干涉合成孔径雷达目标的三维重建1

王彦平 彭海良

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 干涉 SAR 目标的三维重建是利用干涉 SAR 的基本测量值和干涉 SAR 成像的几何关系确定 地面目标点的三维位置.现有算法均建立在平面电磁波、平地假设的基础上,不可避免地引入严重的位置误 差.该文从干涉 SAR 的基本方程入手,在球形地球和球面电磁波的普遍模型基础上,推导出干涉 SAR 三 维重建的解析解,并将该算法与现有三维重建算法进行了数值计算比较. 关键词 目标三维重建,干涉合成孔径雷达,平面波假设 中图号 TN951,TN911.73

1引言

干涉合成孔径雷达 (InSAR) 是遥感领域内近期迅速发展的技术,它是常规 SAR 系统与干 涉技术相结合的产物。InSAR 以相位信息作为分析和处理的出发点,通过两副天线同时观测或 者一副天线两次重复的观测,获取地面景物的复图像对,并经干涉处理后形成包容地面成像点 与两天线位置关系精确信息的干涉图。利用雷达位置和雷达参数信息、基线与地面成像点之间 的几何关系,确定图像上每一点的三维位置的过程称为目标的三维重建。

目前,针对 InSAR 目标的三维重建问题,已经提出了多种算法,这些算法是在电磁波波前 的平面波假设、地球模型的平地假设条件下推导的。最简单的三维重建算法同时引入平地假设和 平面波假设^[1],本文作者对该算法进行了仿真研究,其定位误差是不可接受的^[2]。Madsen^[3] 和 Wilkinson^[4] 的三维重建算法是在地心笛卡儿坐标系中描述 InSAR 成像几何关系,在保留 平面波假设的同时扬弃了平地假设,定位精度较文献 [1] 有了提高。另外, D. Small 等人采用 WGS84 椭球模型作为地球模型,将干涉得到的地形高度附加到椭球半径上形成数字高程模型, 利用距离球、多普勒锥和生成的数字高程模型对目标进行三维重建^[5]。该算法通过迭代方式求 解,计算非常复杂。

考虑到现有三维重建算法的缺陷,本文从 InSAR 的基本方程入手,充分利用 InSAR 的基本测量值,剔除现有算法中的平面波假设和平地假设,在球形地球和球面电磁波的普遍模型基础上,提出一种新的 InSAR 目标三维重建算法,推导出了 InSAR 三维重建的解析解,并将本文算法与 Wilkison 算法进行了数值计算比较.理论分析和数值计算均表明,本文算法与现有算法相比能更准确地对目标进行三维重建。

2 三维重建的基本原理

InSAR 成像几何模型如图 1 所示,该模型包含沿航向的基线分量和正交航向的基线分量, 考虑了非平行轨道和一般的 InSAR 成像机理 (包括斜视和正侧视)的情况 ^[1,3,6],是最普遍的 InSAR 成像模型.成像模型用地心笛卡儿坐标系进行描述,两天线分别位于 S_1 和 S_2 , b为基线 向量, θ 为雷达天线视角, r为雷达距地面目标点的斜距。记天线位置矢量和速度矢量分别为

$$\boldsymbol{A}_i = (A_{ix}, A_{iy}, A_{iz}) \tag{1}$$

$$\boldsymbol{v}_i = \boldsymbol{A}_i = (A_{ix}, A_{iy}, A_{iz}) = (v_{ix}, v_{iy}, v_{iz})$$

$$\tag{2}$$

根据雷达测距、多普勒频率测量和干涉相位测量的基本原理, InSAR 基本方程为^[6,7]

¹ 2002-04-30 收到, 2002-10-08 改回 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (No.2001AA132010)



图 1 InSAR 成像几何模型

$$\boldsymbol{b} = \boldsymbol{A}_2 - \boldsymbol{A}_1 \tag{3}$$

$$\boldsymbol{P} - \boldsymbol{A}_1 = \boldsymbol{r}_1 \tag{4}$$

$$\lambda f_{dc1}/2 = (\dot{P} - \dot{A}_1) \cdot (P - A_1)/|P - A_1| = v_{st1} \cdot r_1/r_1$$
⁽⁵⁾

$$\boldsymbol{P}-\boldsymbol{A}_2=\boldsymbol{r}_2\tag{6}$$

$$\lambda f_{dc2}/2 = (\dot{\boldsymbol{P}} - \dot{\boldsymbol{A}}_2) \cdot (\boldsymbol{P} - \boldsymbol{A}_2) / |\boldsymbol{P} - \boldsymbol{A}_2| = \boldsymbol{v}_{st2} \cdot \boldsymbol{r}_2 / \boldsymbol{r}_2$$
(7)

$$\varphi = 2\pi Q(r_2 - r_1)/\lambda = 2\pi Q r_1 [(1 - (2r_1 \cdot b)/r_1^2 + (b/r_1)^2)^{\frac{1}{2}} - 1]/\lambda$$
(8)

式中Q = 1对应于单发双收的"标准"模式; Q = 2对应于重复轨道 InSAR 或"乒乓"模式.

图 2 是图 1 的空间几何表示,给出了与天线 *S*₁ 相关的距离球、多普勒锥和单叶相位双曲 面。图中的距离球是以天线 *S*₁ 所在位置为球心、以 *r*₁ 为半径,对应于 (4) 式。多普勒锥是以 天线 *S*₁ 所在位置为锥顶、其锥角比例于多普勒频率,对应于 (5) 式。单叶相位双曲面是以天线 *S*₁ 所在位置为焦点,以基线向量为对称轴,由 (8) 式描述的相位双曲面,地面目标的三维位置 *P* 由三表面交点 *P*₁ 确定 ^[6],如图 2(a) 所示。引入平面波假设后,干涉相位双曲面退化为相位 锥,目标三维位置由距离球、多普勒锥和相位锥三表面交点确定,即图 2(b) 中的 *P*₂ 点。



图 2 InSAR 目标三维重建的几何解释

(4)-(8) 式是描述目标三维坐标的非线性方程组, 难以直接求解。三维重建的关键是寻找关于目标三维坐标的联立方程组, 该方程组中应该包含多个关于目标三维坐标的线性方程。在建立联立方程组的过程中, 切忌同时直接应用两个斜距量 r₁ 和 r₂, 那样会将 InSAR 与雷达立体测绘相混淆^[8].雷达立体测绘利用两个斜距的差值来获取地形表面的高度信息,高程精度取决于距离分辨力, 仅能得到粗糙的高程模型。InSAR 的高程测量精度达到电磁波的波长级, 能够获得高精度的数字高程模型。

记 $P = (P_x, P_y, P_z), b = (b_x, b_y, b_z), A_i = (A_{ix}, A_{iy}, A_{iz}), \dot{A}_1 = (\dot{A}_{ix}, \dot{A}_{iy}, \dot{A}_{iz}), \pm (4)$ 式、(6) 式和基线方程(3) 式可以导出

$$2\mathbf{P} \cdot \mathbf{b} = r_1^2 - r_2^2 + A_2^2 - A_1^2 \tag{9}$$

由相位方程 (8) 式可以得到 $r_2 = r_1 - \lambda \varphi / (2\pi Q)$. 记 $\Delta = r_1^2 - r_2^2 + A_2^2 - A_1^2 = -(\lambda \varphi / (2\pi Q))^2 + r_1 \lambda \varphi / (\pi Q) + A_2^2 - A_1^2$

$$b_x P_x + b_y P_y + b_z P_z = \Delta/2 \tag{10}$$

由多普勒方程(5)式和(7)式可得

$$\lambda r_i f_{dci} / 2 - \dot{A}_i \cdot A_i = \dot{P} \cdot P - \dot{A}_i \cdot P - \dot{P} \cdot A_i$$
(11)

记 $\xi_i = \dot{A}_i \cdot A_i$, 设地球自转角速度为 ω , $\dot{P} = \omega \times P$, 代入 (10) 式整理得到

$$\lambda r_i f_{dci}/2 = P_x (-\omega A_{iy} - \dot{A}_{ix}) + P_y (\omega A_{ix} - \dot{A}_{iy}) - P_z \dot{A}_{iz} + \xi_i$$
(12)

该方程描述了垂直于向量 $A_i - \omega \times A_i$ 的平面, 式中 ω 表示 ω 的大小.

另外, 距离球方程(4)式可写为

$$(P_x - A_{1x})^2 + (P_y - A_{1y})^2 + (P_z - A_{1z})^2 = r_1^2$$
(13)

(10), (12) 和 (13) 式融合了有关地面目标位置的所有信息,通过求解 3 个方程组成的联立 方程组,可以准确地确定地面目标点的坐标。

由(10)式和(12)式以及克莱姆法则,得到

$$P_x = \mu P_z + v \tag{14}$$

$$P_y = kP_z + \tau \tag{15}$$

式中

$$\mu = \frac{b_z(\dot{A}_{1y} - \omega A_{1x}) - b_y \dot{A}_{1z}}{b_x(\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y}) + b_y(\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}, \qquad v = \frac{b_y(2\xi_1 - \lambda r_1 f_{dc1}) + \Delta \times (\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y})}{2b_x(\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y}) + 2b_y(\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}, \\ k = \frac{-b_z(\dot{A}_{1x} + \omega A_{1y}) + b_x \dot{A}_{1z}}{b_x(\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y}) + b_y(\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}, \qquad \tau = \frac{-b_x(2\xi_1 - \lambda r_1 f_{dc1}) + \Delta \times (\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}{2b_x(\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y}) + 2b_y(\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}, \\ b_x = A_{2x} - A_{1x}, \qquad b_y = A_{2y} - A_{1y}, \qquad b_z = A_{2z} - A_{1z}.$$

将 (14), (15) 式代入 (13) 式, 整理得到目标高程坐标 Pz 为二次方程 (16) 式的根:

$$\alpha P_z^2 + \beta P_z + \gamma = 0 \tag{16}$$

式中 $\alpha = \mu^2 + k^2 + 1, \beta = 2(\mu v + k \tau - \mu A_{2x} - k A_{2y} - A_{2z}), \ \gamma = (k - A_{1x})^2 + (\tau - A_{1y})^2 + A_{1z}^2 - r_1^2$.

4 算法性能分析

本文提出的算法与 Wilkison 算法总结如表 1 所示。

表 1 Wilkison 三维重建算法与本文提出的三维重建算法						
		Wilkison 算法				
	$P_x = \mu P_z + v$	$P_{xw} = \mu_w P_{zw} + v_w$				
P_x	$\mu = \frac{b_z(\dot{A}_{1y} - \omega A_{1x}) - b_y \dot{A}_{1z}}{b_x(\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y}) + b_y(\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}$	$\mu_{w} = \frac{b_{z}(\dot{A}_{1y} - \omega A_{1x}) - b_{y}\dot{A}_{1z}}{b_{x}(\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y}) + b_{y}(\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}$				
	$v = \frac{b_y(2\xi_1 - \lambda r_1 f_{dc1}) + \Delta \times (\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y})}{2b_x(\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y}) + 2b_y(\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}$	$v_{w} = \frac{b_{y}(2\xi_{1} - \lambda r_{1}f_{dc1}) + \nabla \times (\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y})}{2b_{x}(\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y}) + 2b_{y}(\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}$				
	$\Delta = -(\lambda \varphi/(2\pi Q))^2 + r_1 \lambda \varphi/(\pi Q) + A_2^2 - A_1^2$	$\nabla = 2(r_1 b \sin \theta + \boldsymbol{A}_2 \cdot \boldsymbol{A}_1 - A_1^2)$				
	$P_y = kP_z + \tau$	$P_{yw} = k_w P_{zw} + \tau_w$				
P_y	$k = \frac{-b_z(\dot{A}_{1x} + \omega A_{1y}) + b_x \dot{A}_{1z}}{b_x(\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y}) + b_y(\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}$	$k_{\omega} = \frac{b_{x}\dot{A}_{1z} - b_{z}(\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}{b_{x}(\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y}) + b_{y}(\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}$				
	$\tau = \frac{-b_x(2\xi_1 - \lambda r_1 f_{dc1}) + \Delta \times (\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}{2b_x(\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y}) + 2b_y(\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}$	$\tau_{w} = \frac{-b_{x}(2\xi_{1} - \lambda r_{1}f_{dc1}) + \nabla \times (\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}{2b_{x}(\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y}) + 2b_{y}(\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})}$				
	P_z 为二次方程的根	P_{zw} 为二次方程的根				
р	$\alpha P_z^2 + \beta P_z + \gamma = 0$	$\alpha_w P_{zw}^2 + \beta_w P_{zw} + \gamma_w = 0$				
r_{z}	$ \begin{array}{c} \alpha \leftarrow \mu + \kappa + 1 \\ \beta = 2(\mu_0 + k\pi - \mu A_1 - kA_2 - A_2) \end{array} $	$ \begin{array}{c} \alpha_w = \mu_w + \kappa_w + 1 \\ \beta = 2(\mu_w) + k_w \tau + \mu_w \Lambda_{1,w} + \lambda_{1,w} \end{array} $				
	$ \gamma = (v - A_{1x})^2 + (\tau - A_{1y})^2 + A_{1z}^2 - r_1^2 $	$ \begin{aligned} \rho_w &= 2(\mu_w \sigma_w + \kappa_w \sigma_w - \mu_w A_{1x} - \kappa_w A_{1y} - A_{1z}) \\ \gamma_w &= (v_w - A_{1x})^2 + (\tau_w - A_{1y})^2 + A_{1z}^2 - r_1^2 \end{aligned} $				

对两种定位算法进行比较,得到

$$\mu = \mu_w, \qquad k = k_w, \qquad v \neq v_w, \qquad \tau \neq \tau_w \tag{17}$$

也就是说 Wilkison 三维重建算法中平面波假设所引入的定位误差主要体现在系数 v和 τ 上, 而且 x, y, z 三方向的定位是相互耦合的。

4.1 两种定位算法性能比较

$$i \not\in \delta v = v - v_w, \quad \delta \tau = \tau - \tau_w, \quad P_{zw} = P_z - \delta P_z, \quad \mathfrak{M}$$
$$\delta v = (\Delta - \nabla) \times (\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y}) / [2b_x(\omega A_{1x} - \dot{A}_{1y}) + 2b_y(\omega A_{1y} + \dot{A}_{1x})] \tag{18}$$

$$\delta\tau = (\Delta - \nabla) \times (\omega A_{1y} + A_{1x}) / [2b_x(\omega A_{1x} - A_{1y}) + 2b_y(\omega A_{1y} + A_{1x})]$$
(19)

于是 $\alpha = \alpha_w$, $\beta_w = \beta + 2(\mu \delta v + k \delta \tau) = \beta + \delta \beta$, $\gamma_w = \gamma + (\delta v)^2 + (\delta \tau)^2 + 2[\delta v(v - A_{1x}) + \delta \tau (\tau - A_{1y})] = \gamma + \delta \gamma$. 记 $f(x) = \alpha_w x^2 + \beta_w x + \gamma_w$, 利用 f(x) 在 $x = P_z$ 处的一阶 Tayler 展开可以得到

$$\delta P_z = -(\delta \beta P_z + \delta \gamma) / (2\alpha P_z + \beta + \delta \beta)$$
⁽²⁰⁾

可以看出,两种三维重建算法的高度之间的差别随着被测目标高度的不同而有所不同,而 且二者之间的关系是一种非线性关系。

$$\delta P_x = P_x - P_{xw} = \mu \delta P_z + \delta v \tag{21}$$

$$\delta P_y = P_y - P_{yw} = k\delta P_z + \delta\tau \tag{22}$$

在轨道参数和雷达系统参数及其雷达测量值一定的条件下,参数 μ , δv , k, $\delta \tau$ 为常数,两种 三维重建算法在 x 向和 y 向的定位差别与其在 z 方向的定位差间的关系是线性关系。通过比较 二者在高程的定位差别可以间接考察其在 x 向和 y 向定位精度的差别。

4.2 数值计算

采用文献 [3] 中 InSAR 的参考点数据,分别利用 Wilkison 算法和本文算法计算目标的坐标位置. InSAR 成像模型采用二维模型,参数如表 2 所示; 3 个定标点的数据和两种算法计算得到坐标分别如表 3 和表 4 所示.

参数			
天线 1 位置 (m)	(0.000, 0.000, 7152000.000)		
天线 2 位置 (m)	(0.000, 0.000, 7152000.000)		
平台平均速度 (m/s)	(7500000.000,0.000,0.000)		
雷达频率 (GHz)	5.26		
	0.00007292115		
相位常数 φ_c (rad)	-30883.000		

表 2 InSAR 参数

参数		P_1	P_2	P_3		
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	$P_x(m)$	0.000	0.000	0.000		
坐标	$P_y(m)$	245980.776	294472.728	345404.452		
	$\overline{P_z(\mathbf{m})}$	6362246.652	6360186.696	6357624.145		
时延	$t_1(ns)$	5514493.084	5631981.613	5774803.136		
	$t_2(ns)$	5513701.711	5631053.553	5773735.182		
展开相	位 (rad)	4493.228	-54.6088	-4511.968		

表 3 3 个定标点数据

	 算法	参考值	Wilkison 算法	本文算法		
	$P_{1x}(m)$	0.000	0.000	0.000		
P_1 点	$P_{1y}(\mathbf{m})$	245980.776	245988.139	245981.012		
	$P_{1z}(\mathbf{m})$	6362246.652	6362241.197	6362245.102		
	$P_{2x}(m)$	0.000	0.000	0.000		
P_2 点	$P_{2y}(\mathbf{m})$	294472.728	294478.142	294471.135		
	$P_{2z}(\mathbf{m})$	6360186.696	6360182.654	6360187.321		
	$P_{3x}(m)$	0.000	0.000	0.000		
P_3 点	$P_{3y}(\mathbf{m})$	345404.452	345409.248	345403.149		
	$P_{3z}(m)$	6357624.145	6357629.259	6357625.013		

表 4 两种算法的数值计算结果

从计算结果可以看到,两种算法在目标的 x 向定位上似乎不存在差别,这主要是由于计算 过程中所采用的二维 InSAR 成像模型引起,在这种特殊情况下,使得 $\mu_w = \mu = 0, v_w = 0,$ v = 0,抹煞了 Wilkison 算法中平面波假设所引入的 x 向定位误差,对于一般情况来说,由平面 波假设引入的 x 向定位误差依然存在.

定义

绝对定位误差
$$\delta P_{ij} = |\hat{P}_{ij} - P_{ij}|$$
 (23)

相对定位精度
$$\eta_{ij} = \delta P_{ij} / P_{ij}$$
 (24)

式中i对应3个定标点,i = 1, 2, 3; j对应坐标x, y, z.

由图 3(a) 和图 3(b) 可以看出,本文算法对目标的定位能力优于 Wilkison 算法,其相对定 位精度比 Wilkison 算法约高一个数量级.



图 3 定位精度比较 (图中左: Wilkison 算法;右:本文算法;图中 3 组直方图分别对应于 3 个参考点)

定义空间定位误差

$$\Delta P_i = \left[\sum_j (\delta P_{ij})^2\right]^{1/2} \tag{25}$$

两种定位算法对 3 个点的空间定位误差如图 4 所示. 由图 4 可以看出, 本文算法与 Wilkison 算法相比能更准确地对目标进行三维重建.



图 4 两种算法的空间定位误差 (图中左: Wilkison 算法;右:本文算法;图中 3 组直方图分别对应 3 个参考点)

5结论

本文在回顾 InSAR 目标三维重建算法的基础上,从 InSAR 的基本方程入手,充分利用 InSAR 的基本测量量,扬弃现有算法中的平面波假设和平地假设,提出了一种新的三维重建算 法,并给出了三维重建问题的解析解。理论分析和数值计算均表明,本算法比现有算法更准确 地实现 InSAR 目标的三维重建.

[1] E. Rodriguez, J. M. Martin, Theory and design of interferometric synthetic aperture radar, IEE Proc.-F, 1992, 139(2), 147-159.

- [2] 王彦平,彭海良,干涉 SAR 高程重建中平面波模型分析,测试技术学报, 2003, 17(1), 5-9.
- [3] S. N. Madsen, H. A. Zebker, J. M. Martin, Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1), 246-256.
- [4] A. J. Wilkinson, Techniques for 3-D surface reconstruction using radar interferometry, [Ph.D Thesis], University of London, 1997.
- [5] D. Small, C. Werner, D. Nüesch, Geocoding and validation of ERS-1 InSAR-derived digital elevation models, EARSeL Adv. Remote Sensing, 1995, 4(2), 26-39.
- [6] P. A. Rosen, S. Hensley, I. R. Joughin, F. K. Li, S. N. Madsen, E. Rodríguez, R. M. Goldsen, Synthetic aperture radar interferometry, Proc. IEEE, 2000, 88(3), 333-382.
- [7] F. Holecz, P. Pasquali, E. Meier, D. Nüesch, Automatic geocoding and quality assessment of digital surface models generated from AeS-1 InSAR data, Proc. EUSAR'98, Friedrichschafen, Germany, 1998, 57-60.
- [8] A. Reigber, Airborne polarimetric SAR tomography, [Ph.D Thesis], Institut für Navigation der Universität Stuttgart, 2001.

3D RECONSTRUCTION OF TARGETS IN INTERFEROMETRIC SAR

Wang Yanping Peng Hailiang

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract 3D reconstruction of targets in Interferometric SAR (InSAR) refers to determine target's 3D position based on principal measurements of radar and the InSAR imaging geometry. Several algorithms have been proposed for InSAR. These algorithms rely on simplifying assumptions, such as the flat earth approximation and the plane wave approximation. Significant location errors of targets have been introduced by these approximations. In this paper, a new algorithm is proposed on the models of spherical earth and spherical wave. The solution is given in a closed form only using the measured quantities: orbit parameters, range time, Doppler shift, and interferometric phase. This analytical solution demonstrates more exact than the existing algorithms.

Key words 3D reconstruction, Interferometric SAR, Plane wave approximation

王彦平: 男, 1976年生,博士生,研究方向:信号与信息处理,现代信息技术及其应用.

彭海良: 男, 1939 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 雷达系统和信号处理, 干涉合成孔径雷达系统设计和 研究.