

机载双天线斜视干涉 SAR 自配准 成像方法研究

贾 丽 贾 鑫 高 阳
(装备学院光电装备系, 北京 101416)

摘 要: 本文针对机载双天线斜视干涉 SAR 成像过程分析了主辅天线回波信号距离历程偏移特性、方位多普勒频率特性及其与正侧视系统下的区别; 讨论了基于扩展 CS 算法(ECS 算法)距离向自配准成像过程中距离向平移因子和缩放因子; 推导了距离向自配准成像处理的基本公式和具体实现过程。通过计算机仿真实现了机载双天线斜视干涉 SAR 系统在成像处理阶段实现距离向高精度的自配准的过程。通过对配准前后主辅图像相关特性、干涉相位纹图质量以及配准误差的分析, 验证了推导过程的正确性和该算法的有效性。

关键词: 斜视干涉 SAR; 自配准; 成像算法; 扩展 CS 算法(ECS 算法)

中图分类号: TN958; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1003-0530(2014)02-0227-09

Research on the airborne dual-antenna squinted InSAR auto-registration Imaging method

JIA Li JIA Xin GAO Yang

(Dept. of Photoelectric & Electronic Warfare Equipment, academy of Equipment, Beijing 101416)

Abstract: Arming at airborne dual-antenna squinted InSAR imaging processing procedures, the paper has analyzed the characteristics of the distance course of two antennas echo signals, the feature of the azimuth Doppler frequency and the difference among them when the squint angle of InSAR system is zeros. The range shift factor and scaling factor used in the auto-registration imaging procedures base on the extended Chirp Scaling (ECS) algorithm have been discussed. The paper has given the basic formulations and definite implementation procedures. By means of computer simulation, the paper has taken out the highly accurate range auto-registration based on ECS imaging algorithm of the airborne dual-antenna squinted InSAR data. The statistic characteristic of correlation coefficient of two images after auto-registration is given and the quality of interferometric fringes image has been contrasted. The simulation result demonstrated that the basic formulations and definite implementation procedures in this paper are right and the validity of the algorithm presented in the paper is proved.

Key words: Airborne dual-antenna squinted InSAR; auto-registration; Imaging algorithms; extended Chirp Scaling (ECS)

1 引言

干涉式合成孔径雷达(InSAR)是以合成孔径雷

达(SAR)为基础发展起来的,通过两副天线同时观测或者单天线重复观测,获取同一景观的复图像对,利用目标与成像天线位置的几何关系在复图像

上产生相位差,形成包含斜距向上的点与两天线位置之间的精确信息的干涉纹图,结合成像系统的相关参数就可得到观测区域的高程、地形变化等信息^[2]。

InSAR 主要可分为垂直航迹的测高 InSAR 和沿航迹 InSAR,经过几十年的发展,InSAR 技术已经成功地应用到了高程地图的测绘以及地表变化等方面^{[1][2]}。本文以测高 InSAR 为研究对象进行讨论。

传统的垂直航迹 InSAR 是在 SAR 复图像的基础上进行一系列数据处理进而得到目标的数字高程模型 (DEM)。文献[1]对双天线回波距离历程特性进行了分析,提出了在成像过程中实现自配准的思想,并详细地阐述了波数域的处理流程并验证了其正确性^[5],该思想的提出使得双天线特性得到了应用,同时也避免了复图像配准过程中插值等大量的计算。文献[4]在此基础上从分析双天线 InSAR 系统的回波信号出发,给出了引入距离平移和缩放因子的 ECS 算法^{[3][8]}的基本公式和具体实现过程。文献[6][7][9]也对基于波数域算法和 CS 算法的双天线干涉 SAR 的自配准成像过程进行了研究。但是目前对于干涉 SAR 自配准成像过程的推导主要是基于正侧视的情况,参考目标为场景中心点,参考方位频率为零,而当天线斜视时,若仍以多普勒零频作为方位参考频率则会带来非常大的带宽偏移和频谱混叠^{[3][10]},造成较大配准误差。基于此,本文分析了斜视干涉 SAR 回波信号的距离历程特性,推导了在参考方位频率下自配准 ECS 算法的距离平移和缩放因子,以及具体公式和实现过程,并进行了仿真分析和验证,同时该公式和实现过程同样适用于正侧视工作模式。

2 信号模型分析

假设机载双天线干涉 SAR 飞行航迹平行,干涉 SAR 成像几何关系如图 1 所示。 A_1, A_2 为主辅天线, B 为基线长度, $P(X, Y, Z)$ 为场景中心点, ϕ_1, ϕ_2 分别为 A_1, A_2 的斜视角, R_{1c}, R_{2c} 为合成孔径中心时刻即 $\eta = \eta_c$ 时主辅天线与场景中心点的距离, r_{10}, r_{20} 为天线航迹到场景中心点的最短距离,基线与飞行方向垂直

且与水平方向的夹角为 α , H 为天线 A_1 的高度。

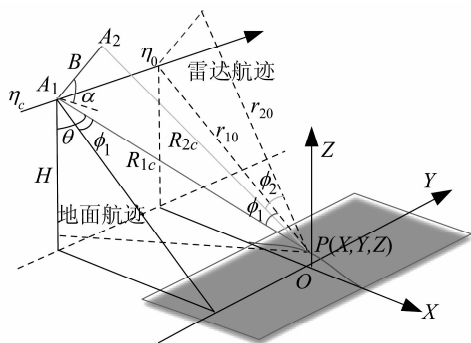


图1 双天线斜视 InSAR 成像几何关系

Fig. 1 Dual-antenna Squint InSAR Geometry

据文献[1][4],在垂直航迹平面不同距离处两天线间的距离差 δr 与参考距离处两天线的距离差 δr_{ref} 以及参考天线斜距 r 之间的关系可近似表示为:

$$\delta r = \delta r_{ref} + k_s (r - r_{ref})$$

$$k_s = -\frac{B \cos(\theta_{ref} - \alpha)}{r_{ref}} \cot(\theta_{ref} - \Omega)$$

其中, r_{ref} 为参考天线的参考斜距, θ_{ref} 为垂直航迹面内参考点的主天线视角, α 为基线倾角, Ω 为地形平均坡度。

则在斜视干涉 SAR 工作模式下有:

$$\delta R(r) = R_2 - R_1 = \frac{1}{D(f_{\eta_c})} (r_2 - r_1) = \frac{1}{D(f_{\eta_c})} \cdot \delta r$$

$$= \frac{1}{D(f_{\eta_c})} [\delta r_{ref} + k_s (r - r_{ref})] \quad (1)$$

其中 $D(f_{\eta_c})$ 为距离徙动因子。

$$D(f_{\eta_c}) = \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 f_{\eta_c}^2}{4\nu_s^2}}$$

假设载机匀速平稳飞行,则 $D(f_{\eta_c})$ 为方位中心频率的函数。可见,目标点到主辅天线的距离差为一个固定项和与参考距离成线性关系的项,此结论为在成像阶段实现自配准奠定了基础。

对于机载双天线干涉 SAR 系统,从工作模式上主要可以分为乒乓球模式和标准模式^[1]。以与主天线最短距离为 $r_{10} \rightarrow r_0$ 的目标为例,信号距离历程可表示为:

$$R_1(\eta; r_0) = \sqrt{r_0^2 + \nu_s^2 (\eta - \eta_0)^2} \quad (2)$$

$$R_2(\eta; r_0) = \sqrt{r_0^2 + \nu_s^2 (\eta - \eta_0)^2} + m \delta R(\eta; r_0)$$

$$= R_1(\eta; r_0) + m\delta R(\eta; r_0) \quad (3)$$

式(2)、(3)中, ν_s 为雷达方位向飞行速度; m 为常数, 当 $m=1$ 时, 干涉 SAR 系统工作于乒乓球模式, $m=1/2$ 时, 干涉 SAR 系统工作于标准模式。则该点目标主辅天线回波信号经过混频解调之后可表示为:

$$\begin{aligned} ss_{1,2}(\tau, \eta; r_0) = & \sigma \cdot w_a(t) \cdot w_R \left[\tau - \frac{2R_{1,2}(\eta; r_0)}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left\{ j\pi K_r \left[\tau - \frac{2R_{1,2}(\eta; r_0)}{c} \right]^2 \right\} \\ & \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi R_{1,2}(\eta; r_0)}{\lambda} \right\} \quad (4) \end{aligned}$$

式(4)中 K_r 为发射线性调频信号的调频率, σ 为点目标后向散射特性, $w_a(\eta)$ 为方位向天线方向性函数, $w_R(\tau)$ 为发射脉冲包络, $R_{1,2}(\eta; r_0)$ 为目标点到主辅天线的斜距变化, 由于当 $m=0$ 时, 即为主天线的回波信号, 则我们将距离历程可统一表示为:

$$R(\eta; r_0) = \sqrt{r_0^2 + \nu_s^2 (\eta - \eta_0)^2} + m\delta R(\eta; r_0)$$

则可将主辅天线回波信号一致表示为:

$$\begin{aligned} ss(\tau, \eta; r_0) = & \sigma \cdot w_a(t) \cdot w_R \left[\tau - \frac{2R(\eta; r_0)}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left\{ j\pi K_r \left[\tau - \frac{2R(\eta; r_0)}{c} \right]^2 \right\} \\ & \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi R(\eta; r_0)}{\lambda} \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

3 自配准成像算法推导

3.1 回波信号特性分析

根据图 1 的机载双天线斜视干涉 SAR 成像几何关系, 假设主辅天线对同一区域进行成像。则有方位特性:

$$f_{1dc} = \frac{2\nu_s \sin(\phi_1)}{\lambda}; f_{2dc} = \frac{2\nu_s \sin(\phi_2)}{\lambda} \quad (6)$$

$$\Delta f_{21} = f_{2dc} - f_{1dc} = \frac{2\nu_s}{\lambda} [\sin(\phi_2) - \sin(\phi_1)] \quad (7)$$

(1) $\phi_1 = \phi_2 = 0$ 时, 双天线干涉 SAR 正侧视, 由式(6)、式(7)多普勒中心频率: $f_{1dc} = f_{2dc} = 0$;

(2) $\phi_1 \neq 0; \phi_2 \neq 0$ 时, 双天线干涉 SAR 存在斜视角, 多普勒中心频率不为零。

实际上对于机载双天线干涉 SAR 系统, 为了实现对同一区域的同时成像, 基线垂直于飞行方向时斜视角相差很微小, 因此有: $f_{2dc} \approx f_{1dc}$, 本文的推导中假设主辅天线的多普勒中心频率差别很小, 不进行多普勒中心频率补偿的研究而主要进行参考方位频率不为零时的自配准成像算法的基本公式和具体实现过程的推导。

3.2 主辅天线距离历程差分析

式(1)给出了干涉 SAR 斜视工作模式下双天线回波信号的距离历程差重写如下:

$$\begin{aligned} \delta R(\eta_c; r) = & R_2 - R_1 = \frac{1}{D(f_{\eta c})} (r_2 - r_1) = \frac{1}{D(f_{\eta c})} \cdot \delta r \\ = & \frac{1}{D(f_{\eta c})} [\delta r_{ref} + k_s (r - r_{ref})] \\ = & \frac{\delta r_{ref}}{D(f_{\eta c})} + \frac{k_s (r - r_{ref})}{D(f_{\eta c})} \end{aligned}$$

其中:

$$D(f_{\eta c}) = \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 f_{\eta c}^2}{4\nu_s^2}}$$

$$\delta r_{ref} = r_{2ref} - r_{1ref} = B \cos(\theta_{ref} - \beta)$$

$$f_{\eta c} = \frac{2\nu_s \sin(\phi)}{\lambda}$$

这里若以基线和斜视角为变量进行讨论, 可见, 斜视情况下的双天线距离历程差不仅与基线长度有关而且还与斜视角有关。从上式可以看出, 基线越长, 斜视角越大主辅天线回波的距离历程差越大, 各自成像后的偏移也会越大, 同时若 SAR 在距离向的分辨率越高, 那么主辅图像偏移像素就越多, 超过一个像素的偏移则会导致主辅图像严重失配而得不到正确的干涉相位最终导致测高的较大误差。为了实现主辅天线的配准, 我们在较为准确地估计了主辅天线距离历程差的基础上以主天线回波为基准对辅天线回波成像过程进行调整, 补偿偏移从而实现配准处理。

3.3 机载双天线斜视干涉 SAR 自配准成像过程

ECS 算法的基本框图如图 2 所示^[3], 且本文重点介绍与配准相关的主要方面, 即对 ECS 算法流程中的运动补偿不做讨论。

回波信号式(5)经过方位 FFT 变换后进入距

离-多普勒域,此时的信号可以表示为:

$$S(\tau, f_\eta; r_0) = A_0 w_r \left(\tau - \frac{2R(f_\eta; r_0)}{c} \right) \cdot w_a \left(-\frac{r \lambda f_\eta}{2\nu^2 D(f_\eta)} \right) \cdot \exp \left\{ j\pi k_m(f_\eta, r_{ref}) \cdot \left[\tau - \frac{2R(f_\eta; r_0)}{c} \right]^2 \right\} \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi r_0}{\lambda} \cdot D(f_\eta) \right] \quad (8)$$

式(8)中 A_0 为一复常数。式中第一相位项为距离调频信号,第二相位项为频域内的方位调制信号。且有:

$$R(f_\eta; r_0) = \frac{r_0}{D(f_\eta)} = \frac{r_0}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2 f_\eta^2}{4\nu_s^2}}} \quad (9)$$

$$k_m(f_\eta, r_{ref}) = \frac{k_r}{1 - k_r z}, z = \frac{c r_{ref} f_\eta^2}{2\nu_s^2 D^3(f_\eta)} \quad (10)$$

式(9)表明,距离徙动的固有缩放是方位频率的函数,只有当 $f_\eta = 0$ 处, RD 域中的距离徙动才等于与最近距离对应的真实距离 r_0 ,而当 $f_\eta = f_{\eta ref}$ 时,距离徙动因子才与参考方位的距离徙动因子一致。当存在斜视角时,为了避免距离向较大的带宽偏移,一般将参考多普勒频率选为参考目标(场景中心点)^[10]的多普勒中心频率即参考距离为参考点(以场景中心点为参考)的最短距离表示为: r_{ref} ,方位参考频率为参考点的多普勒中心频率为表示为 $f_{\eta ref}$ 。

则式(9)中:RD 域内的距离徙动:

$$R(f_\eta; r_0) = \frac{r_0}{D(f_\eta)} = \frac{r_0}{D(f_{\eta ref})} \cdot [1 + \alpha_{cs}(f_\eta)] = \frac{r_0}{D(f_{\eta ref})} \cdot [1 + \alpha_{cs}(f_\eta)] \quad (11)$$

通过线性调频操作,使得最短斜距 r_0 处的目标的相位中心搬移到新的位置,可表示为:

$$\tau_{cs}(f_\eta) = \frac{2}{c} \left[r(f_\eta, r_{ref}) + \frac{r_0}{D(f_{\eta ref})} - \frac{r_{ref}}{D(f_{\eta ref})} \right] \quad (12)$$

因此 CS 调频因子可表示为:

$$\alpha_{cs}(f_\eta) = \frac{D(f_{\eta ref})}{D(f_\eta)} - 1 \quad (13)$$

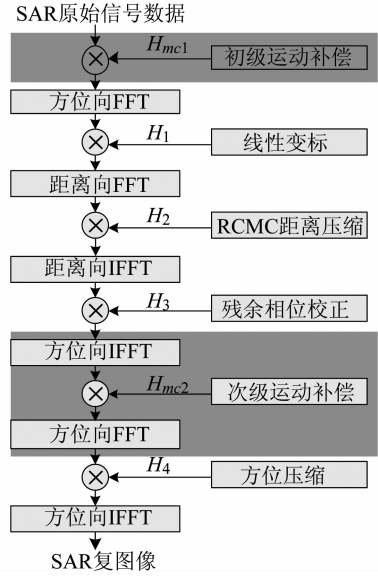


图2 ECS算法流程

Fig. 2 Block diagram of the extended chirp scaling algorithm

而在 InSAR 配准中由于主辅天线接收回波的距离历程差,为了实现主辅天线的配准,因此需要将历程差从天线 A_2 的信号中减去 $m\delta R(\eta_{ref}; r_0)$,根据式(1)有:

$$\delta R(\eta_{ref}; r_0) = \frac{1}{D(f_{\eta ref})} (r_2 - r_1) = \frac{1}{D(f_{\eta ref})} [\delta r_{ref} + k_s (r_0 - r_{ref})] = \delta R_{ref} + k_s \left(\frac{r_0}{D(f_{\eta ref})} - \frac{r_{ref}}{D(f_{\eta ref})} \right) \quad (14)$$

其中:

$$\delta R_{ref} = \frac{r_{2ref}}{D(f_{\eta ref})} - \frac{r_{ref}}{D(f_{\eta ref})}$$

因此,对于辅天线线性调频信号的相位中心新位置将变为:

$$\tau_{scl}(f_\eta) = \frac{2}{c} \left[r(f_\eta, r_{ref}) - m\delta R_{ref} + (1 - mk_s) \left(\frac{r_0}{D(f_{\eta ref})} - \frac{r_{ref}}{D(f_{\eta ref})} \right) \right] \quad (15)$$

可见:为了实现主辅天线回波信号的配准,辅天线回波信号成像过程中需要进行一下改进:

第一:平移固定的距离 δR_{ref} 。

第二:改进扰动因子,实现频率偏移的同时要实现距离缩放。

根据 ECS 算法原理,可得到新的调频因为:

$$\begin{aligned}\alpha_{scl}(f_\eta) &= \frac{D(f_{\eta ref})}{(1-mk_s)D(f_\eta)} - 1 = \frac{1+\alpha_{cs}(f_\eta)}{(1-mk_s)} - 1 \\ &= \alpha_{cs}(f_\eta) + mk_s \cdot \frac{1+\alpha_{cs}(f_\eta)}{1-mk_s}\end{aligned}\quad (16)$$

由式(16)可见,当 $f_{\eta ref}=0$ 时, $\alpha_{scl}(f_\eta)$ 即为正侧视下的调频因子^[4]。因此,本文中推导的 $\alpha_{scl}(f_\eta)$ 更具有普适性。

由于调频因子发生了变化,那么在 ECS 成像处理过程中的相位函数因子也需要进行必要地改变。推导如下:

根据新的调频因子(线性调频和距离缩放),ECS 的变标方程即 ECS 处理流程中的第一相位函数变为:

$$\begin{aligned}H_1(f_\eta, \tau) &= \exp\left\{j \frac{4\pi}{c} k_m(f_\eta; r_{ref}) \cdot \alpha_{scl}(f_\eta) \left[\frac{c\tau}{2} - m\delta R_{ref} - R(f_\eta; r_{ref}) \right]\right\}\end{aligned}\quad (17)$$

将 RD 域中的信号乘以相位函数 $H_1(f_\eta, \tau)$ 之后,每一个点目标与参考距离处目标具有相同的距离徙动。同时,信号在距离向上将会以 $1-mk_s$ 比例进行缩放。并对此时的信号做距离向 FFT 变换得到:

$$\begin{aligned}S_2(f_\tau, f_\eta) &= A_2 W_r(f_\tau) \cdot W_a\left(-\frac{r_0 \lambda f_\eta}{2\nu^2 D(f_{\eta ref})}\right) \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi r_0 D(f_\eta)}{\lambda} f_\tau\right] \\ &\cdot \exp\left[-j \frac{\pi}{k_m(f_\eta, r_{ref})(1+\alpha_{scl}(f_\eta))} f_\tau^2\right] \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi r_0}{c D(f_{\eta ref})} f_\tau\right] \\ &\cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} \left[m\delta R_{ref} + \frac{r_{ref}}{D(f_{\eta ref})} \cdot \alpha_{cs}(f_\eta) \right] \cdot f_\tau\right\} \\ &\cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi k_m(f_\eta, r_{ref})}{c^2} \cdot \frac{\alpha_{scl}(f_\eta) \cdot [1+\alpha_{cs}(f_\eta)]^2}{1+\alpha_{scl}(f_\eta)} \right. \\ &\cdot \left. \left[\frac{r_0}{D(f_{\eta ref})} - \frac{r_{ref}}{D(f_{\eta ref})} \right]^2\right\}\end{aligned}\quad (18)$$

通过分析得 ECS 处理流程中的距离压缩和一致徙动矫正相位因子如下:

$$H_2(f_\tau, f_\eta) = \exp\left[j \frac{\pi}{k_m(f_\eta, r_{ref})(1+\alpha_{scl}(f_\eta))} f_\tau^2 \right]$$

$$\cdot \exp\left\{ j \frac{4\pi}{c} \left[m\delta R_{ref} + \frac{r_{ref}}{D(f_{\eta ref})} \cdot \alpha_{cs}(f_\eta) \right] \cdot f_\tau \right\}\quad (19)$$

通过因子 $H_2(f_\tau, f_\eta)$ 的补偿之后,对信号做 IFFT 得到距离压缩之后的信号表示为:

$$\begin{aligned}S_3(\tau, f_\eta) &= A_3 w_a\left(-\frac{r_0 \lambda f_\eta}{2\nu^2 D(f_\eta)}\right) \cdot \sin c[\pi \cdot B_r \cdot (\tau - \tau_{scl}(f_{\eta ref}))] \\ &\cdot \exp\left[-j \frac{4\pi r_0 D(f_\eta)}{\lambda}\right] \\ &\cdot \exp\left\{ -j \frac{4\pi k_m(f_\eta, r_{ref})}{c^2} \cdot \frac{\alpha_{scl}(f_\eta) \cdot [1+\alpha_{cs}(f_\eta)]^2}{1+\alpha_{scl}(f_\eta)} \right. \\ &\cdot \left. \left[\frac{r_0}{D(f_{\eta ref})} - \frac{r_{ref}}{D(f_{\eta ref})} \right]^2 \right\}\end{aligned}\quad (20)$$

由分析有:

$$H_3(f_\eta) = \exp\left\{ j \frac{4\pi k_m(f_\eta, r_{ref})}{c^2} \cdot \frac{\alpha_{scl}(f_\eta) \cdot [1+\alpha_{cs}(f_\eta)]^2}{1+\alpha_{scl}(f_\eta)} \right. \\ \cdot \left. \left[\frac{r_0}{D(f_{\eta ref})} - \frac{r_{ref}}{D(f_{\eta ref})} \right]^2 \right\}\quad (21)$$

通过 $H_3(f_\eta)$ 相位因子与信号的相乘补偿掉残余相位得到距离多普勒信号为:

$$\begin{aligned}S_4(\tau, f_\eta) &= A_3 w_a\left(-\frac{r_0 \lambda f_\eta}{2\nu^2 D(f_\eta)}\right) \\ &\cdot \sin c[\pi \cdot B_r \cdot (\tau - \tau_{scl}(f_{\eta ref}))] \\ &\cdot \exp\left[-j \frac{4\pi r_0 D(f_\eta)}{\lambda}\right]\end{aligned}\quad (22)$$

由分析过程清晰地看到,由于使用了距离平移因子和距离缩放因子,经过距离压缩后的点目标不再位于 $\tau = 2r_0/c$ 处,而新的位置为:

$$\begin{aligned}\tau_{scl}(f_{\eta ref}) &= \\ &\frac{2}{c} \left[r(f_{\eta ref}, r_{ref}) - m\delta R_{ref} + (1-mk_s) \left(\frac{r_0}{D(f_{\eta ref})} - \frac{r_{ref}}{D(f_{\eta ref})} \right) \right]\end{aligned}\quad (23)$$

可见对于 $m=0$ 时,则无平移和缩放,相当于对主图像的 CS 成像处理。 $m \neq 0$ 时则进行相应的平移和缩放,相当于对辅图像的自配准处理。

根据文献^{[1][4]},在构造方位压缩函数 H_4 时需

要对图像和位置向量进行反方向的缩放,方位压缩中的 r_0 必须采用经过反方向缩放的位置向量 r_{scl} ($f_{\eta_{ref}}$) 替代,得到:

$$r_{scl}(f_{\eta_{ref}}) = \frac{r_{ref}}{D(f_{\eta_{ref}})} + m\delta R_{ref} + \frac{1}{1-mk_s} \left(\frac{r_0}{D(f_{\eta_{ref}})} - \frac{r_{ref}}{D(f_{\eta_{ref}})} \right) \quad (24)$$

则距离多普勒域中完成方位压缩的相位因子为:

$$H_4(f_\eta) = \exp \left[-j \frac{4\pi r_{scl}(f_{\eta_{ref}})}{\lambda} [1 - D(f_\eta)] \right] \quad (25)$$

距离多普勒域信号式(22)与 $H_4(f_\eta)$ 相乘之后即完成了方位向的压缩,并将信号沿方位向做 IFFT 得到最终时域信号可表示为:

$$S_5(\tau, \eta) = A_4 w_r(\tau - \tau_{scl}(f_{\eta_{ref}})) w_a(\eta - \eta_{ref}) \exp[j\theta(\tau, \eta)] \quad (26)$$

其中, $\theta(\tau, \eta)$ 为目标的绝对相位。

至此,完成了 ECS 算法针对机载双天线斜视干涉 SAR 自配准成像处理的调频因子及补偿相位因子的推导。本文的推导过程中方位参考频率是由 $f_{\eta_{ref}}$ 代替,因此,该推导结果对于斜视和正侧视下均可使用。

4 仿真及分析

为了验证上述推导过程的正确性,分别对点目标和分布目标进行仿真分析。其中系统参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

Tab. 1 Sensor parameters for simulation

载波频率	9.375GHz	采样频率	240MHz
信号带宽	200MHz	PRF	500Hz
基线倾角	30°	侧视角	60°
飞机高度	4km	斜视角	5°/10°
基线长度	2m/5m	载机速度	200m/s

4.1 点目标仿真

图 3 为不同基线不同斜视角下点目标配准前后的横截面图,其中蓝色实线代表主天线,红色虚线代表辅天线。可以看出,随着基线的增长斜视角的增大,主辅天线偏移量均会增大。而采用本文的自配准成像过程能使点目标的主辅图像完全重合,仿真验证了本文对偏移量以及对偏移量的消除的推导的正确性。图 4 为配准误差分析,其中蓝色实线为理论偏移,红色虚线为矫正偏移,而蓝色间断线为配准误差,从配准误差可以看出本文自配准成像过程具有较高的配准精度。

4.2 分布目标仿真

仿真场景为大小为 100m×400m 的粗糙地面,水平为距离向,垂直为方位向。

图 5 为不同基线和不同斜视角下的不同处理方式的干涉纹图。其中,图 5(a)(b)(c)(d)的第一幅图为普通成像后的直接干涉纹图,而第二幅图为采用本文自配准成像之后的干涉纹图,第三幅图为传统的图像域最大相干系数配准后的干涉纹图。从图 5(a)(b)与(c)(d)的对比分析看出:基线较短时,

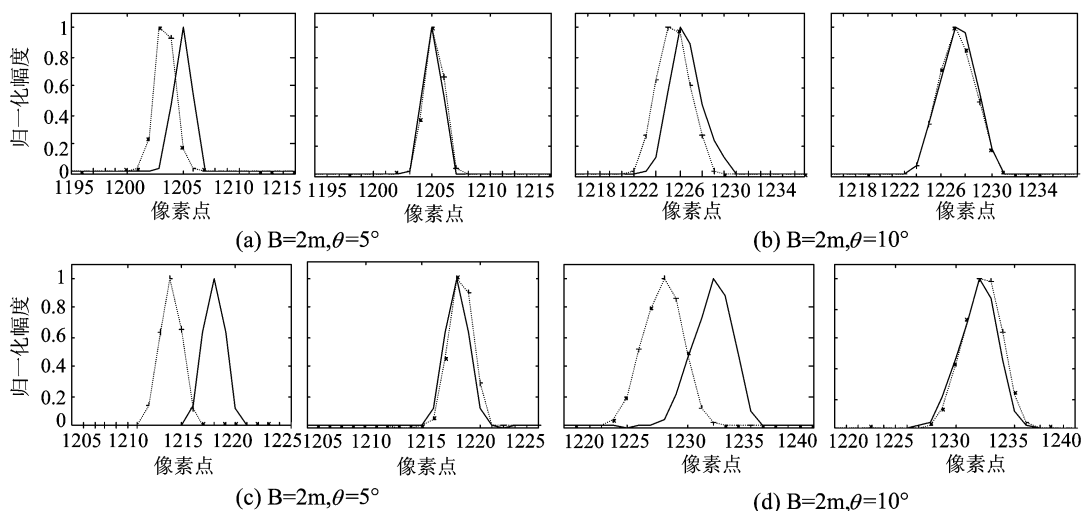


图 3 配准前后点目标的横截面

Fig. 3 Range cross-section of two images of a point

由于主副天线偏移较小,各自成像并直接干涉下也能看到模糊的干涉条纹,而基线增长到一定程度偏移较大,传统的成像后直接干涉没有干涉条纹;经过本文的自配准成像处理后再进行干涉能得到清晰的干涉条纹,且与传统的图像域的相干配准后的干涉条纹都比较清晰。图 5(c)(d)可以看出,斜视角增大之后对图像产生一定的影响,但是自配准成像之后干涉条纹仍然清晰可见,与传统的复图像配准后的干涉纹图质量都很高。

图 6 为不同处理方式下主辅图像的相干系数分布,从中可以看出,自配准成像过程大大提高了主辅图像的相干性,且与传统的图像域相干配准方法相比保持了较高的配准质量的同时大大减少了计算量。

通过仿真分析:自配准成像处理使得机载双天线斜视干涉 SAR 双通道信号相关性大大提高,干涉条纹清晰,同时也避免了图像域配准时大量的插值计算。仿真结果验证了本文推导的基本公式的正确性和有效性。

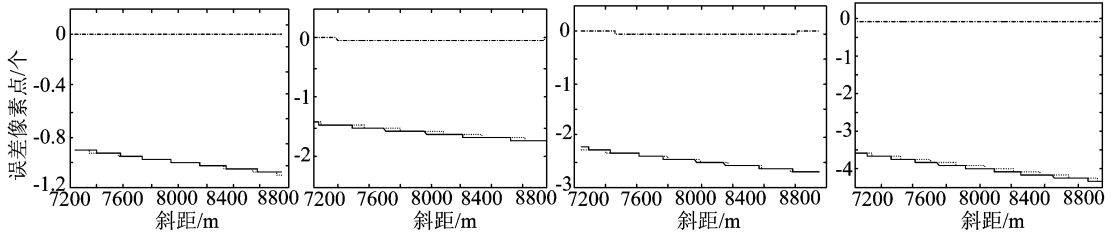


图 4 配准误差分析

Fig. 4 Error of registration

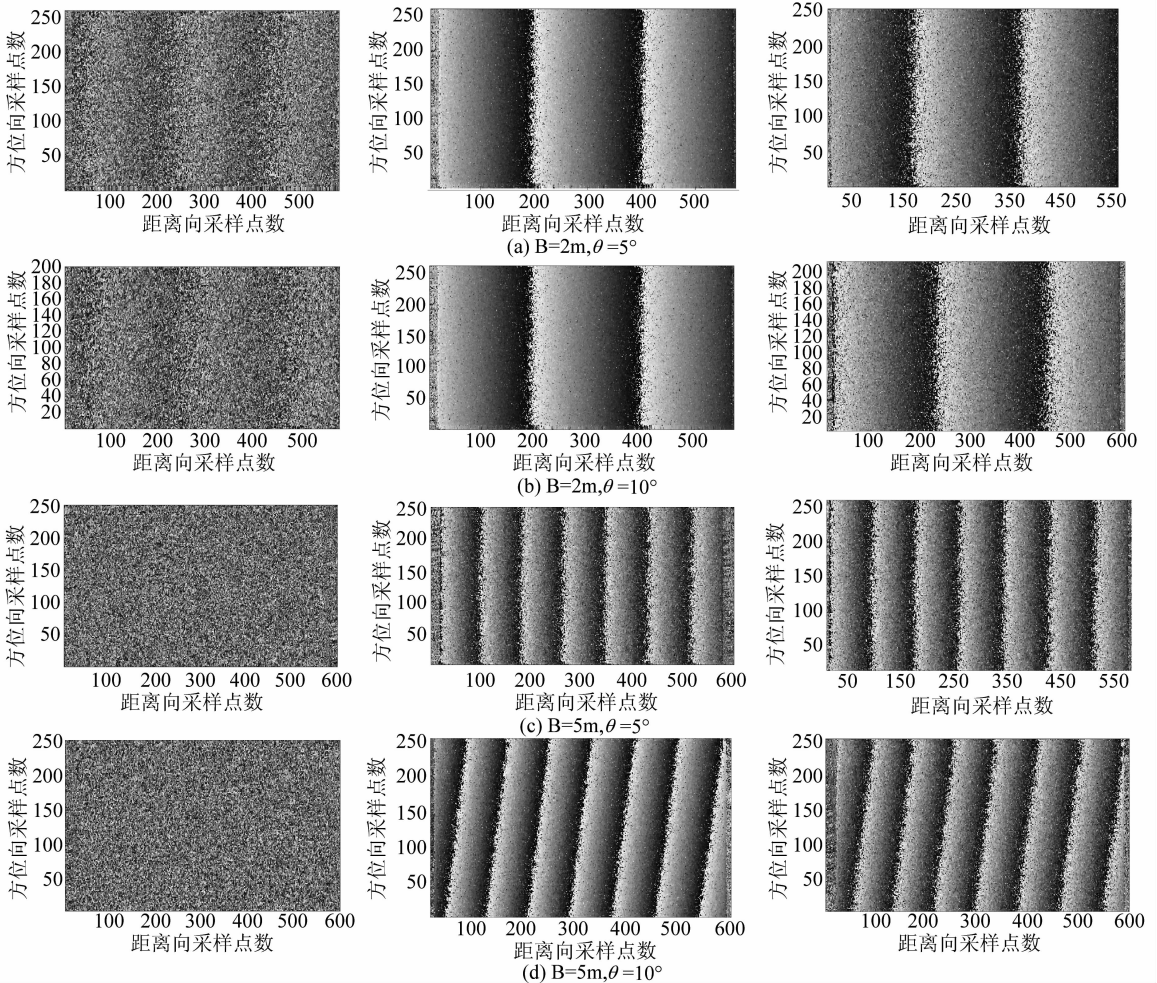


图 5 干涉纹图

Fig. 5 Interferometric fringes images

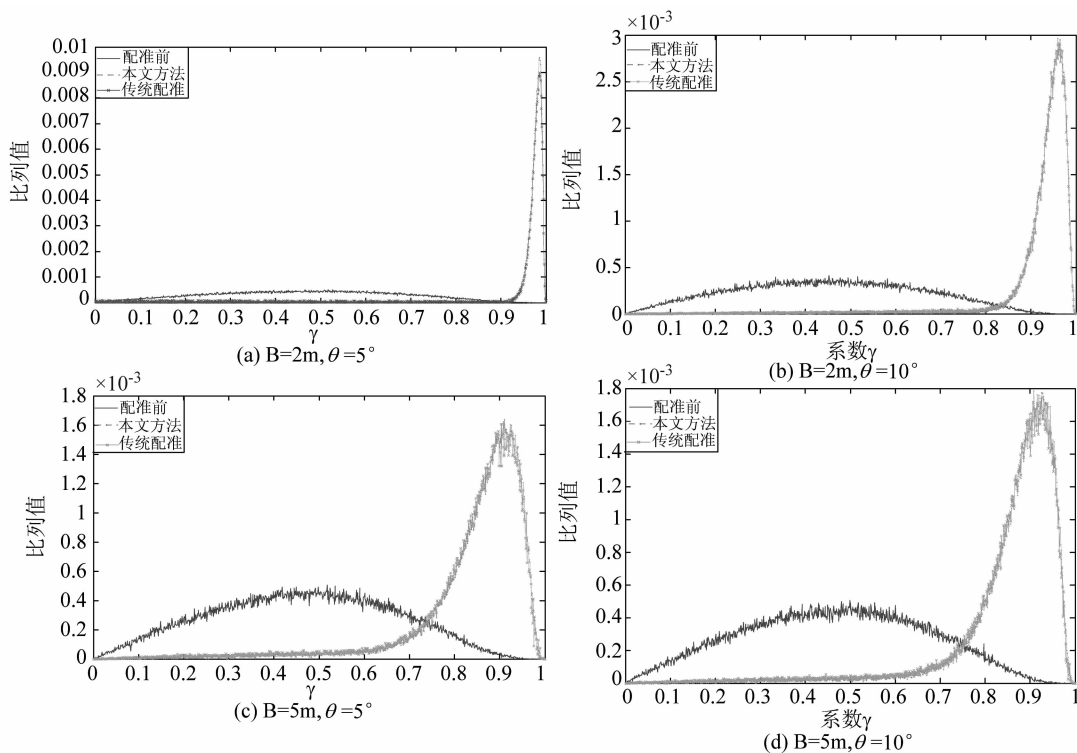


图6 相关系数分布比较

Fig. 6 The distribution of correlation coefficient

5 总结

本文分析了机载双天线斜视干涉 SAR 回波信号特性,探讨了机载双天线斜视干涉 SAR 双通道偏移与基线和斜视角的关系,给出了斜视干涉 SAR 基于 ECS 算法的自配准时的距离向平移和缩放因子,推导出了 ECS 算法的基本公式和具体实现过程,分别对点目标和分布目标进行了成像仿真,通过配准误差及主辅图像相干系数分布特性分析了不同基线、不同斜视角下的配准质量,并与传统的图像域配准方式作对比。结果表明,本文所推导的算法能够实现机载双天线斜视干涉 SAR 高精度地自配准成像过程且大大减小图像域配准的计算量,同时,所推导的基本公式和实现过程同样适用于正侧视干涉 SAR 系统,因此推导结论具有普适性。

参考文献

- [1] Franceschetti G, Riccardo Lanari. Synthetic aperture radar processing[M]. 1994.
- [2] 王超,张红,刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M].

北京:北京科学出版社,2002.

Wang Chao, Zhang Hong, Liu Zhi. Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radar [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 2002.

- [3] Moreira A, Mittermayer J, et al. Extended chirp scaling algorithm for air-and spaceborne SAR data processing in Stripmap and ScanSAR imaging modes [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34 (5): 1123-1136.
- [4] 韦立登,李绍恩,向茂生,吴一戎. 一种新的双天线干涉 SAR 自配准成像算法[J]. 电子与信息学报,2004, 26(增刊):237-243.
Wei Li-deng, Li shao-en, Xiang Mao-sheng, et al. A novel imaging algorithm with automatic registration for dual-antenna InSAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26 (Suppl.): 237-243. (in Chinese)
- [5] Fornaro G, Franceschetti G. Image registration in interferometric SAR processing. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, London, Dec 1995, 142(6):313-320.
- [6] 袁永照. 基于成像的机载双天线干涉 SAR 系统配准方法研究[D]. 北京:中国科学院研究生,2006.
Yuan Yong-zhao. Studies on Methods of Registration of

Airborne Dual-Antenna Interferometric SAR System Based on Imaging [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)

- [7] 袁永照, 向茂生, 吴一戎等. 波数域算法在机载双天线干涉 SAR 成像中的应用[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(10): 2379-2386.
- Yuan Yong-Zhao, Xiang Mao-sheng, et al. The Application of Wavenumber Domain Algorithm in airborne Dual-Antenna InSAR Imaging[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(10): 2379-2386. (in Chinese)
- [8] 金丽花. 斜视聚束合成孔径雷达成像算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- Jin Lihua. Study On the imaging algorithm of the squint spotlight synthetic aperture radar [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008. (in Chinese)
- [9] 陈立福, 韦立登, 向茂盛等. 机载双天线干涉 SAR 非线性形近似自配准成像算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2208-2214.
- Chen Li-fu, Wei Li-deng, Xiang Mao-sheng, Han Song-tao. Auto-registration Imaging Algorithm of Non-linear Approximation for Airborne Dual-antenna InSAR [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(9): 2208-2214. (in Chinese)
- [10] 洪文, 胡东辉等译. 合成孔径雷达成像-算法与实现[M].

北京: 国防工业出版社, 2007.

Hong Wen, Hu Dong-hui Interpreted. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.

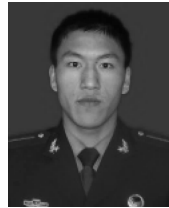
作者简介



贾 丽 女, 1985 年 8 月出生, 四川南充人, 在读博士研究生, 主要研究方向雷达信号处理, 电子对抗。
E-mail: yueyaer_jiali@163.com



贾 鑫 男, 1958 年 5 月出生, 江苏邳县人, 硕士研究生, 教授, 博士生导师, 装备学院光电装备系主任, 中国电子学会会士, 北京电子学会理事, 研究方向信号处理与电子对抗等。



高 阳 男, 1988 年 1 月出生, 河南开封人, 在读博士研究生, 研究方向雷达信号处理、雷达对抗。