

# SAR 层析技术的研究与应用

张 红<sup>1</sup>, 江 凯<sup>2</sup>, 王 超<sup>1</sup>, 陈 曦<sup>2</sup>, 汤益先<sup>1</sup>

(1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100086;

2. 中国电子科技集团第三十八研究所, 安徽 合肥 230032)

**摘要:**多基线 SAR 层析技术和 SAR 极化相干层析技术是合成孔径雷达干涉测量(InSAR)的最新扩展。阐述了多基线 SAR 层析技术及极化相干层析技术的基本思想,给出了具体的实现流程,总结分析了这两项技术星载实施的可行性以及它们的研究现状和应用前景。

**关 键 词:**多基线 SAR 层析技术;极化相干层析技术

**中图分类号:**TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2010)02-0282-06

## 1 引 言

在 20 世纪 60 年代末,合成孔径雷达技术与干涉测量技术结合的一项新技术——合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)应运而生。InSAR 技术通过比较两幅 SAR 图像的相位信息可以获取大范围、高精度的地表三维信息和变化信息,使得人们从空间对全球地表进行长时间序列的监测成为可能。

但 InSAR 处理中隐含了一个基本的假设——面散射假设,即假设 InSAR 影像中所有的散射都来自一个曲面,不考虑散射的体分布<sup>[1]</sup>,因此 InSAR 所获取的高程图实际上是一个“表面图像”,它在高程向对地物的欠采样使之无法解决在高程向分布的模糊问题<sup>[2]</sup>。

1997 年 Cloude 等利用 SIR-C/X-SAR 数据研究频率、极化对相干系数的影响,发现相干系数对极化有强依赖性,是极化干涉研究的思想起源。次年, Papathanassiou 和 Cloude<sup>[3]</sup>首次提出了合成孔径雷达极化干涉测量(POLinSAR)的概念,并开展实验研究,研究表明该技术能够提供比单纯极化或干涉 SAR 更丰富的信息。1998 年 Reigber<sup>[2]</sup>等开展了多基线 SAR 层析技术,在垂直于视线的方向依次增加多幅 SAR 天线或进行多次重复观测,在垂直于视线的方向上合成一个较大的孔径,因此可以获得

高度向上的分辨率。2006 年,Cloude<sup>[4]</sup>提出利用不同极化状态下的干涉相干系数反演森林垂直结构分布的极化相干层析(Polarization Coherence Tomography, PCT)方法,进一步拓展了极化干涉 SAR 用于垂直结构参数反演的理论和方法。

这两项 SAR 层析技术都是 InSAR 技术的扩展,并且都可以获得高度向的分辨能力。目前这两项技术都处在研究初期,但可以预见 SAR 层析技术将在林学、生物量估计、城市三维重建、地质学、冰川学及地下埋藏物体的探测方面都有着巨大的应用潜力。

本文通过对多基线 SAR 层析技术和 SAR 极化相干层析技术的原理进行总结,给出了具体的实现流程;在此基础上分析其星载实施的可行性及研究现状和应用前景。

## 2 SAR 层析技术的基本原理

两种 SAR 层析技术都可获得真正的三维信息,但获得的方式不同。多基线 SAR 层析技术在垂直于视线的方向依次增加多个基线,垂直于 SAR 成像平面方位向上合成一个大的孔径来获得高度维的分辨率。极化相干层析技术利用不同位置观测的每一像元的散射矩阵,通过极化和干涉信息的有效组合,获得观测对象空间结构特征信息。下面我们对多基

线 SAR 层析技术和 SAR 极化相干层析技术的原理进行具体的分析。

## 2.1 多基线 SAR 层析

图 1 是多基线 SAR 层析技术的示意图,共有  $K$  条航线或  $K$  幅天线,它们沿着垂直于视线方向平行排列。从图中我们可以看出,多基线 SAR 层析是利用 SAR 系统在不同高度上的多次近平行,对同一目标观测视角的变化形成高度方向的合成孔径,实现对目标沿高度向的成像。

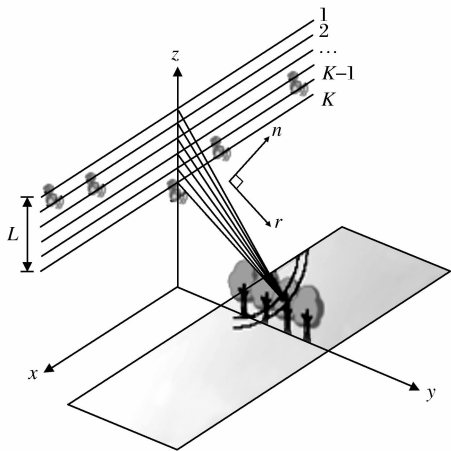


图 1 多基线 SAR 层析技术的示意图

Fig. 1 Acquisition geometry of multi-baseline SAR tomography

多基线 SAR 层析系统,具有  $K$  幅天线,可以得到  $K$  幅 SAR 图像,这些图像经精确配准后, $K$  幅 SAR 图像上相同位置的像元点构成一个长度为  $K$  的序列,对这个序列进行傅里叶变换,便可得到高度维像。由图 1 高度维像可表示为<sup>[2]</sup>:

$$I(n, n_0) = a(r_0, n_0) \exp\left(-i \frac{k}{r_0} n_0^2\right) \cdot L \operatorname{sinc}\left[\frac{kL}{r_0}(n - n_0)\right]$$

其中: $r_0$  是 SAR 与散射体的距离,散射体中心的高度为  $n_0$ ,  $a(r_0, n_0)$  是距离为  $r_0$ 、高度为  $n_0$  的散射体的复反射系数, $k$  是波数, $L$  是所有基线长度的总和。

## 2.2 极化相干层析

POLInSAR 技术将极化信息引入干涉 SAR 处理,可以同时把精确的结构特征与空间垂直结合起来,并可根据它们之间的相互关系,大大提高常规干涉 SAR 的性能。但大量的研究表明<sup>[4,6]</sup>,单一基线 POLInSAR 仅能提供混合表面/体散射的两个重要参数估计,即体散射层深度和地表相位,也无法真正得到目标的垂直向结构信息。多基线 SAR 层析技术可以提取更多的垂直结构信息<sup>[2]</sup>,但数据收集的操作短板制约了这种增加基线数量的做法,所以需要通

个简单的办法来实现 SAR 层析技术,即通过设置有效的物理结构参数假定,减少测量矢量的维数。

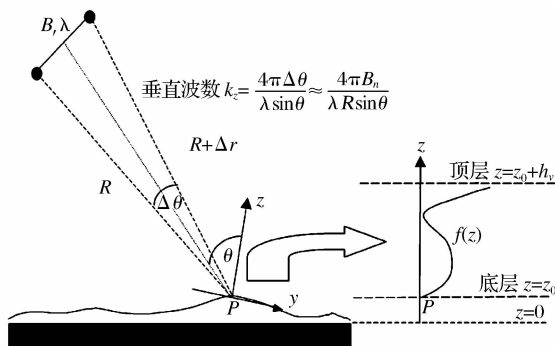


图 2 极化相干层析技术的示意图<sup>[4]</sup>

Fig. 2 Acquisition geometry of Polarization Coherence Tomography

极化相干层析方法(PCT)<sup>[4,7,8]</sup>就是本着这个思想,来实现对目标的垂直向结构信息的反演。图 2 是极化相干层析技术的示意图<sup>[4]</sup>。这种方法基于将未知垂直剖面的傅里叶—勒让德级数展开到一个已知的有限空间(体散射深度)中,通过带有基线和极化的线性化反演来确定展开系数的未知级数。目标的垂直向结构函数  $s(z)$  可表示为:

$$\frac{\int_0^{h_v} s(z) e^{ik_z z} dz}{\int_0^{h_v} s(z) dz} = \gamma e^{-i\phi_0} = e^{ik_v} (s_0 + c_{10} s_1 + c_{20} s_2 + \dots + c_{n0} s_n)$$

其中: $c_{n0} = c_n / (1 + c_0)$ ,  $k_v = k_z h_v / 2$ , 函数  $s_n$  为勒让德多项式  $P_n(x)$  的加权积分。

$$P_n(z) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dz^n} [(z^2 - 1)^n]$$

通过上式,复相干系数与未知的勒让德系数直接联系起来,假设植被高度和地形相位已知,垂直分布函数的反演变成一组线性方程的求解。

PCT 利用不同极化的干涉相干变化重建垂直分布剖面方程(后向散射随高度的变化方程),对地物垂直分布结构进行傅里叶—勒让德级数展开,层析重建过程转变为利用观测相干数据级数展开多项式的系数。只要已知植被的高度和地形相位,就可以将方程系数的求解过程线性化,参数的求解只是一个矩阵求逆运算。

## 3 SAR 层析技术的处理流程

由于这两项 SAR 层析技术都是 InSAR 技术的

扩展,因此在处理的过程中,一些 InSAR 处理的关键算法在这两种层析技术中都要采用。具体的处理算法主要包括以下两个方面:SAR 图像的高精度配准技术、基线估计方法。下面我们具体分析这两种 SAR 层析技术的处理流程。

3.1 多基线 SAR 层析

SAR 层析成像的原理与 CT 相似,其处理可分为两个阶段,一是常规的二维 SAR 成像,二是高度向聚焦。由于高度向的成像要利用 SAR 图像的相位信息,因此,SAR 成像阶段必须采用具有相位保持的成像算法。具体的处理流程见图 3。

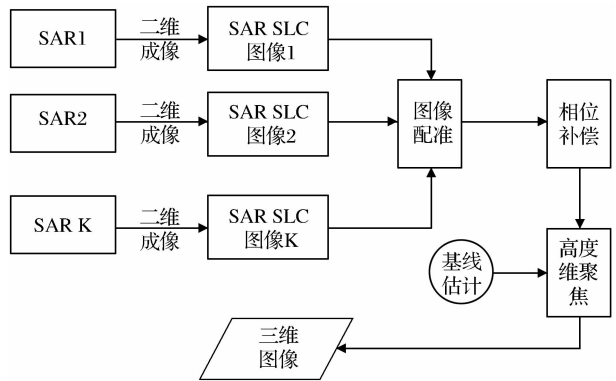


图 3 多基线 SAR 层析技术三维成像流程图  
Fig. 3 The flowchart of multi-baseline SAR tomography processing

其基本处理步骤是:对各个天线所获取的数据进行 SAR 成像处理,得到二维 SAR 复图像,对这些复图像进行高精度的配准,再对配准后的复图像沿高度向进行傅里叶变换,即可得到高度向上的图像。得到高精度配准的图像后,需要进行相位补偿。相位补偿是为了校正由于大气效应等外界影响对二维图像带来的相位变化,从而获得稳定的目标数据,从而有利于进行高度维层析成像。

高度维层析聚焦是实现目标沿高度方向成像以及三维成像的关键步骤,目前所采用的方法主要有:SPECAN 方法、参数模型估计的超分辨率方法,基于特征值分解的求逆技术、波束形成求逆技术等<sup>[5]</sup>。

3.2 极化相干层析

图 4 是双基线极化相干层析技术反演植被垂直结构的处理流程图。

在单基线极化干涉情况,由于只能获得某种极化状态观测下的一个复相干系数,因此,只能从傅里叶—勒让德级数得到两个未知参数用来估计垂直结构函数,而对于双基线极化干涉情况,可以从傅立叶—勒让德级数得到 4 个未知参数用来估计垂直结

构函数,当所用基线数据越多,那么可展开的勒让德级数也越多,这样垂直分布函数估计也就越精确。重建过程所依赖的植被高度和地形相位都可以通过极化干涉技术或其它方法(Lidar)反演得到。

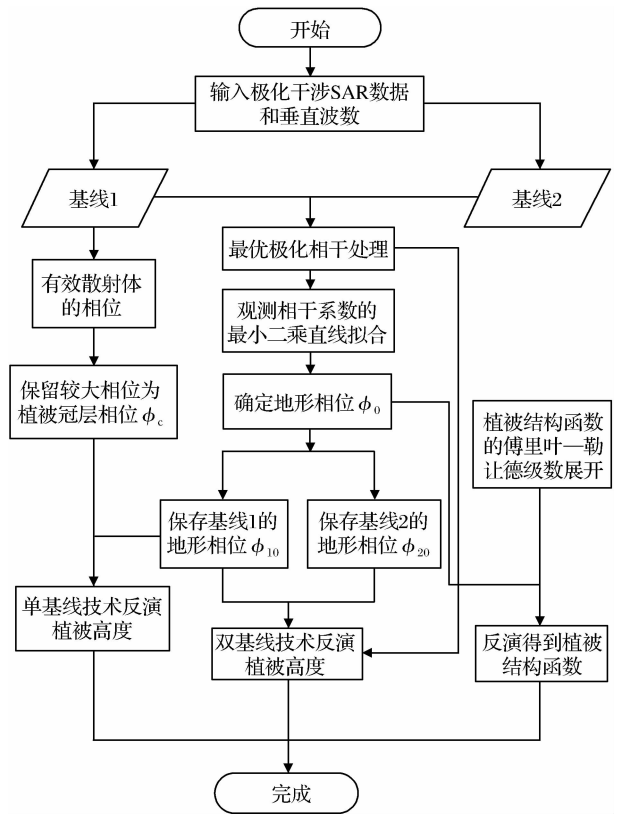


图 4 双基线极化相干层析技术反演植被垂直结构流程图  
Fig. 4 The flowchart of dual-baseline PCT processing

4 SAR 层析技术的研究现状与应用领域

4.1 研究现状

1998 年,Reigber<sup>[2]</sup>利用 13 组近平行轨道的 E-SAR 机载 SAR 数据得到森林层的三维散射响应图。他的实验表明,要获取高度向 2~3 m 的分辨率,平行轨道的数量要在  $N=13$  和  $N=20$  之间。前期的方法基本没有考虑极化信息,2005 年 Guillaso<sup>[9]</sup>等将极化信息引入到层析技术之中,采用扩展的 MUSIC 方法对单极化层析技术进行解算,可获取多个散射机制目标的高度信息。

从多基线 SAR 层析技术的发展历程来看,它有两个技术难点。一个是基线少,数据量不足,在高度向采用常规的傅里叶变换方法成像分辨率很低。第二个技术难点是如何克服基线不均匀、数据有时欠采样的影响<sup>[10]</sup>。少量的基线和不规则的采样都将导致高度方向上的旁瓣增高,模糊垂直空间分辨率。近几年的研究工作也主要是针对这两个方面开展

的。阵列信号处理中的波达方向(DoA)估计技术的应用使得在基线条数很少的情况也能很高的高度向成像分辨率,如,2005年Guillaso<sup>[9]</sup>利用多重信号分类算法(MUSIC)对极化SAR层析数据进行处理,2007年柳祥乐<sup>[10]</sup>开展了基于阵列信号处理的高度维成像方法的研究,2008年Frey和Meier<sup>[11]</sup>利用时间域后向投影和Capon法进行高度维成像处理。同年Nannini<sup>[12]</sup>探讨了SAR层析技术所需的最小基线条数。

与多基线SAR层析技术相比,PCT是在POLinSAR技术的基础之上提出的,也很大程度上依赖于POLinSAR技术的发展,其研究也是以Cloude等的研究工作为主<sup>[7,8,13-16]</sup>。目前已开展的研究工作主要是利用双基线极化相干层析法提取森林垂直结构剖面,该方法需要事先已知森林高度和地形相位,这些信息利用POLinSAR方法获得,因此也存在对森林高度低估的问题。

正如我们前面所述,对植被垂直分布方程的描述精度也自然会随基线条数的增多而增加,因此,在2007年Cloude<sup>[16]</sup>提出了多基线极化相干层析方法,在三基线情况下,可展开的勒让德级数增加,可取得很好的反演结果,但是在三基线条件也出现了一些新的问题,即数值稳定性问题,在低频尤其突出。

## 4.2 应用领域

SAR层析技术可以得到所探测目标的垂直方向结构信息,在地形测绘、生物量估计、资源调查、森林覆盖、大型建筑设施成像、考古学、掩埋物体探测以及其它民用军用方面具有很大的应用潜力。目前所开展的应用研究主要有以下3个方面:

### 4.2.1 地表植被垂直结构反演

从目前的研究结果看,SAR层析技术主要被用于分析多层形态(树冠—枝杈—树干—地面)特征的植被覆盖区域的垂直结构。

2005年Guillaso利用E-SAR L波段数据对德国Oberpfaffenhofen地区的森林进行三维成像,2006年Zhou<sup>[14]</sup>利用地基极化干涉雷达(GB-POLinSAR)在单基线条件下对澳大利亚当地植被的垂直结构特征开展了验证实验。随后,Cloude<sup>[8]</sup>利用双基线PCT技术对地基植被数据进行森林垂直结构剖面提取,并总结了不同频率、不同极化下地表散射和体散射的垂直分布现象。

SAR层析方法对提高森林类型分类精度、森林垂直结构参数、森林生物量和蓄积量等的估测精度,

具有很重要的潜在应用价值。

### 4.2.2 城市三维重建

2004年,Fornaro<sup>[9]</sup>等利用1992~1998年间30景ERS-1/2 SAR数据对位于意大利那布勒斯地区的圣保罗体育场进行了三维重建实验。实验结果表明,SAR层析技术能够很好地分辨出体育场两侧墙壁的高度向分布,从不同距离向位置处的方位—高度剖面图中显示出体育场的三维分布。2005年Fornaro<sup>[17]</sup>等利用63幅ERS-1/2数据对圣保罗体育场进行了三维重建,得到了更精细的结果。

### 4.2.3 隐蔽目标探测

在单幅SAR图像上,森林中隐藏的目标(如卡车等)很难检测到,在多次观测的SAR层析技术则可较容易地检测出。2006年Matteo Nannini<sup>[18]</sup>等利用L波段21个条带的数据进行林下隐蔽目标成像的研究,在共极化(HH或VV)的层析图上都能很清楚地分辨出卡车和油罐车。Cloude也利用PCT方法开展了隐蔽目标探测的实验研究。

## 5 星载SAR层析技术的可行性

目前所开展的研究工作,无论是多基线层析技术还是极化相干层析技术,所采用的数据源主要是机载数据,数据平台有德国DLR的E-SAR、丹麦DCRS的EMISAR、日本的PiSAR和美国NASA JPL的AIRSAR等。并且,极化层析技术要求各个数据获取的飞行轨道相互平行,并且具有等间隔变化的雷达视角。并且对平行轨道的数量也要求比较多,因此,实际实现较为困难。

由于机载SAR数据的成本相对较高,因此要实现SAR层析技术的广泛应用,必须要利用星载平台数据。Fornaro<sup>[16]</sup>等开展了利用ERS-1/2数据进行SAR层析应用的研究工作,王彦平<sup>[5]</sup>也开展了长时间序列星载SAR层析处理技术的研究,Cloude在2007年也探讨了基于星载平台的PCT方法的可行性,Fring2009会议上德国宇航局(DLR)展示了利用TerraSAR-X开展SAR层析研究的初步成果。但由于时间去相干等问题,与实际应用还存在一定差距。

与机载平台有很大不同的是:星载SAR层析技术主要受以下几个方面的影响<sup>[6,7]</sup>。

(1)时间去相干。当前,星载SAR的多基线数据都是通过卫星重复飞行获得,在时间上有较强的去相干,受外界影响很大,不利用对目标进行层析处理。由于去相干是与场景相关的,因此很难用简

单的定标参数来描述时间去相干的大小。对于极化相干层析来说,单基线的估计问题仍然是过低估计,在双基线的情况下,能一定程度上解决这个问题。

(2)信噪比 SNR。在极化相干层析应用中,由于包含了交叉极化的相干系数估计,所以由传感器限制引起的噪声去相干是一种重要的误差源。

(3)极化。极化层析和极化相干层析都包含了不同极化通道的散射机制的区别,所以受极化定标误差的影响。特别是在极化相干层析技术中,当雷达系统的天线有串扰时,会导致表面散射和体散射成分的耦合,从而改变了相干系数的相位和幅度,进而扭曲了极化相干层析剖面的重构。极化层析和极化相干层析都要求系统有很好的极化定标,从而能够更好地反演地物的极化散射特性。此外还要考虑电磁波在穿过电离层时受到法拉第旋转引入的极化矢量偏移的影响,并且波长越长其受法拉第旋转的影响越大,会导致目标极化散射特征的失真。

## 6 结 语

SAR 层析技术是近十年发展起来的一种新兴技术,可实现对高度向分布散射体的测量,与极化信息结合起来,还可以获得目标精细结构、物理成分和空间分布等信息,是未来 SAR 应用技术发展的一个重要方向。

目前,国外利用机载系统成功地开展了一些研究工作,其数据处理算法、极化分类算法也逐步实现和完善。星载系统的应用及相关设想的研制目前成为研究热点。近年来,我国在 SAR 系统和数据处理技术方面的研究取得了很大进展,但是 SAR 层析技术、SAR 极化相干技术研究方面还远远落后于国外。随着我国机载、星载 SAR 数据源的不断扩展,将推动我国在相关研究上的发展。

随着 SAR 系统的日趋增多,特别是业务化运行的星载极化 SAR 系统不断成熟,将推动 SAR 相干层析技术的发展。目前这项技术的模型及算法都相对单一,也缺乏有力的实验验证。同时还需要解决多种去相干问题。TerraSAR-X 的实验研究表征着这项技术未来在城市三维重建方面的巨大应用潜力。此外,长序列星载 SAR 数据层析技术进一步发展可以扩展到 4D(3D 空间+时间)SAR 成像,即差分 SAR 层析<sup>[19]</sup>,将 InSAR、SAR 差分干涉测量(DInSAR)、层析技术统一到一个框架中,利用重复轨道数据多基线和多时间段的特征,来区分

不同高度多个散射体,监视散射体的空间位置变化情况,为有效地进行地表(或建筑物)持续监测提供可能。

## 参考文献:

- [1] Rosen P A, Hensley S. Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(3): 1-20.
- [2] Reigber A, Moreira A. First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multibaseline L-band Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2142-2152.
- [3] Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1551-1565.
- [4] Cloude S R. Polarization Coherence Tomography[J]. Radio Science, 2006, 41(RS4017): 1-27.
- [5] Wang Yanping, Wang Bin, Hong Wen, *et al.* Tomography Processing Technique Using Long-term Spaceborne SAR Data [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(6): 472-477. [王彦平, 王斌, 洪文, 等. 长序列星载合成孔径雷达数据层析处理技术[J]. 测试技术学报, 2008, 22(6): 472-477.]
- [6] Papathanassiou K P, Cloude S R. Single Baseline Polarimetric SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2352-2363.
- [7] Cloude S R. Applications of Polarization Coherence Tomography[C]//Proceedings of International Radar Symposium, IRS-2006, 2006.
- [8] Cloude S R. Dual-baseline Coherence Tomography[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 127-131.
- [9] Guillaso S, Reigber A. Polarimetric SAR Tomography[C]//PolinSAR 2005, 2005.
- [10] Liu Xiangle. Study on Multibaseline Tomography Synthetic Aperture Radar[D]. PhD Thesis, 2007. [柳祥乐. 多基线层析成像合成孔径雷达研究[D]. 博士论文, 2007.]
- [11] Frey O, Meier E. Combining Time-domain Back-projection and Capon Beamforming for Tomographic SAR Processing[C]//IGARSS 2008, 2008.
- [12] Nannini M, Scheiber R, Moreira A. On the Minimum Number of Tracks for SAR Tomography[C]//IGARSS 2008, 2008.
- [13] Cloude S R. Calibration Requirements for Forest Parameter Estimation Using POLInSAR [C]//Proceedings of CEOS CALVAL Workshop, BNSC Conference Centre, London, 2002.
- [14] Zhou Z S, Cloude S R. Application of Polarization Coherence Tomography to GB-PolInSAR Data [C]//IGARSS2006, 2006, 4040-4043.
- [15] Zhou Z S, Cloude S R. Structural Parameter Estimation of Australian Flora with a Ground-based Polarimetric Radar In-

terferometer[C]//IGRASS2006,2006,71-74.

[16] Cloude S R. Multibaseline Polarization Coherence Tomography[C]//POLinSAR 2007,2007.

[17] Fornaro G,Lombardini F. Three-dimensional Multipass SAR Focusing;Experiments with Long-term Spaceborne Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2005,43(4):702-714.

[18] Nannini M,Scheiber R,Horn R. Imaging of Targets Beneath Foliage with SAR Tomography[C]//EUSAR 2008,2008.

[19] Lombardini F. Differential Tomography: A New Framework for SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2005,43(1):37-44.

## The Current Status of SAR Tomography

ZHANG Hong<sup>1</sup>,JIANG Kai<sup>2</sup>,WANG Chao<sup>1</sup>,CHEN Xi<sup>2</sup>,TANG Yi-xian<sup>1</sup>  
(1. *Center for Earth Observation and Digital Earth,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100086,China;*  
2. *No. 38 Reseach Institute,China Electronics Technology Group Corporation,Hefei 230032,China*)

**Abstract:** Multibaseline SAR tomography and Polarimetric coherence tomography (PCT)are two extensions of interferometric SAR(InSAR). In the paper the basic concepts of multibaseline SAR tomography and PCT are illustrated. The current status of SAR tomography technique,spaceborne SAR tomography implementation,and the applications of SAR tomography, are summarized.

**Key words:** Multibaseline SAR tomography; Polarimetric coherence tomography