

# 分布式卫星 InSAR 系统的成像算法研究

张秋玲 王岩飞

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘要** 该文研究了分布式卫星干涉合成孔径雷达(InSAR)系统中双基斜视雷达的 CS 成像算法,给出了算法的具体实现过程,并在算法实现中对分布式卫星 InSAR 系统的基线不稳定进行了补偿,消除了基线不稳定对 SAR 图像和干涉测量的影响。通过模拟仿真,验证了双基斜视 CS 算法的保相性以及基线不稳定补偿方法的有效性。

**关键词** 分布式卫星,干涉合成孔径雷达(InSAR),成像算法

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)12-2232-04

## The Study of Imaging Algorithm of Distributed Satellites InSAR System

Zhang Qiu-ling Wang Yan-fei

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

**Abstract** Chirp Scaling (CS) imaging algorithm is derived and implemented in this paper, which is adapted to bistatic and squinted radar in distributed satellites Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) system. Considering the characteristic of baseline instability in this system, an effective method is proposed to eliminate the effect of baseline instability on SAR image and interferometric measure. The simulation results validate the property of phase preserving of bistatic and squinted CS algorithm and the effectiveness of compensated method of baseline instability.

**Key words** Distributed satellites, Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), Imaging algorithm

### 1 引言

分布式卫星干涉合成孔径雷达(InSAR)是利用分布式卫星雷达实现干涉测量的一种新技术。分布式卫星 InSAR 可以同时获取测绘区域信息,克服干涉信号间的时间去相关性,而且可以提供大基线以提高测高灵敏度,利用分布式卫星 InSAR 可以获取全球范围内的高精度数字高程图(DEM)。

分布式卫星雷达一般采用一发多收的工作方式,即一个雷达发射信号,多个雷达接收信号。对于只有接收功能的雷达,由于收发设备分置在不同平台,属于双基地雷达,所以利用分布式卫星 InSAR 系统进行干涉测量,需要研究双基合成孔径雷达(SAR)的成像算法。

分布式卫星 InSAR 系统中,基线是不断变化的,变化的基线会使 SAR 图像散焦,并会引起干涉图在方位向的平地效应,为了提高干涉测量精度,需要采取措施消除基线不稳定对干涉测量产生的影响。

SAR成像算法中,Chirp Scaling (CS)算法具有良好的相位保持性。本文在标准CS算法<sup>[1]</sup>的基础上,结合分布式卫星 InSAR系统特点,推导出适合于分布式卫星InSAR系统中双基斜视雷达的CS算法,指出此算法与标准CS算法的不同,并在算法实现过程中对基线不稳定进行补偿,最后通过模拟仿真,验证双基斜视CS算法的保相性和基线不稳定补偿方法的有效性。

### 2 双基斜视雷达的 CS 成像算法

在分布式卫星 InSAR 系统中,为了实现干涉测量,参与干涉的雷达天线波束必须能同时覆盖同一照射区,实现空间同步。如果分布式卫星雷达采取一发多收的工作方式,则为了实现空间同步,干涉雷达中至少有一个是斜侧视。假设主动雷达为正侧视,被动雷达为斜侧视,则分布式卫星 InSAR 系统的成像几何关系如图 1 所示。图中  $A_1$ ,  $A_2$  分别为主动雷达和被动雷达天线所在位置,飞行航迹(Track)1, 2 分别为两个雷达的航迹,  $r_1(t)$ ,  $r_2(t)$  分别为两个雷达在飞行过程中的距离历程,  $P$ ,  $P'$  分别为沿距离向的不同测绘点,  $N$ ,  $N'$  分别为  $P$ ,  $P'$  在过  $A_2$  点的垂直于航迹 1 的平面投影,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  分别为被动雷达观测  $P$ ,  $P'$  时所对应的斜视角。

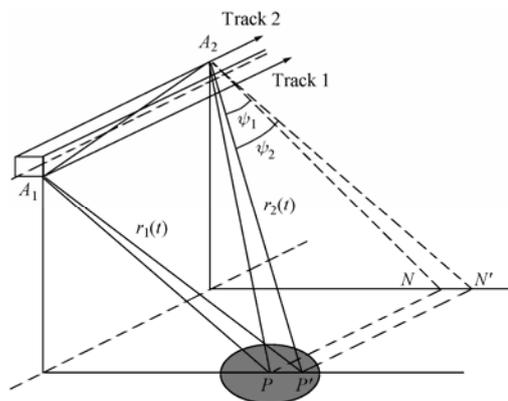


图 1 分布式卫星 InSAR 系统的成像几何关系  
Fig.1 Imaging geometry of distributed satellites InSAR system

双基雷达在某一时刻接收到的回波是以主动雷达和被  
动雷达为焦点的相同长半轴椭圆上的目标点的回波叠加。经  
过去载频处理, 双基雷达回波可以表示为

$$s_s(\tau, t) = \text{rect}\left[\frac{\tau - [r_1(t) + r_2(t)]/c}{T_r}\right] \text{rect}\left[\frac{t - t_0}{T_s}\right] \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda}[r_1(t) + r_2(t)]\right\} \exp\left\{-j\pi k_r\left[\tau - \frac{r_1(t) + r_2(t)}{c}\right]\right\} \quad (1)$$

其中  $\tau$ ,  $t$  分别为距离向和方位向时间,  $T_r$  为雷达信号的脉  
冲持续时间,  $T_s$  为合成孔径时间,  $t_0$  为波束中心照射到测绘  
点的时刻,  $\lambda$  为雷达波长,  $k_r$  为雷达信号的线性调频率,  $c$   
为光速。

下面对式(1)进行成像处理, 获取测绘目标的相位信息,  
以进行干涉测量。

(1) 对  $s_s(\tau, t)$  进行方位向傅里叶变换。由于直接进行方  
位向傅里叶变换比较困难, 一般采取先求  $s_s(\tau, t)$  的二维频域  
表达式, 再对此表达式进行距离向傅里叶逆变换的方法, 来  
求  $s_s(\tau, t)$  的方位向傅里叶变换。

$s_s(\tau, t)$  式的二维频域表达式为<sup>[2]</sup>

$$S_{s1}(f_r, f_a) = C_{s1} \text{rect}\left[\frac{-f_r}{T_r k_r}\right] \text{rect}\left[\frac{t_b - t_0}{T_s}\right] \exp\left\{j\pi \frac{f_r^2}{k_r}\right\} \cdot \exp\left\{j\left[\phi_T(t_T) + \phi_R(t_R) + \frac{1}{2} \frac{\ddot{\phi}(t_T)\ddot{\phi}(t_R)}{\ddot{\phi}(t_T) + \ddot{\phi}(t_R)}(t_T - t_R)^2\right]\right\} \quad (2)$$

其中  $C_{s1}$  为一常数(以下各表达式中  $C_{si}$  ( $i=1, \dots, 4$ ) 都为常  
数),  $f_r$ ,  $f_a$  分别为距离向和方位向的瞬时频率,  $t_T$ ,  $t_R$   
分别为主动雷达和被动雷达的相位驻定点,  $t_b$  为双基雷达的相  
位驻定点,  $\phi_T(\cdot)$ ,  $\phi_R(\cdot)$  分别为主动雷达和被动雷达的相位  
历程,  $\ddot{\phi}_T(\cdot)$ ,  $\ddot{\phi}_R(\cdot)$  分别表示  $\phi_T(\cdot)$  和  $\phi_R(\cdot)$  的二阶导数。

定义  $S = (\lambda f_a / (2v_a))^2$ ,  $A_1 = r_{01} + r_{02} \cos\psi$ ,  $A_2 = r_{01} -$   
 $r_{02} \cos\psi$ ,  $A_3 = r_{02} \sin\psi$ , 其中  $v_a$  为卫星飞行速度,  $r_{01}$ ,  $r_{02}$   
为波束中心照射到目标点时所对应的主动雷达和被动雷达  
天线相位中心到目标的距离, 经过详细推导, 可以推出:

$$t_b = \frac{r_{01} r_{02} \cos\psi}{A_1} \left[ -\frac{\lambda f_a}{v_a^2 \sqrt{1-S}} - \frac{\sin\psi}{v_a \cos\psi} \right] + t_0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \phi_T(t_T) + \phi_R(t_R) + \frac{1}{2} \frac{\ddot{\phi}(t_T)\ddot{\phi}(t_R)}{\ddot{\phi}(t_T) + \ddot{\phi}(t_R)}(t_T - t_R)^2 \\ &= -\frac{2\pi}{\lambda} \left[ A_1 \sqrt{1-S} + \frac{A_2}{2A_1} S \sqrt{1-S} + \frac{A_3^2}{2A_1} (1-S)^{3/2} \right. \\ & \quad \left. - \frac{A_2 A_3}{A_1} \sqrt{S} (1-S) \right] - \frac{2\pi}{c} \left[ \frac{A_1}{\sqrt{1-S}} + \frac{A_2}{2A_1} \frac{S(2S-1)}{\sqrt{1-S}} \right. \\ & \quad \left. + \frac{A_3^2}{2A_1} (2S+1) \sqrt{1-S} - \frac{A_2 A_3}{A_1} 2S \sqrt{S} \right] f_r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\pi\lambda}{c^2} \left[ \frac{A_1 S}{(1-S)^{3/2}} - \frac{A_2^2 S(6S^2 - 9S + 2)}{2A_1 (1-S)^{3/2}} - \frac{A_3^2 3S(2S-1)}{2A_1 (1-S)^{1/2}} \right. \\ & \quad \left. - \frac{A_2 A_3}{A_1} 6S \sqrt{S} \right] f_r^2 + \frac{\pi f_a}{v_a} A_3 - 2\pi f_a t_0 \end{aligned} \quad (4)$$

分布式卫星 InSAR 系统中, 雷达到目标的距离远远大于  
卫星间的距离, 结合这一特点, 对式(2)进行化简, 可得

$$\begin{aligned} S_{s1}(f_r, f_a) &= C_{s1} \text{rect}\left[\frac{-f_r}{T_r k_r}\right] \text{rect}\left[\frac{r_{01} r_{02} \cos\psi}{T_s A_1} \left( -\frac{\lambda f_a}{v_a^2 \beta_s(f_a)} - \frac{\sin\psi}{v_a \cos\psi} \right)\right] \\ & \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda} A_1 \beta_s(f_a) - j\frac{2\pi}{c} R_s(f_a; r_{01}, r_{02}) f_r \right. \\ & \quad \left. + j\frac{\pi f_r^2}{k_s(f_a; r_{01}, r_{02})} + j\frac{\pi f_a}{v_a} A_3 - j2\pi f_a t_0 \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $(\pi f_a / v_a) A_3$  为多普勒中心引起的相位变化,  
 $\beta_s(f_a) = \sqrt{1-S}$ ,  $R_s(f_a; r_{01}, r_{02}) = A_1 [1 + \alpha_s(f_a)]$ ,  $\alpha_s(f_a) =$   
 $\frac{1}{\beta_s(f_a)} - 1$ ,  $\frac{1}{k_s(f_a; r_{01}, r_{02})} = \frac{\lambda A_1 [1 - \beta_s^2(f_a)]}{c^2 \beta_s^3(f_a)} + \frac{1}{k_r}$ 。

对  $S_{s1}(f_r, f_a)$  进行距离向傅里叶逆变换, 可得

$$\begin{aligned} S_{s2}(\tau, f_a) &= C_{s2} \text{rect}\left[\frac{r_{01} r_{02} \cos\psi}{T_s A_1} \left( -\frac{\lambda f_a}{v_a^2 \beta_s(f_a)} - \frac{\sin\psi}{v_a \cos\psi} \right)\right] \\ & \cdot \text{rect}\left[\frac{k_s(f_a; r_{01}, r_{02})}{T_r k_r} \left( \tau - \frac{R_s(f_a; r_{01}, r_{02})}{c} \right)\right] \\ & \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda} A_1 \beta_s(f_a)\right\} \exp\left\{j\frac{\pi f_a}{v_a} A_3 - j2\pi f_a t_0 \right. \\ & \quad \left. - j\pi k_s(f_a; r_{01}, r_{02}) \left( \tau - \frac{R_s(f_a; r_{01}, r_{02})}{c} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

从上式的第一个矩形函数可以推出回波信号的多普勒调频  
率  $k_a$  和多普勒中心频率  $f_{DC}$

$$k_a = -\frac{v_a^2 A_1 \beta_s(f_a)}{\lambda r_1 r_2 \cos\psi}, \quad f_{DC} = -\frac{v_a \sin\psi \beta_s(f_a)}{\lambda \cos\psi} \quad (7)$$

(2) 对  $S_{s2}(\tau, f_a)$  进行 CS 操作, 使不同距离处的距离徙  
动特性一致。CS 因子  $\Phi_1(\tau, f_a; r_{\text{ref}})$  为

$$\begin{aligned} \Phi_1(\tau, f_a; r_{1\text{ref}}, r_{2\text{ref}}) &= \exp\left\{-j\pi k_s(f_a; r_{1\text{ref}}, r_{2\text{ref}}) a_s(f_a) \right. \\ & \quad \left. \cdot \left[ \tau - \frac{R_s(f_a; r_{1\text{ref}}, r_{2\text{ref}})}{c} \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $r_{1\text{ref}}$ ,  $r_{2\text{ref}}$  分别为主动雷达到目标的参考距离和被雷  
达到目标的参考距离。

(3) 对进行 CS 操作后的信号进行距离向傅里叶变换后,  
再乘以相位因子  $\Phi_2(f_r, f_a)$ , 以完成距离压缩和距离徙动校  
正。  $\Phi_2(f_r, f_a)$  为

$$\Phi_2(f_r, f_a) = \exp \left\{ -j\pi \frac{f_r^2}{k_s(f_a; r_{1\text{ref}}, r_{2\text{ref}})(1 + \alpha_s(f_a))} + j \frac{2\pi}{c} f_r A_{\text{ref}} \alpha_s(f_a) \right\} \quad (9)$$

(4) 对上述处理后的信号进行距离向傅里叶逆变换, 得到的信号为

$$S_{s3}(\tau, f_a) = C_{s3} \text{rect} \left[ \frac{r_{01} r_{02} \cos \psi}{T_s A_1} \left( -\frac{\lambda f_a}{v_a^2 \sqrt{1-S}} - \frac{\sin \psi}{v_a \cos \psi} \right) \right] \cdot \text{sinc} \left[ B_w \left( \tau - \frac{A_1}{c} \right) \right] \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} A_1 \beta_s(f_a) + j \frac{\pi f_a}{v_a} A_3 - j 2\pi f_a t_0 - j \Theta \right\} \quad (10)$$

其中  $B_w$  为雷达信号带宽,  $\Theta = \frac{\pi}{c^2} k_s(f_a; r_{1\text{ref}}, r_{2\text{ref}}) a_s(f_a) [1 + a_s(f_a)] (A_1 - A_{\text{ref}})^2$ ,  $\Theta$  项是由 CS 操作所引起的相位误差项。

从式(10)可以看出, 距离压缩后信号的聚焦位置不在采样点上。实际信号处理都是在等间隔采样点上进行的, 所以应该将式(10)变换成等间隔采样点  $\tau'$  上的表达式

$$S_{s3}(\tau, f_a) = C_{s3} \text{rect} \left[ \frac{r'_{01} r'_{02} \cos \psi'}{T_s A'_1} \left( -\frac{\lambda f_a}{v_a^2 \sqrt{1-S}} - \frac{\sin \psi'}{v_a \cos \psi'} \right) \right] \cdot \text{sinc} \left[ B_w \left( \tau' - \frac{A'_1}{c} \right) \right] \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} A'_1 \beta_s(f_a) + j \frac{\pi f_a}{v_a} A'_3 - j 2\pi f_a t_0 - j \Theta' \right\} \quad (11)$$

其中对斜距的采样满足  $r'_{01} + r'_{02} \cos \psi' = c\tau'$ 。

(5) 将式(11)乘以相位因子  $\Phi_3(\tau, f_a)$ , 以完成方位压缩和相位误差补偿。 $\Phi_3(\tau, f_a)$  为

$$\Phi_3(\tau, f_a) = \exp \left\{ -j \frac{2\pi c \tau'}{\lambda} [1 - \beta_s(f_a)] - j \frac{\pi f_a}{v_a} A'_3 + j \Theta' \right\} \quad (12)$$

其中  $A'_3 = B_x$ ,  $B_x$  为干涉基线沿航迹的分量, 在短期内可以认为不变。

最后对方位压缩后的信号进行方位向傅里叶逆变换, 得到 SAR 图像信号:

$$S_{s4}(\tau, t) = C_{s4} \text{sinc} [f_{\text{ds}}(t - t_0)] \text{sinc} \left[ B_w \left( \tau' - \frac{A'_1}{c} \right) \right] \cdot \exp \left\{ j \frac{2\pi c \tau'}{\lambda} \right\} \quad (13)$$

其中  $f_{\text{ds}} = \frac{v_a^2 T_s (r'_{01} + r'_{02} \cos \psi')}{\lambda r'_{01} r'_{02} \cos \psi'}$  为方位向处理带宽。上式中的指数项为干涉测量需要的相位项, 可见, 双基斜视 CS 算法很好地保留了测绘目标的相位信息。

综合上述分析可知, 双基斜视 CS 算法是标准 CS 算法的推广和改进。与单基正侧视雷达信号相比, 双基斜视雷达信号具有以下特点:

(1) 双基雷达的距离历程是由主动雷达距离历程和被动雷达距离历程共同决定的; 回波信号是以主动雷达和被动雷达为焦点的相同长半轴椭圆上的目标点回波的叠加。

(2) 双基雷达的多普勒参数是由主动雷达和被动雷达的系统参数共同决定; 双基雷达回波信号的频域相位不仅与主动雷达和被动雷达的系统参数有关, 而且与主动雷达和被动雷达之间的耦合程度有关。

(3) 由于双基雷达的斜视, 双基雷达的回波中含有由多普勒中心引起的相位项, 进行方位压缩时, 要对此相位进行补偿。要准确补偿此相位, 需要合理选择干涉雷达的工作方式(例如使  $A_3 = B_x$  为一常数)。

(4) 距离压缩后的聚焦位置不在采样点处, 为了得到采样点处的图像信息, 需要对距离压缩后的 SAR 信号进行重新采样。

### 3 基线不稳定的补偿

分布式卫星 InSAR 系统中, 基线是不断变化的。变化的基线不仅会使 SAR 图像散焦, 影响 SAR 图像的质量, 而且会使干涉图出现方位向平地效应。为了提高干涉测量精度, 应该采取措施消除基线不稳定带来的影响。

分布式卫星 InSAR 系统中, 基线的变化幅度不大<sup>[3]</sup>, 短期内基线的变化可以认为是线性的。如果将基线的线性变化等效为被动雷达到目标的距离的线性变化, 那么通过对距离引起的相位进行补偿就可以消除基线不稳定对干涉测量带来的不良影响。

考虑到基线的不稳定性, 被动雷达到目标的距离可以建模为

$$r_2(t) = \sqrt{(r_{02} + \alpha t)^2 + v_a^2 (t - t_0)^2} + 2v_a (t - t_0) (r_{02} + \alpha t) \sin \psi \quad (14)$$

其中  $\alpha$  为斜距  $r_{02}$  的变化率。

这时, 被动雷达回波信号  $s_s(\tau, t)$  的方位向傅里叶变换可以表示为

$$S_{s2}(\tau, f_a) = C_{s2} \text{rect} \left[ \frac{r_{01} r_{02} \cos \psi}{T_s A_1} \left( -\frac{\lambda f_a}{v_a^2 \beta_s(f_a)} - \frac{(\alpha + v_a \sin \psi)}{\cos \psi (v_a^2 + \alpha^2 + 2v_a \alpha \sin \psi)} \right) \right] \text{rect} \left[ \frac{k_s(f_a; r_{01}, r_{02})}{T_r k_r} \left( \tau - \frac{R_s(f_a; r_{01}, r_{02})}{c} \right) \right] \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} A_1 \beta_s(f_a) \right\} \cdot \exp \left\{ j \frac{\pi r_{02} (\alpha + v_a \sin \psi)}{(v_a^2 + \alpha^2 + 2v_a \alpha \sin \psi)} f_a - j 2\pi f_a t_0 - j \pi k_s(f_a; r_{01}, r_{02}) \left( \tau - \frac{R_s(f_a; r_{01}, r_{02})}{c} \right)^2 \right\} \quad (15)$$

从上式可以看出, 基线变化影响双基雷达多普勒中心和多普勒中心引起的相位项。要消除基线不稳定的影响, 在 CS 算法中, 就应该对方位压缩和相位补偿因子  $\Phi_3(\tau, f_a)$  进行修正, 修正后的  $\Phi_3(\tau, f_a)$  为

$$\Phi_3(\tau, f_a) = \exp \left\{ -j \frac{2\pi c \tau'}{\lambda} [1 - \beta_s(f_a)] - j \frac{\pi r'_{02} (\alpha + v_a \sin \psi')}{(v_a^2 + \alpha^2 + 2v_a \alpha \sin \psi')} f_a + j \Theta' \right\} \quad (16)$$

通过对  $\Phi_3(\tau, f_a)$  的修正, 可以提高 SAR 图像质量。但要消除基线不稳定对干涉图的影响, 还应该对 SAR 图像进行线性相位补偿。用于补偿的线性相位为

$$\phi_{\text{off\_set}} = \exp \left( -j \frac{2\pi}{\lambda} \alpha t \right) \quad (17)$$

从信号处理的角度看, 一个信号在时域上乘以一个线性相位等效于在频域上圆周移位, 所以频域上圆周移位也可以补偿基线不稳定对干涉图的影响。

#### 4 模拟仿真

以相对轨迹为圆的均匀分布的 3 颗卫星<sup>[4]</sup>组成的 InSAR 系统为例, 对地形坡度为 0° 的 100×100 个分辨单元的回波信号进行模拟和成像处理, 验证双基斜视 CS 算法和基线不稳定补偿方法的正确性和有效性。

分布式卫星 InSAR 系统的有关模拟参数如表 1 所示。根据图 1 中的几何关系, 建立两个雷达的回波信号, 利用标准 CS 算法和双基斜视 CS 算法分别对主动雷达和被动雷达的回波进行成像处理, 得到两幅复图像, 对两幅复图像进行配准、干涉处理, 可以得到图 2 所示的干涉条纹图。

表 1 分布式卫星 InSAR 系统的有关模拟参数

Tab.1 Simulation parameters of distributed satellites InSAR system

中心频率	9.6GHz	PRF	2500Hz
轨道高度	500km	信号带宽	30MHz
基线长度	1000m	采样频率	35MHz
天线视角	40°	天线长度	8m

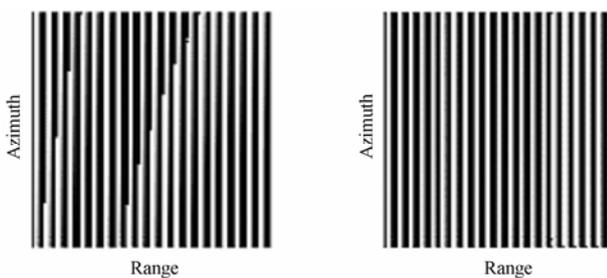


图 2 基线不稳定补偿前(a)、后(b)的干涉条纹

Fig.2 Interferometric fringe image

(a) Before and (b) after baseline instability compensation

图 2(a)为没有经过基线不稳定补偿的干涉图, 从图中可以看出, 分布式卫星 InSAR 系统中基线的变化会引起方位向的平地效应, 利用本文提出的基线不稳定补偿方法, 可以消除方位向的干涉条纹, 如图 2(b)所示。

上述成像算法在补偿基线不稳定性的同时, 很好地保留了相位特性。理论上, 根据上述模拟系统所得到的干涉条纹数目为

$$M_r = \frac{n_r \Delta r}{\lambda} = \frac{100}{\lambda} \times \left( \frac{\rho_s \sin \theta_2}{\sin \theta_1 \cos \psi} - \rho_s \right) \approx 20 \quad (18)$$

其中  $n_r$  为距离向的分辨单元数,  $\Delta r$  为两个雷达对同一测绘点的距离差,  $\rho_s$  为斜距采样间隔,  $\theta_1, \theta_2$  为两个雷达天线视角。式中的结果与图 2 中的模拟结果一致, 这证明了采用标准 CS 算法和双基斜视 CS 算法对主动雷达和被动雷达成像, 可以很好地保留目标的相位特性, 得到可靠的干涉结果。

标准 CS 算法和双基斜视 CS 算法在推导过程中引入了一些近似, 这些近似会带来一定的相位误差。通过定量分析可知, 模拟中主动雷达 SAR 图像的相位偏差为 0.1453rad, 相位方差为 0.0241rad, 双基斜视雷达 SAR 图像的相位偏差为 0.7482rad, 相位方差为 0.0878rad。要进一步提高干涉测量结果, 需要对 CS 算法引入的相位误差进行补偿。

有关标准 CS 成像算法中所采取的近似和补偿方法已有论述<sup>[5]</sup>, 对于双基斜视 CS 算法, 除了标准 CS 算法中的近似外, 还采取了近似: (1)在式(4)的化简过程中, 忽略了双基耦合相位项。(2)双基雷达中, 主动雷达和被动雷达到目标的距离和是已知的, 在对主动雷达或被动雷达到目标距离有关的相位补偿中, 雷达到目标的距离采用了近似。这两种近似不仅会引起 SAR 图像相位的偏差, 还会引起相位抖动, 对它们的补偿可以在二维频域中进行。

#### 5 结束语

本文结合分布式卫星 InSAR 系统的特点, 推导了双基斜视雷达的 CS 成像算法, 通过模拟仿真证明了此算法具有很好的相位保持性。在算法实现过程中, 针对分布式卫星 InSAR 系统中基线不稳定的特点, 提出了基线不稳定的补偿方法, 并达到很好效果。文中还分析了成像算法在推导过程中采取的近似引入的误差, 要进一步提高算法的精度, 需要在二维频域中对此误差进行补偿, 这一点有待于进一步分析研究。

#### 参考文献

- [1] Raney R K, Runge H, Bamler R, et al.. Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786-799.
- [2] Loffeld O, Nies H, Perters V, et al.. Models and useful relations for bistatic SAR processing. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2031-2038.
- [3] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2001, 39(3): 506-520.
- [4] 林来兴. 微小卫星编队飞行组成虚拟卫星研究. 微小卫星编队飞行及应用论文集. 北京: 国家高技术航天领域专家委员会微小卫星技术组, 2000: 1-35.
- [5] 魏钟. 合成孔径雷达卫星. 北京: 科学出版社, 2001: 160-172.

张秋玲: 女, 1970 年生, 博士生, 研究方向为干涉合成孔径雷达系统设计和信号处理。

王岩飞: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等。