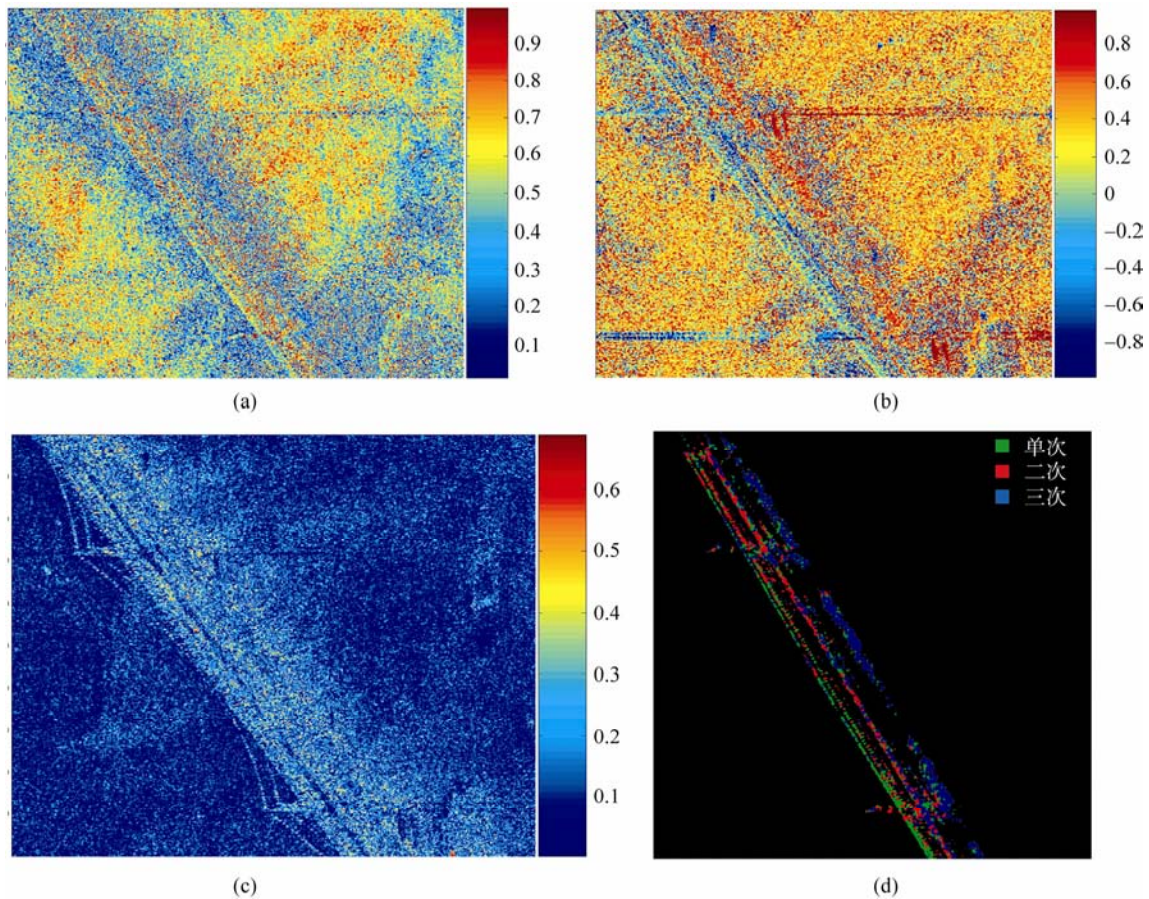


图 7 分类参数 u (a), v (b), w (c) 图像以及 v 图像滤波、聚类结果 (d)
(一次、两次和三次散射分别用绿、红和蓝色表示)

5 ALOS SAR 图像对东海大桥桥面高的反演

图 8 的东海大桥是中国第一座跨海大桥, 全长约 32km, 桥宽 31.5m, 大桥的最大主通航孔离海面净高达 40m。



图 8 东海大桥照片

2006 年 1 月, 日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 发射 ALOS 卫星, 携带 PALSAR 的 L 波段 (1.27 GHz) SAR 系统。PALSAR 有全极化、扫描和高分辨率 3 种工作模式, 其中高分辨率模式下又有单极化工作或双极化工作 2 种情况 (JAXA, 2007)。PALSAR 的最高距离向分辨率在单极化模式下为

7m, 双极化模式为 14m, 全极化模式下为 24m。本文用单极化 PALSAR 数据反演东海大桥 H , 旨在给出一种用单极化数据反演 H 的算法。

图 9 为 ALOS-PALSAR 的东海大桥极化 HH 图像, 采集于 2007-02-22, 入射角为 39.3°, 卫星飞行方向为从左到右, 距离向为从上到下。图像方位向和距离向分辨率分别为 4.0m 和 4.7m, 受分辨率的限制, 桥梁图像不是十分清晰。本文分析数据由图中白色方框标出, 包括 2 个主塔。在进行参数反演前, 先采用滤波分析并进行线条检测。

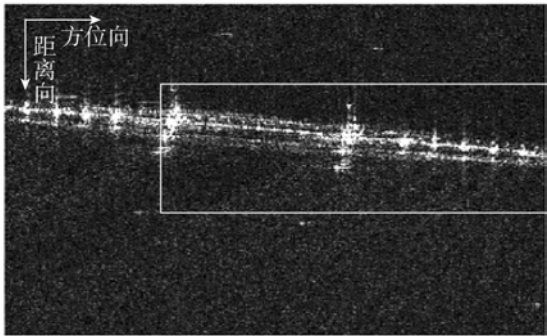


图 9 东海大桥 ALOS-PALSAR HH 极化图像, 中心点入射角为 39.3°, 图像中心经度为 121°97'E, 纬度为 30°73'N。

为消除噪声影响,更精确地检测出线条,先采用细化算法(Xu & Jin, 2007)。细化算法是采用滑动窗口的方法,根据窗口内图像强度相对大小判断像元是否在直线上,如果在直线上像元值就保留,否则清零。原理是根据直线上点的像元值要比相邻非直线上点的像元值大,根据直线穿过滑窗的情况具体分析。

在图像细化的结果上,进行 Hough 变换直线检

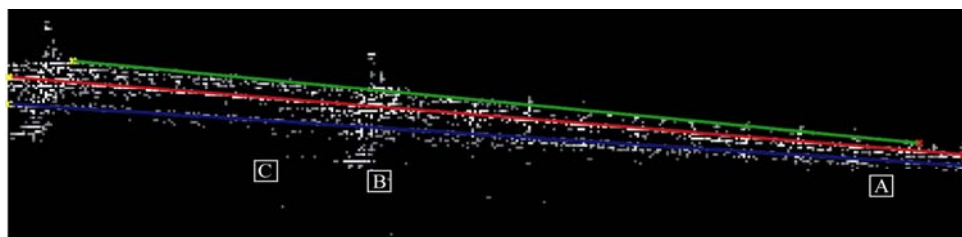


图 10 图 9 的线条检测结果
(图中 A、B、C 处反演桥面高度)

表 2 为东海大桥 A、B 和 C 3 处 H 值反演结果。据资料,东海大桥桥面最高处为 40m,与 C 处相近,A 和 B 位置实测数据是通过实地考察估算结果,和真实值有几米的误差。

表 2 图中 A、B、C 处桥面高度反演

	位置 A	位置 B	位置 C
实测数据/m	15	35	40
反演结果/m	17.8	38.6	44.6

由式(1),桥面高反演误差 $\delta H = \delta(\Delta g) \tan \theta + \Delta g \frac{1}{\cos^2 \theta} \delta \theta$, 取 $\theta = 40^\circ$, $\delta \theta = \pm 5^\circ$, 可见误差 $\delta H \approx 0.84\delta(\Delta g) + 0.15\Delta g$ 。这样,桥面高反演误差 δH 与 Δg 测量值相当,在米级分辨率条件下 δH 有几米的误差。提高分辨率,改善 Δg 的测量,是提高桥面高的反演精度的方法。

6 结 论

本文用桥梁散射的几何射线描述,采用全极化 SAR 图像特征矢量去取向分类参数,分辨 SAR 图像中桥梁目标单次、两次和三次散射。利用两次和三次散射回波像的细化与 Hough 变换检测出单次、二次和三次散射的位置线图像,用来反演桥面高度。用 Pi-SAR X 波段全极化日本鸣门大桥图像进行了反演,并与实际数据进行了比较。桥面高 H 的实际反演误差为 8.4%,桥宽 d 的反演误差仅为 2.8%。进一步地,将 SAR 数据分析结论用在单极化数据上。用单极化 ALOS-PALSAR 数据,反演了中国东海大

测。按前述分析 桥梁在 SAR 图像上成像为 3 条明显的线,检测结果如图 10。根据散射机理,用绿色、红色和蓝色分别代表单次、两次和三次散射。可以看出,图 10 中 3 条线并不是等距的,这是因为该段桥梁有一定坡度,随着桥梁距水面高度增加,反映在 SAR 图像上就是线条直接距离加大。这样和实际情况相符:2 个主塔之间 H 最大,即从图像右边到左边 H 值逐步增加。

桥桥面高度。结果表明,东海大桥 H 值和实际数据相符。 H 的反演精度主要受 SAR 分辨率的影响。

致 谢 本文所用 X 波段 Pi-SAR 数据和 L 波段 ALOS-PALSAR 数据分别由日本的情报通信研究机构(NICT)和宇宙航空研究开发机构(JAXA)按合作协议(通信作者为 PI No.310)提供。

REFERENCES

- Fung A K. 1994. Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications. Boston: Artech House
- JAXA, <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/about/palsar.htm>. (2007-12-01)
- Kobayashi T, Umehara T, Satake M, Nadai A, Uratsuka S, Manabe T, Masuko H, Shimada M, Shinohara H, Tozuka H and Miyawaki M. 2000. Airborne dual-frequency polarimetric and interferometric SAR. *IEICE Trans. Commun.*, E **83**—B(9): 1945—1954
- Oliver C and Quegan S. 1998. Understanding Synthetic Aperture Radar Images. London: Artech House
- Ouchi K. 2004. Principles of synthetic aperture radar for remote sensing. Tokyo: Tokyo Denki University Press
- Robalo J and Lichtenegger J. 1999. ERS-SAR Images a Bridge. <http://esapub.esrin.esa.it/eqq/eqq64/bridge.pdf>. (2007-12-01)
- Roth A, Eineder M and Schaettler B. 2003. SAR interferometry with TerraSAR-X. Frascati, Italy: ESA Workshop Fringe
- Xu F and Jin Y Q. 2006. Imaging simulation of polarimetric SAR for a comprehensive terrain scene using the mapping and projection algorithm. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **44** (11): 3219—3234
- Xu F and Jin Y Q. 2005. Deorientation theory of polarimetric scattering targets and application to terrain surface classification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **43** (10): 2351—2364
- Xu F and Jin Y Q. 2007. Automatic reconstruction of building objects from multiaspect meter-resolution SAR images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **45** (7): 2336—2353