

中图法分类号: TP75 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)11-1989-07

论文索引信息: 史磊, 李平湘, 杨杰. 极化方位角对 Yamaguchi 参数分解的影响 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(11): 1989-1995

# 极化方位角对 Yamaguchi 参数分解的影响

史磊, 李平湘, 杨杰

(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

**摘要:** 以极化方位角估计为基础, 对由方位向地形引起的极化分解误差进行深入探讨, 详细分析方位向地形对 4 参数 Yamaguchi 分解的影响, 同时利用全极化 SAR 方位角估计减少地形因素带来的影响。最后, 利用 AIRSAR 系统于 1992 年在 San Francisco 地区的全极化数据进行实验分析。实验结果表明, 利用极化方位角补偿的方法, 可以改善 Yamaguchi 分解的精度。

**关键词:** 全极化 SAR; 极化方位角; 方位向坡度; Yamaguchi 参数分解

## Affection of polarimetric orientation angle for yamaguchi model decomposition

Shi Lei, Li Pingxiang, Yang Jie

(The State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing of Wuhan University, Wuhan 430079 China)

**Abstract:** Based on the polarimetric orientation angle estimation, we discuss the decomposition error caused by the azimuth slope. We analyze the azimuth slope effects on the Yamaguchi model, and use the polarimetric SAR azimuth estimation to reduce the terrain effect. Finally, we apply this approach to a full polarimetric AIRSAR image of San Francisco from 1992. The experiments show that the polarimetric orientation angle composition could improve the precision of the Yamaguchi model.

**Keywords:** polarimetric SAR; polarimetric orientation angle; azimuth slope; Yamaguchi model decomposition

## 0 引言

极化合成孔径雷达 (POL SAR) 作为 SAR 的新发展方向, 已经成为目前 SAR 研究的热点。极化信息与地物散射特性密切相关, 使得极化 SAR 越来越多的应用到目标特性提取、地物分类等领域; 同时, 随着电子硬件技术的成熟, 获取的极化数据可靠性越来越高, 研究人员也对定量提取地物极化散射特性等方面产生了浓厚兴趣。

1989 年 Durden 与 VanZyl 等人<sup>[1]</sup>提出了森林地区的极化信号建模; 1998 年, Freeman 与 Durden<sup>[2]</sup>在前人研究的基础上, 建立了一种 3 分量散射机理模型分解方法, 将极化信息分解为表面散射、双次散射、体散射; 作为非相干分解的代表方法之一, 基于物理散射模型的 Freeman-Durden 分解在保持地物散射机理方面相对于 Lee 等人提出的 H/a/A 分解<sup>[3-5]</sup>具有更良好的表现。2005 年, Yamaguchi 等人<sup>[6]</sup>在 Freeman-Durden 的研究基础上, 针对城区环境, 将互对称条件无法满足的部分分解为螺旋体分

收稿日期: 2010-05-12; 修回日期: 2010-12-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (60890074, 40523005); 国家高技术发展研究计划 (863) 项目 (2009AA12Z145); 中央高校基本科研业务费专项基金项目 (20106190201000158)。

第一作者简介: 史磊 (1986—), 男。武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室摄影测量与遥感专业硕士研究生, 主要研究方向为极化干涉合成孔径雷达图像处理。E-mail: comefromshilei@sohu.com。

量,在城市地区地物分类方面取得了很好的效果。任何一种极化目标分解方法都希望从散射矩阵中尽可能多地获取极化散射信息。然而,由于 SAR 特殊的斜距成像机理,地形因素对其造成了很大影响。在距离向上,叠掩与阴影的存在使得目标的解译更加困难;在方位向上,地形坡度使得极化系统量测的极化信息产生了一定偏移。对于前者,目前主要采用外部 DEM 来削弱叠掩与阴影的影响<sup>[7-9]</sup>;而对后者而言, Lee 提出利用极化自有信息来削弱方位向坡度影响,也得到了较好的效果<sup>[10-12]</sup>,但是所受到的关注较少。

目前,涉及地形因素对极化目标分解影响的研究较少。本文在 Lee 与 Yamaguchi 等人的研究基础上,详细分析地形因素对 Yamaguchi 分解的影响,并对补偿前后 Yamaguchi 的分解结果进行对比分析,发现极化补偿提高 Yamaguchi 分解的精度与合理性,证明极化方位角补偿在 Yamaguchi 分解中产生的重要影响以及实施补偿的必要性。

## 1 极化方位角对极化特征分解的影响及补偿

### 1.1 极化方位角对极化相干矩阵的影响

POLSAR 系统发射水平极化波与垂直极化波,经过地物反射后,接收水平极化波与垂直极化波,通过对发射接收电磁波的量测得到散射矩阵  $S$ 。当电磁波在空中传播时,若地面为水平,则水平极化波与地面平行,地面法向量与垂直极化波位于入射平面内,则极化信息不受方位向坡度的影响;若地面发生倾斜,地表法向量绕  $Y$  轴发生偏移(如图 1 所示),量测到的回波极化状态( $HH$ 、 $VV$ 、 $HV$ 、 $VH$ )都会受到影响。

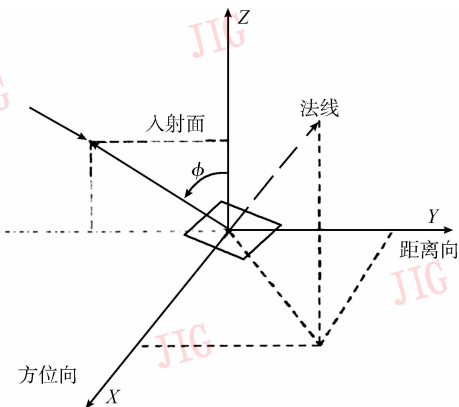


图 1 极化方位角与地形坡度几何关系

Fig. 1 The geometry relation between polarization orientation angle and the terrain slope

Lee 推导了地形坡度与极化方位角的相互关系<sup>[10]</sup>,同时提出,极化方位角可以进行地形估计,也可以利用极化方位角对散射矩阵进行地形影响的补偿。极化方位角与地形坡度关系如下

$$\tan \theta = \frac{\tan \omega}{-\tan \gamma \cos \phi + \sin \phi} \quad (1)$$

式中,  $\theta$  为极化方位角,  $\omega$  为方位向坡度,  $\gamma$  为距离向坡度,  $\phi$  为雷达入射角。

这种因地形影响受到的极化偏移,实质上是水平-垂直极化基沿视线进行某个角度的旋转。

$$\mathbf{T}' = \mathbf{RTR}^T \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{T}$  为不受方位向坡度影响的极化相干矩阵,  $\mathbf{T}'$  为旋转的极化相干矩阵,其中

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 1.2 极化方位角对 Yamaguchi 分解的影响

由于极化方位角偏移的影响,量测到的极化相干矩阵会对极化参数分解造成影响。为了讨论偏移带来的影响,本文利用 Yamaguchi 提出的 4 参数分解进行分析。将式(2)展开如下

$$\begin{aligned} T'_{11} &= T_{11} \\ T'_{12\_Re} &= T_{12\_Re} \times \cos(2\theta) + T_{13\_Re} \times \sin(2\theta) \\ T'_{12\_Im} &= T_{12\_Im} \times \cos(2\theta) + T_{13\_Im} \times \sin(2\theta) \\ T'_{13\_Re} &= -T_{12\_Re} \times \sin(2\theta) + T_{13\_Re} \times \cos(2\theta) \\ T'_{13\_Im} &= -T_{12\_Im} \times \sin(2\theta) + T_{13\_Im} \times \cos(2\theta) \\ T'_{22} &= T_{22} \times \cos^2(2\theta) + T_{23\_Re} \times \sin(4\theta) + \\ &\quad T_{33} \times \sin^2(2\theta) \\ T'_{23\_Re} &= 0.5 \times (T_{33} - T_{22}) \times \sin(4\theta) + \\ &\quad T_{23\_Re} \times \cos(4\theta) \\ T'_{23\_Im} &= T_{23\_Im} \\ T'_{33} &= T_{22} \times \sin^2(2\theta) - T_{23\_Re} \times \sin(4\theta) + \\ &\quad T_{33} \times \cos^2(2\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

Re、Im 分别表相干矩阵元素实部、虚部进行 Yamaguchi 参数分解,假设  $f_s, f_d, f_v, f_h$  为不受方位向坡度影响的奇次散射分量、偶次散射分量、体散射分量、螺旋体散射分量;  $f'_s, f'_d, f'_v, f'_h$  为受到地形影响的 4 个分量。

螺旋体分量

$$f'_h = 2 |T'_{23\_Im}| = 2 |T_{23\_Im}| = f_h \quad (5)$$

体散射分量

$$f'_v = \frac{1}{d} \left( T'_{33} - \frac{1}{2} f'_h \right) = \frac{1}{d} \left( T_{22} \times \sin^2(2\theta) - T_{23\_Re} \times \sin(4\theta) + T_{33} \times \cos^2(2\theta) - \frac{1}{2} f_h \right) \quad (6)$$

可将  $f_v$  从  $f'_v$  中抽出,并化简为

$$f'_v = f_v + V(\theta) \quad (7)$$

奇次、偶次散射项与  $\theta$  关系则较为复杂,都不是简单的线性关系,分别简化表示为

$$f_d = D(f_d, \theta), \quad f_s = S(f_s, \theta) \quad (8)$$

由上面 4 个公式可以得到以下两个结论:

1)螺旋体分量与极化方位角  $\theta$  无关。螺旋体分量的提出是为了解决 Freeman-Durden 分解中出现体散射分量小于 0 的情况,这些情况通常出现在城市区与部分森林地区,产生原因在于地物不满足对称条件,其大小取决于目标的复杂程度。螺旋体分量与极化方位角  $\theta$  无关使得螺旋体分量有很好的稳定性,在运用于城区探测时不会受到方位向地形的影响,具有很好的抗干扰能力。

2)体散射分量受到极化方位角影响表现在线性偏移量  $V(\theta)$  上, $V(\theta)$  是关于  $\theta$  的高次多项式,如不进行必要的补偿会对体散射分量的估计造成较大影响;奇次、偶次散射分量与极化方位角关系较为复杂,其影响都是  $\theta$  相关的高次函数,进行极化方位角补偿是必要的。

### 1.3 极化方位角补偿

在实际运用中,如果能够对极化方位角进行估计,对观测到的极化相干矩阵  $T'$  反向旋转  $\theta$  即可。2000 年, Lee 等人分别对 5 种常用的极化方位角估计方法进行了评估<sup>[10]</sup>。Lee 等人认为在 DEM 估计法<sup>[10]</sup>、极化信号法<sup>[13]</sup>、圆极化法<sup>[14-15]</sup>、Cloude-Pottier<sup>[3]</sup> 分解法与 Huynen<sup>[15-16]</sup> 分解法中,由于圆极化法不需要外部 DEM 数据的辅助,同时计算量小、原理简单,是理想的极化方位角估计方法。

左旋与右旋极化可以由线性极化基  $H-V$  进行线性变换得到

$$S_{LL} = (S_{VV} - S_{HH} + i2S_{HV})/2 \quad (9)$$

$$S_{RR} = (S_{HH} - S_{VV} + i2S_{HV})/2$$

$$\arg(S_{RR}S_{LL}) = \frac{1}{4} \times$$

$$\left( \arctan \left( \frac{-4\text{Re}[(S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^*]}{-|S_{HH} - S_{VV}|^2 + 4|S_{HV}|^2} \right) + \pi \right) \quad (10)$$

$$\theta' = \arg(S_{RR}S_{LL}^*) \quad (11)$$

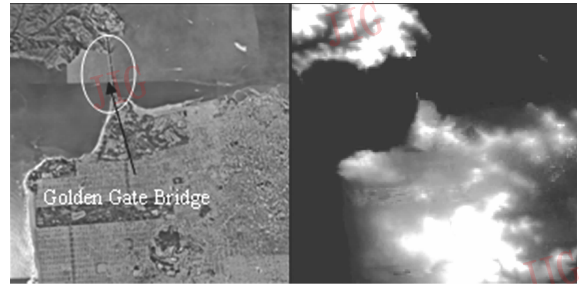
如果  $\arg(S_{RR}S_{LL}^*) > \pi/4$ , 则

$$\theta' = \arg(S_{RR}S_{LL}^*) - \pi/2 \quad (12)$$

$\theta'$  为需要进行补偿的极化方位角,其大小与  $\theta$  相同,但方向相反,因此直接将  $T'$  旋转  $\theta'$  即可完成补偿。

## 2 实验结果分析

采用 AIRSAR 系统 1992 年在 San Francisco 地区 Golden Gate Bridge 附近获取的 L 波段全极化 SAR 影像进行实验,影像分辨率为  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 。为了对实验区地物与地形有更深入了解,首先对图 2 所示实验区的光学影像与 DEM 数据进行对比分析,其中 DEM 数据来自 SRTM。如从光学影像上可以很直观地发现,实验区主要由水体(金门湾)、居民地(旧金山市区)、植被覆盖区(金门大桥南北两端、金门大桥下方长条状马球场等)3 个部分组成。



(a)可见光影像 (b)DEM影像

图 2 实验区示意图

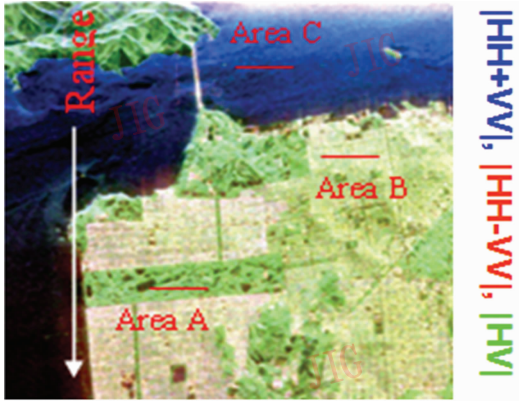
Fig. 2 The reference data set of test suit

而 DEM 影像反映:实验区下方地势较高同时有一定植被和居民地存在;金门大桥左方地形较为平缓,同时居民地建筑物结构较为简单;金门大桥右方地形有较大起伏,同时居民地建筑物结构相对于左边较为复杂。

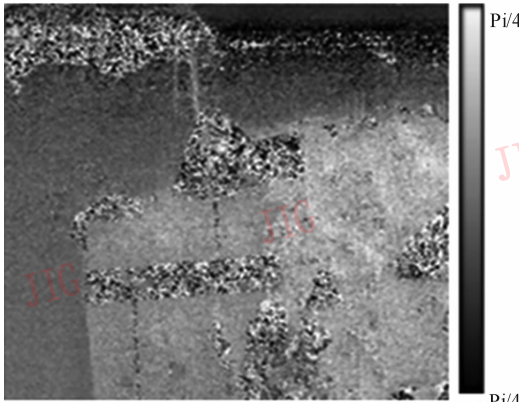
### 2.1 POLAR 影像与极化方位角影像

图 3 (a) 为极化 SAR 合成的 RGB 彩色影像,  $|S_{HH} + S_{VV}|$  为蓝光波段、 $2|S_{HV}|$  为绿光波段、 $|S_{HH} - S_{VV}|$  为红光波段。影像的垂直方向为雷达距离向,这意味着影像左上方的山体在雷达影像上会有较严重的压缩,甚至引起叠掩现象;在影像的右上方水域出现了亮度极高的区域,这是由于过于靠近雷达而造成的镜面反射,这些区域对极化目标分解是不利的。

图 3(b) 为用 Lee 提出方法求得的极化方位角影像, 与 DEM 影像进行对比可以发现, 在山地部分补偿角变化较大, 这与山地起伏大有关; 由于金门大桥左边地形相对于右边平坦、方位向坡度小且补偿角较小。从上面的分析可以看出, Lee 提出的极化方位角估计方法与 DEM 影像情况较为吻合, 证明其与真实地形是密切相关的。



(a) Pauli-RGB 影像



(b) 极化方位角影像/弧度

图 3 实验区 SAR 数据

Fig. 3 The SAR data of test suit

本文为了进行局部细节分析, 后续小节中对金门大桥下方植被覆盖区 (Area A)、右边居民地 (Area B)、金门大桥右方水域 (Area C) 取 3 个切面进行对比, 每个切面各取 100 个像素 (图 3 中红线部分)。为了比较每种散射分量补偿前后的变化程度, 定义如下 4 个变量。

体散射分量补偿差

$$Diff_{vol} = f'_v - f_v$$

螺旋体分量补偿差

$$Diff_{hlx} = f'_h - f_h$$

偶次散射分量补偿差

$$Diff_{dbl} = f'_d - f_d$$

奇次散射分量补偿差

$$Diff_{sur} = f'_s - f_s$$

$f_v, f_h, f_d, f_s$  与  $f'_v, f'_h, f'_d, f'_s$  分别为补偿前后体散射分量、螺旋体散射分量、偶次散射分量、奇次散射分量。

### 2.2 补偿前后体散射分量比较

体散射分量在 Yamaguchi 分解中是一个很重要的分量, 其主要目的是为了提取植被, 同时在城市居民地也有较为强烈的反应。

对图 4 及切面图图 5 分析发现: 3 个切面区域进行极化方位角补偿后, 体散射分量呈现下降趋势。这是由于方位向坡度的存在增加了交叉极化通道分量, 而其又是体散射分量的主要来源, 所以补偿后会出现体散射分量下降的现象。

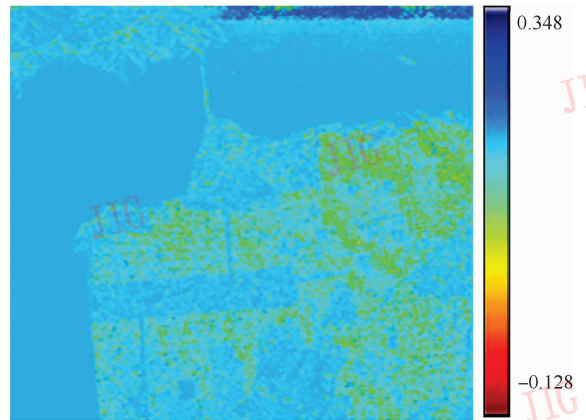


图 4 体散射补偿差影像

Fig. 4 The subtracted operation results on the volume-component

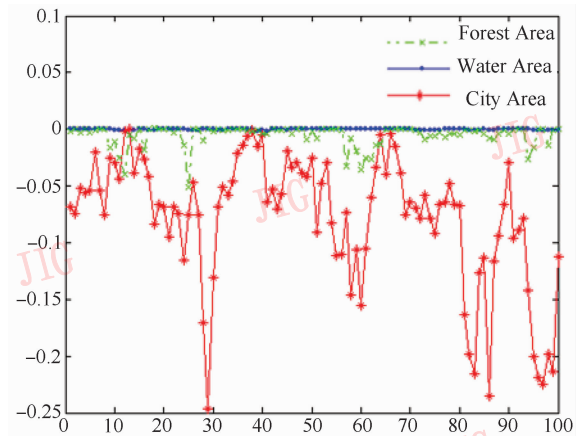


图 5 体散射补偿差影像切面图

Fig. 5 The transect-analyze results on the volume-component

由于 POLSAR 系统的极化总功率是恒定的,在进行极化方位角补偿后,可以预测,随着体散射分量的下降,偶次散射分量和奇次散射分量是增加的,增加总量与减少的总量应该是大致相当的,后面的实验证明了这个结论。

相对于居民地而言,植被地区体散射分量受到方位向地形坡度的影响较小。结合 RVOG 两层植被模型,可以解释为:作为体散射主要来源之一的植被层即使生长在斜坡上,树枝、树叶等部位仍然正常生长,不会发生倾斜;偏移主要源于倾斜地面与树桩构成的二面角,后面偶次散射分量补偿实验证明了这一点。

作为体散射分量,受到极化方位角偏移影响的区域更多发生在居民地中。对图 4 与图 5 分析可以发现,补偿后体散射分量变化最多的地方发生在城区;地形起伏变化越大,体散射分量补偿越大;补偿后的体散射分量通常比补偿前要小,也就是说方位向地形起伏会增大居民地的体散射分量。

### 2.3 补偿前后螺旋体散射分量比较

在 Yamaguchi 的分解理论中,从极化相干矩阵中第一个分离出的变量是螺旋体分量,然后分解出体散射分量,后面每一个分量在分解时需要减去螺旋体分量的影响。实验结果表明,绝大多数区域在补偿前后螺旋体分量是没有发生变化的;然而,有少量区域在补偿前后发生了变化,实际上这与本文所述并不矛盾,前面的数学推导证明了螺旋体分量不受极化方位角偏移影像影响的结论。但是事实表明,在少部分区域会出现螺旋体分量与体散射分量之和大于极化总功率,与实际物理意义不相符。在实际分解中 Yamaguchi 提出下面限制:若螺旋体分量与体散射分量之和大于极化总功率,则视螺旋体分量为 0,采用常规的 Freeman-Durden 分解;反之,则继续分解出奇次散射与偶次散射。所以实际上螺旋体散射分量的分解会受到体散射分量的影响。这些异常的区域往往出现在较为复杂的城区、镜面反射较为严重的区域(图 6 影像上方水域部分)。

### 2.4 补偿前后偶次散射分量比较

偶次散射即二面角散射,通常出现在建筑物与地面形成的夹角、树干与地面形成夹角、水体与斜坡形成的夹角等。

对图 7 及切面图图 8 分析可以得出,水体在补偿前后几乎没有变化。植被区域有相当程度的补偿,补偿量大致与体散射补偿相当,但符号相反,这

证明了植被区域的偏移主要源于倾斜地面与树桩形成的二面角。

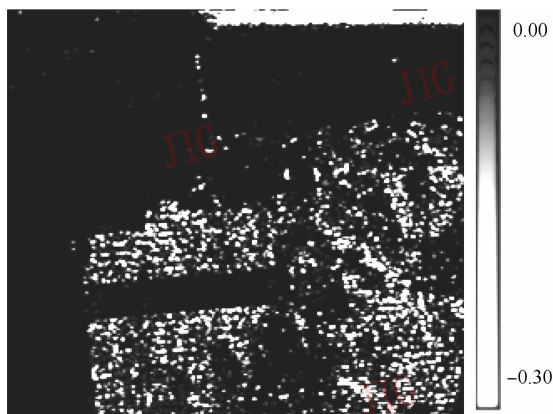


图 6 螺旋体散射补偿差影像  
Fig. 6 The subtracted operation results on the helix-component

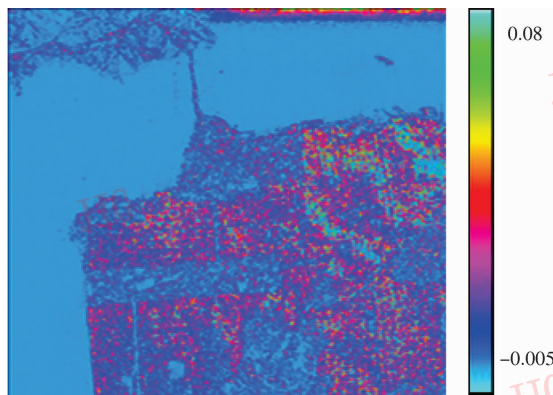


图 7 偶次散射补偿差影像  
Fig. 7 The subtracted operation results on the double-component

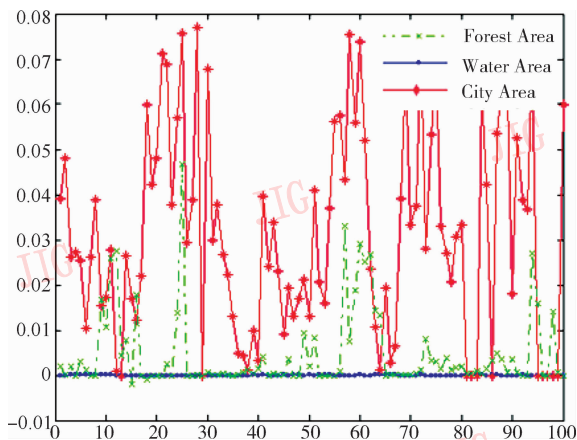


图 8 偶次散射补偿差影像切面图  
Fig. 8 The transect-analyze results on the double-component

补偿量最大的区域主要在居民地,尤其是金门大桥右边的居民地,这是因为金门桥右边地形起伏比左边大。通过观察可以发现,补偿后的偶次散射分量相对于补偿前主要是增大的,换言之,方位向地形起伏会使居民地与植被区域的偶次散射分量减小。

### 2.5 补偿前后奇次散射分量比较

奇次散射即面散射,通常出现在具有一定粗糙度的平面上,例如,有一定风浪影响的水面、裸露的土地等。图 9 反映水体作为奇次散射的代表之一,由于不存在地形影响,所以在补偿前后几乎没有变化。

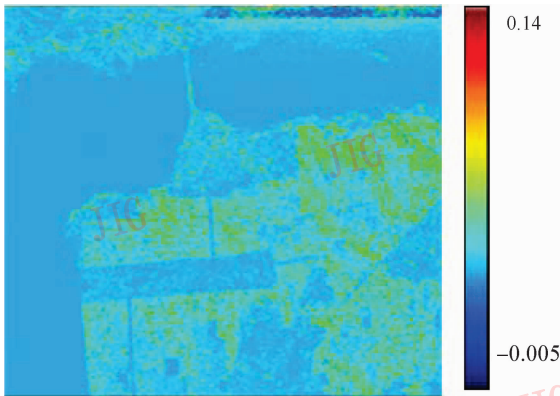


图 9 奇次散射补偿差影像  
Fig. 9 The subtracted operation results on the odd-component

对切面图 10 分析表明,补偿量最大的区域主要在城市居民地。同时,植被区域的奇次散射很小,甚至接近于 0。这可以理解为:相对于 L 波段,植被区

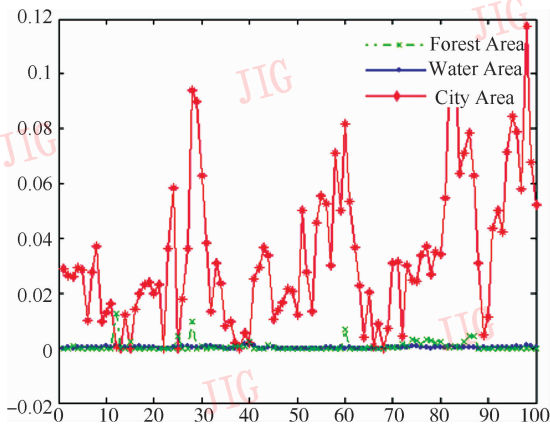


图 10 奇次散射补偿差影像切面图  
Fig. 10 The transect-analyze results on the odd-component

域主要表现为体散射与偶次散射,而奇次散射分量则很小,即使考虑到地形引起的极化方位角补偿后,植被区域的奇次散射分量仍然很小。可以发现,补偿后的奇次散射分量相对于补偿前主要是增大的,换言之,方位向地形起伏会使奇次散射分量减小。

### 3 结 论

在实现极化方位角补偿的基础上,推导了方位向地形起伏对 Yamaguchi 4 参数分解的影响,并通过实验得到如下结论:1) 螺旋体分量是方位角旋转不变量,无论在水域、城区还是林地,螺旋体分量在极化方位角补偿前后不变;2) 体散射分量会受到方位向地形的影响,方位向坡度会使得体散射分量增大,对不同目标影响程度从小到大为水域,植被,居民地;3) 偶次散射分量也会受到地形影响,方位向坡度会使得偶次散射分量减小,对不同目标影响程度从小到大为水域,植被,居民地;4) 奇次散射分量也会受到地形影响,方位向坡度会使得奇次散射分量减小,对不同目标影响程度从小到大为水域,植被,居民地。

从上面的结论可以看出,植被受到方位向坡度的影响相对于居民地较小;城区由于结构的复杂,受方位向坡度的影响较大,两者的相互关系还有待更深入的研究。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Durden S L, VanZyl J J, Zebker H A. Modeling and observation of the radar polarization signature of forested areas [ J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1989, 27(5) : 290-301.
- [ 2 ] Freeman A, Durden S L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data [ J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1998, 36(5) : 963-973.
- [ 3 ] Lee J S, Grunes M R, Ainsworth T L, et al. Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier [ J]. IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing, 1999, 37(9) : 2249-2257.
- [ 4 ] Ferro-Famil L, Pottier E, Lee J S. Unsupervised classification of multi-frequency and fully polarimetric SAR images based on the H/A/a Wishart classifier [ J]. IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing, 2001, 39(11) : 2332-2342.
- [ 5 ] Ferro Famil L, Pottier E, Lee J S. Unsupervised classification and analysis of natural scenes from polarimetric interferometric SAR data [ C ] // Proceedings of IGARSS Australia. Sydney, USA: IEEE Piscataway Publications, 2001 : 2715-2717.

- [ 6 ] Yamaguchi Yoshio, Toshifumi Moriyama, Motoi Ishido, et al. Four component scattering model for polarimetric SAR image decomposition [ J ]. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 2005, 43(8) : 1699-1705.
- [ 7 ] Curlander J C, Thomas L Ainsworth. Location of space-borne SAR imagery [ J ]. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 1982, 20(7) : 359-364.
- [ 8 ] Walter Gkropatsch, Dieter Strobl. The generation of SAR layover and shadow maps from digital elevation models [ J ]. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 1990, 28(6) : 98-107.
- [ 9 ] David Pairman, Stephen McNeill. Efficient calculation in the map domain of SAR layover and shadow masks [ C ] // Proceedings of IGARSS. Singapore. USA: IEEE Piscataway Publications, 1997 : 2057-2059.
- [ 10 ] Lee J S, Dale L Schuler, Thomas L Ainsworth. Polarimetric SAR data compensation for terrain azimuth slope variation [ J ]. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 2000, 38(9) : 2153-2163.
- [ 11 ] Lee J S, Dale L Schuler, Thomas L Ainsworth, et al. On the estimation of radar polarization orientation shifts induced by terrain slopes [ J ]. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 2000, 40(6) : 30-40.
- [ 12 ] Lee J S, Dale L Schuler, Thomas L Ainsworth. Surface roughness and slope measurements using polarimetric SAR data [ J ]. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 2002, 40(3) : 687-698.
- [ 13 ] Krogager E. Aspects of polarimetric radar imaging [ D ]. Denmark; Denmark University, 1993.
- [ 14 ] Krogager E, Czyz Z H. Properties of the sphere, diplane, and helix decomposition [ C ] // Proceedings of 3th International Workshop on Radar Polarimetry. France, Nantes, IEEE Piscataway Publications, 1995 : 106-114.
- [ 15 ] Cloude S R, Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry [ J ]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1996, 34(3) : 498-518.
- [ 16 ] Huynen J R. Phenomenological Theory of Radar Targets [ D ]. Delft; Delft Technical University, 1970.