

文章编号: 0253-2239(2005)04-460-5

基于分支设置的质量导引相位展开算法*

路元刚^{1,2} 王向朝¹ 何国田¹ 钟向红¹ 郑德锋¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 二维相位展开方法是近年来较为活跃、引起关注的一个研究课题,它在许多测量应用中有着重要的作用。尽管掩膜阻断算法在多个领域都有成功应用实例,该算法存在着固有的缺陷。为了克服掩膜阻断算法的缺陷,综合分支阻断方法和质量导引方法的优点,提出一种基于分支设置的质量导引相位展开新算法。它先以一个初始质量图来引导分支的设置,然后把分支对应的相位质量设置为最低,从而产生一个新的质量图,最后按新质量图来引导相位展开,并使用几个包裹相位图来验证此方法的有效性。计算机模拟相位图 and 实际相位图的相位展开结果表明,在存在复杂轮廓不连续和高噪声的情况下,该算法优于模板阻断算法,能得到较好的相位展开结果。

关键词: 信息光学; 图像处理; 三维测量; 干涉术; 相位展开

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A

Quality-Guided Phase Unwrapping Method Based on Placement of Branch Cuts

Lu Yuangang^{1,2} Wang Xiangzhao¹ He Guotian¹ Zhong Xianghong¹ Zheng Defeng¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: Two-dimensional phase unwrapping method is an active and interesting subject, and plays important roles in a great number of measurement applications. Although mask cut algorithm is successful in some applications, the algorithm has its own drawbacks. In order to overcome the drawbacks of the mask cut algorithm that exists in some successful applications, a new two-dimensional quality-guided phase unwrapping algorithm, based on the placement of the branch cuts, is proposed. The new algorithm combines the advantages of the residue-compensation algorithms and those of the quality-guided ones. In the algorithm, an initial quality map of the wrapped phase image is firstly used to guide the placement of the phase unwrapping. Then the minimum quality value is assigned to pixels that belong to the branch cuts to generate a new quality map. Finally, the new quality map is used to guide the phase unwrapping process. The algorithm has been tested by use of several wrapped images. Computer simulation and experimental results make it clear that the proposed algorithm works more effectively than the mask cut algorithm even when complicated discontinuities and high levels of noise exist in the wrapped phase images.

Key words: information optics; image processing; 3D measurement; interferometry; phase unwrapping

1 引 言

二维相位展开是光学干涉测量、干涉合成孔径雷达、自适应光学、固体物理和医学磁共振图像处理等领域的研究热点之一^[1]。这些领域中,研究对象的信息以相位表示,相位通过反正切函数计算得到,被包裹在 $[-\pi, \pi]$ 主值区间内,需利用相位展开技

术重建研究对象对应的真实相位^[2,3]。由于轮廓不连续、噪声、条纹欠采样等因素,相位展开较为困难。为此,人们提出了多种相位展开方法^[4],可归纳为路径积分和最小范数两类方法^[5]。

路径积分方法通过沿一定的路径对包裹相位图积分,来重建真实的相位轮廓^[6]。它又可分为三个

* 上海市科技发展基金(011461060)资助课题。

作者简介: 路元刚(1977~),男,安徽阜阳人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事光学干涉测量和数字图像处理的研究。E-mail: lu_yuangang@siom.ac.cn

收稿日期: 2004-04-19; 收到修改稿日期: 2004-07-15

子类^[7]：路径相关方法、分支阻断方法和质量导引方法。路径相关方法^[8]使用预先确定的积分路径，如逐行、逐列或螺旋线方式扫描整个包裹相位图。该类方法速度快，但噪声免疫性差，只能用于低噪声图像的相位展开。分支阻断方法^[9,10]把包裹相位图中的残差点以分支互连来平衡残差极性，并使积分路径不通过分支，在分支以外的区域按任意路径进行相位展开。但由于分支设置的复杂性，这类方法的效果依赖于分支设置方法。质量导引方法^[11~13]使用一个表征包裹相位质量的质量图来引导相位展开。它先从相位图中质量最高的像素开始，按相位质量由高到低的次序逐步对相位图进行路径积分。尽管这种方法在实际应用中有较好的鲁棒性，但由于它不设置用以平衡残差点的分支，积分路径可能会环绕一个没有被平衡的残差点，从而导致相位展开的错误。

1996年 Flynn 提出了一种新的分支阻断算法，称之为掩膜阻断(mask cut)算法^[14]。它利用质量图设置分支，从残差点周围质量最低的点开始生长分支，使分支尽可能地处于低质量区域，在平衡所有残差点后，在分支以外的区域按任意路径进行相位展开。分支阻断算法中，相位展开错误主要是由于不合理的分支设置使分支处于高质量区域，迫使积分路径通过低质量区域而导致的。掩膜阻断算法由于利用质量图信息合理地把分支限制在质量较低的

区域，能较好地避免这种错误，在干涉合成孔径雷达、医学磁共振图像处理等多个领域都有成功应用的实例^[5]。但由于这种算法在分支以外的区域按任意路径展开包裹相位，没有考虑到许多实际应用中由于噪声强度大、轮廓不连续几何特征复杂，在分支以外的区域还存在着许多低质量的区域，当相位展开经过这些区域时会造成相位展开错误。

为了克服掩膜阻断算法固有的缺陷，解决信噪比低、轮廓不连续几何特征复杂等实际应用中的难题，提出一种基于分支设置的质量导引相位展开新算法。数字模拟和实验结果表明这种算法具有较好的噪声免疫性，能处理轮廓特征复杂的相位展开问题，计算速度快，是一种有效的相位展开算法。

2 原 理

本文提出的相位展开算法，首先选择一种包裹相位图的可靠度函数来计算相位图对应的初始质量图，然后根据初始质量图设置连接残差点的分支，再由分支的位置信息确定新的质量图，最后依靠新质量图引导的积分路径展开包裹相位图。

2.1 初始质量图的生成

所采用的初始质量图为相位导数变化质量图，它被认为是一种较能反映相位质量的质量图^[5]。初始质量图中像素 (m, n) 对应的质量值定义为

$$Z_{m,n} = \left[\sqrt{\sum_{i=m-L/2}^{m+L/2} \sum_{j=n-L/2}^{n+L/2} (\Delta_{i,j}^x - \bar{\Delta}_{m,n}^x)^2} + \sqrt{\sum_{i=m-L/2}^{m+L/2} \sum_{j=n-L/2}^{n+L/2} (\Delta_{i,j}^y - \bar{\Delta}_{m,n}^y)^2} \right] / l^2, \quad (1)$$

其中 l 是以 (m, n) 为中心的方形窗口的长度， $\Delta_{i,j}^x$ 和 $\Delta_{i,j}^y$ 为包裹相位偏导数，若包裹相位以 ϕ 表示，两者可由以下公式计算得到

$$\Delta_{i,j}^x = W(\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j}), \Delta_{i,j}^y = W(\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}), \quad (2)$$

(2)式中 W 为相位包裹操作算子，即

$$W(\phi_{i,j}) = \phi_{i,j} + 2\pi k_{i,j}, \quad (3)$$

其中 $k_{i,j}$ 为未知整数，通过选择适当的 $k_{i,j}$ 使得 $W(\phi_{i,j}) \in (-\pi, \pi)$ 。 $\bar{\Delta}_{i,j}^x$ 与 $\bar{\Delta}_{i,j}^y$ 为在 $l \times l$ 窗口内包裹相位偏导数的均值。

2.2 初始质量图导引的分支设置

二维相位展开的残差定理^[5]为

$$\oint \left[\frac{\partial \phi(x,y)}{\partial x} dx + \frac{\partial \phi(x,y)}{\partial y} dy \right] = 2\pi R, \quad (4)$$

其中 $\phi(x,y)$ 为 (x,y) 处的包裹相位， R 为积分环路包围的残差极性总和。为了实现正确的相位展开，要求

包裹相位图中从某一起点出发到另一点的相位展开结果与所选择的积分路径无关，这要求(4)式中的环路积分结果为零。当轮廓不连续、噪声和欠采样等存在时，包裹相位图中包含残差点。由残差定理可知若所有的残差点没有被全部平衡，残差极性总和将不为零，相位展开的结果将会因积分路径的不同而不同，而正确的展开结果只有一个，故不可避免地出现相位展开错误。因此，为了保证相位展开的正确性，必须在残差点之间以分支互连以平衡残差点。

如引言中所述，在残差点间设置分支较为复杂，不同的分支设置方法可能会得到不同的结果。由于分支的作用在于平衡残差点，相位展开过程中积分路径应不通过或最后通过分支，所以希望分支所在位置尽量处于相位质量较低的区域，以使不可避免的相位展开误差局限在最小范围内。因此，在众多

分支设置方法中,质量图导引方法不失为一种合理有效的分支设置方法。

该方法先搜索包裹相位图中的残差点,从一个残差点出发,把与该残差点相邻的 4 点放入一个队列 $[Q_1]$ 中。取队列中质量最低的点作为分支上的新生成点,同时把它作为种子点。把种子点的相邻 4 点放入队列中并对队列按质量高低重新排序,取队列中质量最低的点作为分支上的新生成点,同时把它作为种子点。如此反复,直至分支中包含数目相同的正负残差点或分支与图像边界相连。当相位图中所有的残差点都被平衡时,整个分支设置过程结束。这种方法能确保所生成的分支处于低质量区域。

2.3 相位展开路径的确定

在设置分支平衡所有残差点后,把分支位置处对

应的质量全部赋予最低值,相位图中其余位置的质量值保持不变,这样就生成了一个新的质量图。接下来就可按质量图导引的相位展开路径展开包裹相位图。

基本思想如下:从新质量图中质量最高的点出发,通过加上 2π 的整数倍来展开与该点相邻的 4 点,并把它们放入一个队列 $[Q_2]$ 中。取队列中质量最高的点作为种子点,展开与其相邻的 4 点,并把它们放入队列 $[Q_2]$ 中并按质量高低对队列重新排序,取队列中质量最高的点作为新的种子点。如此反复,直至队列为空完成整个路径积分过程。

在以上两个环节的具体实施过程中,可通过设置递增或递减的质量阈值以控制质量导引过程,使队列的长度控制在一定范围,从而提高算法的计算效率。整个算法的流程简图如图 1 所示。

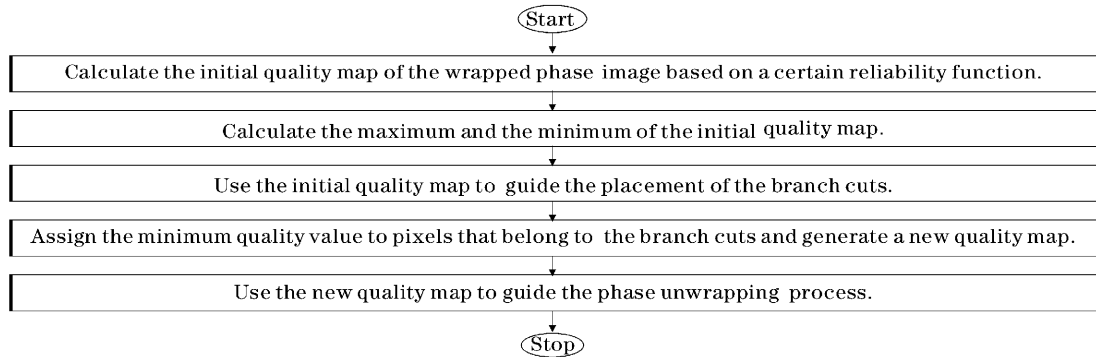


图 1 新算法的流程图

Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

3 结果与讨论

利用本文提出的相位展开算法对一个计算机模拟图像和一个实际干涉相位图像进行相位展开。

图 2(a)为计算机模拟的一个螺旋剪切表面的包裹相位图,图像大小为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。它包含相互卷绕同时互为倾斜的两个平面,两个平面间存在的轮廓不连续,构成了螺旋剪切的边界。它用于测试本文算法对复杂轮廓不连续的处理能力。图 2(b)为该算法中引导相位展开过程的新质量图,图 2(c)为该算法的相位展开结果,把它与理想的真实相位图比较,均方根误差为 1.718 rad 。图 2(d)为模板阻断算法中相位展开过程使用的分支信息图,图 2(e)为模板阻断算法的相位展开结果,与理想的真实相位图比较,均方根误差为 53.276 rad 。可见,本文提出的算法能正确展开轮廓特征复杂的包裹相位图,而模板阻断算法不能展开此相位图。这是由于掩膜阻断方法仅利用分支信息指导相位展开,而

此时分支不能在图 2(a)的螺旋剪切位置处形成如图 2(b)所示的可靠屏障,导致相位展开错误。相应地,本文算法同时利用了原始质量图和分支的信息,生成的新质量图能够在图 2(a)的螺旋剪切位置处形成可靠的屏障。在新质量图的引导下,相位展开路径不会越过这个低质量像素构成的屏障,保证了正确的相位展开结果。可见,在处理有复杂轮廓不连续的相位图时,本文提出的算法优于模板阻断算法。

图 3(a)为实际光纤连接器端面干涉测量中获得的包裹相位图,被测光纤连接器有较大的光纤凹陷量和较大的球面顶点偏芯量。该相位图在光纤端面所在的区域,即端面凹陷处存在较强的散粒噪声。整个图像包含 2326 个残差点,其中有相当比例集中在被噪声污染的光纤所在区域,见图 3(b)所示的新质量图。使用本文算法的相位展开结果如图 3(c)所示,图 3(c)对应的三维形貌如图 3(d)所示。使用模板阻断算法的相位展开结果如图 3(e)所示,图 3(e)对应的三维形貌如图 3(f)所示。图 3(c)中对噪声较大位置处出现一小块黑斑,这是高强度

噪声带来的不可避免的相位展开错误。而由图 3(e)和图 3(f)可知,模板阻断算法不能处理包裹相位中的光纤端面所在的高噪声区域,从而在该区域造成大面积的相位展开错误。可见,本文算法具

有很好的噪声免疫性,能正确展开包含高噪声的包裹相位图,把由噪声带来的不可避免的相位展开误差限制在最小区域,对实际高噪声包裹相位图的相位展开结果优于使用模板阻断算法的展开结果。

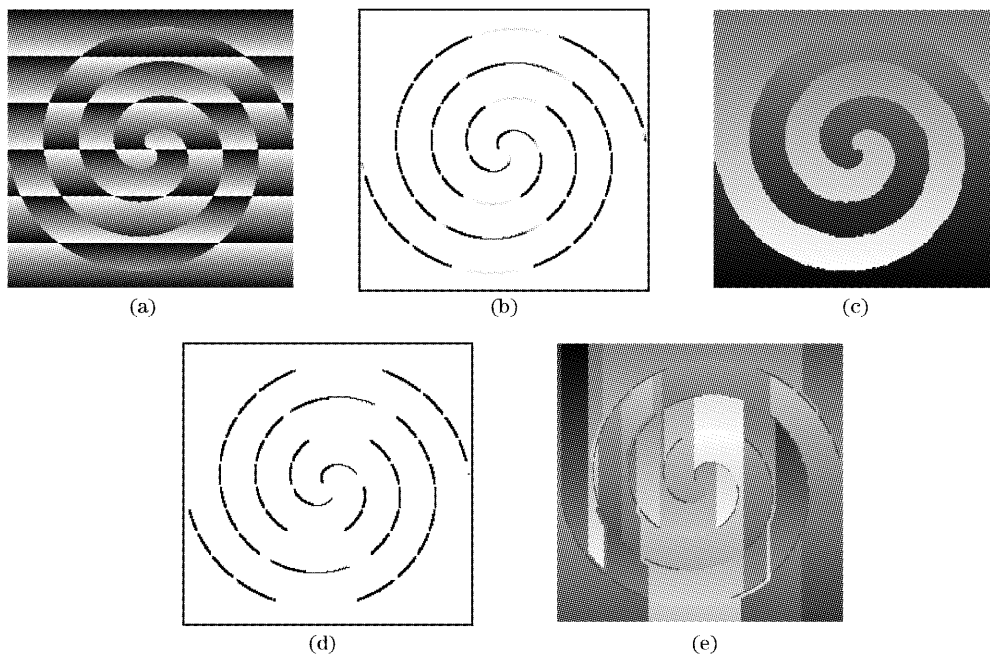


图 2 展开表面不连续的仿真包裹相位图。(a) 包裹相位图, (b) 新算法中使用的新质量图, (c) 利用新算法得到的相位展开结果, (d) 模板阻断算法中使用的分支信息图, (e) 利用模板阻断算法得到的相位展开结果

Fig. 2 Unwrapping of a simulated wrapped phase image with surface discontinuities. (a) Wrapped phase image, (b) the new quality map used in the proposed algorithm, (c) unwrapped result by use of the proposed algorithm, (d) the branch cuts used in the mask cut algorithm, (e) unwrapped result by use of the mask cut algorithm

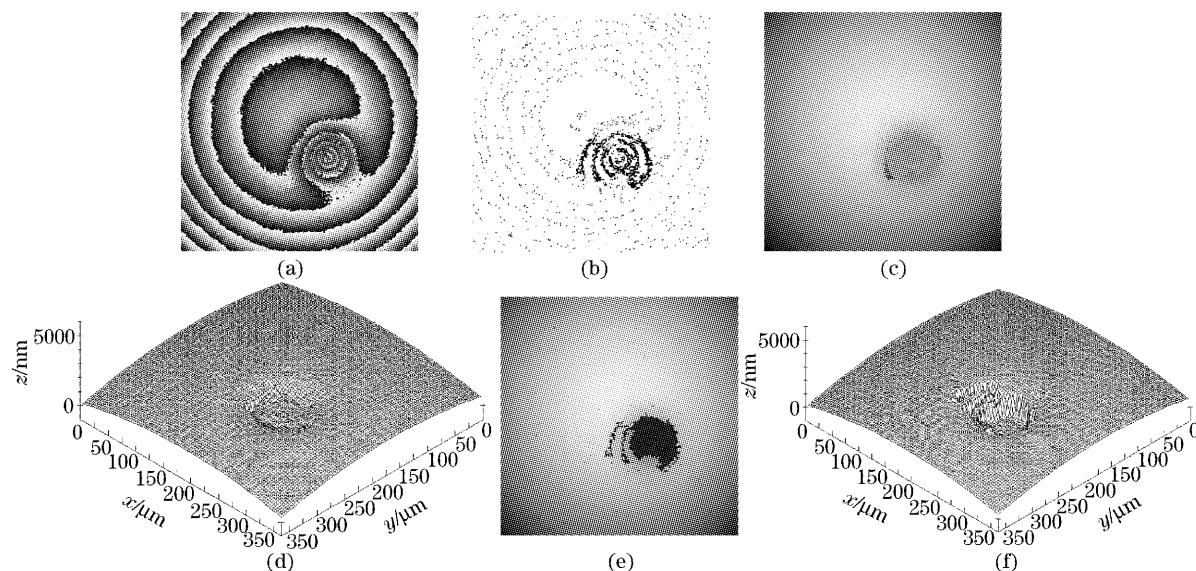


图 3 展开测量光纤连接器端面所得到的包裹相位图。(a) 包裹相位图, (b) 新算法中所使用的新质量图, (c) 使用新算法得到的相位展开结果, (d) 对应(c)的三维表示, (e) 使用模板阻断算法得到的相位展开结果, (f) 对应(e)的三维表示

Fig. 3 Unwrapping of a wrapped phase image obtained from the measurement of an optical fiber connector endface. (a) Wrapped phase image, (b) the new quality map used in the proposed algorithm, (c) unwrapped result by use of the proposed algorithm, (d) 3D corresponding (c), (e) unwrapped result by use of the mask cut algorithm, (f) 3D corresponding (e)

掩膜阻断算法在利用质量图引导分支设置后就抛弃质量图,按不通过分支的任意路径展开包裹相位图。而本文算法本质上是一种质量导引方法,分支的设置仅是构造引导积分路径的质量图的一个环节。它通过设置分支来平衡残差点,从而避免一般质量导引方法中环绕没有被平衡的残差点而带来的相位展开错误。在路径积分环节,它同时利用原始质量图和分支的信息,避免了相位展开时因没有质量导引而带来的错误,这也是本文算法在处理包含复杂轮廓不连续和高噪声包裹相位图时优于模板阻断算法的原因。

本文算法优于路径相关算法和分支阻断算法,这两种方法无法正确展开图 2(a)和图 3(a)的包裹相位图,其相位展开的结果比模板阻断算法得到的结果更坏。限于篇幅,本文不给出它们的相位展开的结果。

因待处理的包裹相位图的大小和实际相位分布的复杂程度不同,本文算法的运行时间长短迥异。本文算法运行在主频 800 MHz、128 Mbyte 内存的微型计算机上,所处理的图像大小为 512 pixel × 512 pixel,完成相位展开所需的时间平均约为 3 s。

4 结 论

提出了一种快速、可靠的二维相位展开算法。这种算法是一种基于分支设置的质量导引相位展开算法,它能按相位质量由高到低的次序展开包裹相位图,把不可避免的相位展开误差限制在最小区域内,同时能够避免由于展开路径围绕未被平衡的残差点而造成的相位展开错误。计算机模拟相位图 and 实际相位图的相位展开结果表明,在存在复杂轮廓不连续和高噪声的情况下,本文算法优于在多个领域有成功应用实例的模板阻断算法,能得到较好的

相位展开结果。

参 考 文 献

- 1 V. V. Volkov, Y. Zhu. Deterministic phase unwrapping in the presence of noise[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(22): 2156~2158
- 2 Peng Zhenjun, Wang Xiangzhao, Qian Feng *et al.*. Phase unwrapping algorithm based on simulated annealing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 845~849 (in Chinese)
彭震君, 王向朝, 钱 锋 等. 基于模拟退火的相位展开方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 845~849
- 3 Peng Zhenjun, Qian Feng, Zhong Xianghong *et al.*. Phase unwrapping algorithm based on segmenting regions containing phase jumps[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 910~915 (in Chinese)
彭震君, 钱 锋, 钟向红 等. 基于相位跳变区划分的相位展开方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(8): 910~915
- 4 J. Strand, T. Taxt. Performance evaluation of two-dimensional phase unwrapping algorithms[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(20): 4333~4344
- 5 D. C. Ghiglia, M. D. Pritt. *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software* [M]. New York: John Wiley and Sons. Inc., 1998
- 6 C. Quan, C. J. Tay, L. Chen *et al.*. Spatial-fringe-modulation-based quality map for phase unwrapping[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(35): 7060~7065
- 7 M. A. Herraes, D. R. Burton, M. J. Lalor *et al.*. Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(35): 7437~7444
- 8 A. Baldi. Two-dimensional phase unwrapping by quad-tree decomposition[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(8): 1187~1194
- 9 R. M. Goldstein, H. A. Zebker, C. L. Werner. Satellite radar interferometry; two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, **23**(4): 713~720
- 10 J. M. Huntley. Noise-immune phase unwrapping algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(15): 3268~3270
- 11 D. J. Bone. Fourier fringe analysis: the two-dimensional phase unwrapping problem[J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(25): 3627~3632
- 12 Y. Xu, C. Ai. Simple and effective phase unwrapping technique [C]. *Proc. SPIE*, 1993, **2003**: 254~263
- 13 X. Y. Su, A. M. Zarubin, G. Bally. Modulation analysis of phase-shifted holographic interferograms [J]. *Opt. Commun.*, 1994, **105**(5~6): 379~387
- 14 T. J. Flynn. Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map[C]. *Proc. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Lincoln, NE, May 27~31, 1996, IEEE, Piscataway, NJ, 2057~2059