

基于斜飞模式的双基地 SAR 成像算法

彭岁阳,张 军,沈振康

(国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 实验室,湖南长沙 410073)

摘 要: 斜飞模式双基地 SAR 系统配置灵活,具有广阔的应用前景.但由于收发平台存在距离向的运动,瞬时斜距方程非常复杂,运动补偿也更困难.本文通过分析斜飞模式下的几何构形,阐述了斜飞模式下距离向运动补偿的基本原理,并设计了两种运动补偿方法——泰勒近似法和模型近似法.然后通过对距离向偏移补偿后的回波分析,完整的推导了基于时域距离走动的双基地 SAR 成像算法.仿真实验表明模型近似法运动补偿的效果要优于泰勒一阶近似法,与泰勒二阶近似法相当,并验证了本文方法对斜飞模式双基地 SAR 成像的有效性.

关键词: 斜飞模式; 双基地 SAR; 运动补偿; 时域距离走动校正

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 09-1967-08

The Bistatic SAR Imaging Algorithm Based on the Slanting Flight Mode

PENG Sui-yang, ZHANG Jun, SHEN Zhen-kang

(ATR Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: The slanting flight mode bistatic SAR system has a flexible configuration and broad application prospects. However, because of the transceiver platform's movement in the range direction, the equation of instantaneous slant range gets very complex, and motion compensation also becomes rather difficult. Through an analysis of squint flight mode geometries, the thesis expounds the keystone of motion compensation in the range domain on slant flight mode, and presents two methods of motion compensation – the Taylor approximation method and model approximation method. Then through analyzing the echo which has compensated the deviation in the range domain, the bistatic SAR Algorithm with range walk correction in time domain is conducted completely. Simulation results show that the motion compensation model approximation method is superior to the first-order Taylor approximation method, and is equal to the second-order Taylor approximation method, as well as verify the effectiveness of the method of slanting flight mode bistatic SAR imaging.

Key words: slanting flight; bistatic SAR; motion compensation; range walk correction in time domain

1 引言

双基地合成孔径雷达(Bistatic SAR)是指发射系统和接收系统安装在不同平台上的合成孔径雷达.与常规 SAR 相比,双基地 SAR 具有获取信息丰富,作用距离远,以及抗干扰性能和抗截获性能较好的特点,是目前 SAR 成像领域最热门的研究方向之一^[1].Soumekh 最先进行了双基地 SAR 成像算法的研究^[2],后来 Ender, Walterscheid 等人^[3~5]将成熟的单基地成像算法进行扩展,使其满足双基地成像的特殊要求,完成了对实际数据的成像.国内朱振波和汤子跃最早研究了双基地距离多普勒算法^[6],况凌和张升康在此基础上作了进一步改进和比较^[7,8].此外,CS 算法^[9,10]、BPA 算法^[11]和 RMA 算法 $(\omega - k)$ ^[12,13]都正在成为双基地 SAR 成像处理的可选方案.

近年来随着双基地 SAR 研究的进一步深入,复杂几何构形的斜飞斜视 SAR 模式开始受到重视.斜飞模式(或称异构)灵活性强,几何构形多样,在军事上可适应于多种战术打击要求,在民用中也可解决地形复杂的地形测绘和遥感测量.汤子跃构建了斜飞模式下收发平台的几何构形,并研究了相关多普勒参数的变化^[14],丁金闪采用加权 LBF 方法来处理斜飞条件下的二维频谱^[15,16].但是,由于收发平台存在距离向的运动,瞬时斜距方程非常复杂,运动补偿也更困难.本文研究了双基地 SAR 斜飞模式的几何构形,构建了适合双基地斜飞平台的坐标系.以此为基础推导了斜飞模式下距离向的运动变化,并设计了两种运动补偿方法——泰勒近似法和模型近似法.运动补偿后的回波模型等效于平飞双基地模式,然后本文推导了基于时域距离走动的双基地 SAR 距离多普勒成像算法.仿真实验获得了斜飞模式

下良好聚焦的双基地 SAR 图像,结果还表明模型近似法运动补偿后的图像质量要优于泰勒一阶近似法,与泰勒二阶近似法相当.

2 几何场景

如图 1 所示双基地斜飞几何场景,发射平台和接收平台的航线不平行,而是相对理想航向分别存在斜飞角 ψ_T 和 ψ_R .发射平台和接收平台的斜视角 θ_T 和 θ_R 的定义不再是与其本身的航线法向的夹角,而是如图 1 所示.设 DE 是场景带中心线,则收发平台天线 T 和 R 的波束在地面的“足迹”沿直线 DE 运动. R_3 和 T_3 是正侧视时收发平台波束在地面的足迹, R_2 和 T_2 是斜视角分别为 θ_R 和 θ_T 时收发平台波束在地面的足迹.完全同步条件下,接收平台波束中心在地面的“足迹” R_2 与发射平台波束中心在地面的“足迹” T_2 重合.为便于分析,将同步条件下的双基地三维测绘场景表示成斜面场景如图 2 所示.

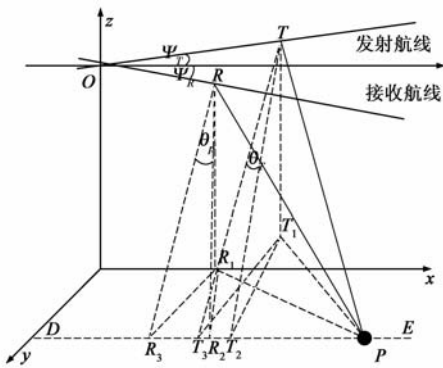


图1 双基地斜飞几何场景

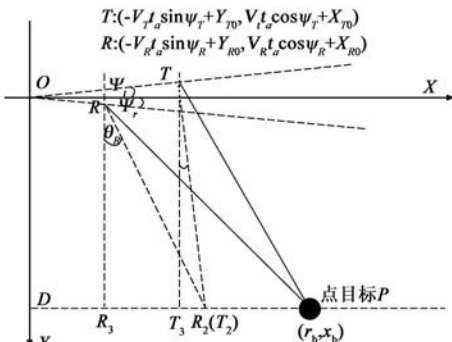


图2 同步时的双基地斜飞模式的几何斜面场景

设接收平台初始位置为 (Y_{R0}, X_{R0}) , 速度为 V_R , 发射平台初始位置为 (Y_{T0}, X_{T0}) , 速度为 V_T , 那么在 t_a 时刻接收平台的位置为 $(V_R t_a \sin \psi_R + Y_{R0}, V_R t_a \cos \psi_R + X_{R0})$, 发射平台的位置为 $(-V_T t_a \sin \psi_T + Y_{T0}, V_T t_a \cos \psi_T + X_{T0})$. 下面考察同步时收发平台速度需满足的条件.

严格的说,固定斜视角的双基地斜飞模式是很难保证波束完全同步的.如图 2 所示完全同步场景,接收

平台斜视角 θ_R 固定时,由几何关系容易得到其发射平台的斜视角 θ_T 是变化的,但在一个合成孔径时间内 θ_T 改变非常小,可以忽略其变化.由图 2 也可以知道,斜飞模式同步时需满足 $V_T \cos \psi_T = V_R \cos \psi_R = V$. 此时在 XOY 坐标系中,发射平台与点目标 (r_b, x_b) 的瞬时距离为:

$$R_T(t_a) = \sqrt{(r_b - Y_{T0} + V_T t_a \sin \psi_T)^2 + (x_b - V_T t_a \cos \psi_T - X_{T0})^2} \quad (1)$$

同理得到接收平台与点目标 (r_b, x_b) 的瞬时距离为(接收平台是向靠近目标地域飞行):

$$R_R(t_a) = \sqrt{(r_b - Y_{R0} - V_R t_a \sin \psi_R)^2 + (x_b - V_R t_a \cos \psi_R - X_{R0})^2} \quad (2)$$

于是双基地 SAR 的基带回波可以表示成:

$$s(t, t_a) = w(t) w_T(t_a) w_R(t_a) \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi f_c}{c} (R_T(t_a) + R_R(t_a))\right\} \cdot \exp\left\{j\pi K_r \left(t - \frac{R_T(t_a) + R_R(t_a)}{c}\right)^2\right\} \quad (3)$$

利用 $H_{rc}(f_r) = \exp\left\{j\frac{\pi}{K_r} f_r^2\right\}$ 对式(3)进行距离向脉冲压缩,则得到距离频域表达式:

$$s(f_r, t_a) = W_r(f_r) w_T(t_a) w_R(t_a) \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi(f_c + f_r)}{c} (R_T(t_a) + R_R(t_a))\right\} \quad (4)$$

3 运动补偿

理想条件下,双基地 SAR 的收发平台是平行飞行的,而斜飞时斜飞时,收发平台在距离向有偏移,偏移量分别为 $V_T t_a \sin \psi_T$ 和 $-V_R t_a \sin \psi_R$,这是需要采用运动补偿的部分.因此,斜飞双基 SAR 的算法思想是首先计算相对距离偏差进行运动补偿,将回波信号补偿成双基平飞模式;然后采用双基平飞条件下的 SAR 成像算法如 Range-Doppler、Chirp-Scaling 算法等进行后续成像操作.下面给出相对距离偏差计算的两种方法,即泰勒近似法和模型近似法.

3.1 泰勒近似法

通常采用泰勒展开公式求解斜飞时在距离向的偏移量.采用泰勒近似公式时,并非直接以 t_a 为自变量进行计算,而是要进行变换处理,其原因是近似方式须与后续的成像方法相适应.后续将采用双基平飞模式的 SAR 成像方法,那么式(1)的近似公式如下推导.不妨对式(1)进行变量代换,令

$$b = r_b - Y_{T0}, h = V_T t_a \sin \psi_T, a = x_b - V_T t_a \cos \psi_T - X_{T0}$$

则式(1)可写成如下形式:

$$R(h) = \sqrt{(b - h)^2 + a^2} \quad (5)$$

r_b 对应平台航线与点目标的最短距离,一般为十几公

里,所以 b 值较大。 x_b 对应于点目标的方位坐标, a 值也较大。一般一次合成孔径时间约为几秒钟,则 t_a 较小,对应于 h 较小。根据高等数学的导数理论有:

$$\text{一阶导数: } R'(h) = \frac{b-h}{\sqrt{(b-h)^2 + a^2}}$$

$$\text{二阶导数: } R''(h) = \frac{a^2}{[(b-h)^2 + a^2]^{3/2}}$$

$R(h)$ 的泰勒展开表示式为如下形式:

$$R(h) = R(0) + R'(0) \cdot h + \frac{1}{2} \cdot R''(0) \cdot h^2 + O(h) \quad (6)$$

对上式保留一次项,并将 b 、 a 和 h 代入(6),即为:

$$R_T(t_a) \approx R'_T(t_a) + \frac{r_b - Y_{T0}}{R'_T(t_a)} V_{Tt_a} \sin \psi_T \quad (7)$$

对上式保留二次项,并将 b 、 a 和 h 代入式(6),即为:

$$R_T(t_a) \approx R'_T(t_a) + \frac{r_b - Y_{T0}}{R'_T(t_a)} V_{Tt_a} \sin \psi_T + \frac{(x_b - V_{Tt_a} \cos \psi_T - X_{T0})^2}{2 [R'_T(t_a)]^3} (V_{Tt_a} \sin \psi_T)^2 \quad (8)$$

此处,

$$R'_T(t_a) = \sqrt{(r_b - Y_{T0})^2 + (x_b - V_{Tt_a} \cos \psi_T - X_{T0})^2} \quad (9)$$

理论上说,并不是非要 h 非常小才能进行泰勒展开近似,只是同等近似程度下, h 较小时泰勒展开公式所需的阶数较小。式(8)中不仅与 t_a 相关,而且与点目标坐标 (r_b, x_b) 有关。实际中 (r_b, x_b) 是未知的,因此需要进一步近似。 $R'_T(t_a)$ 以发射平台波束中心与地面“足迹”的斜距 TT_2 替代,而 $r_b - Y_{T0}$ 即等于 TT_3 ,于是, $\frac{r_b - Y_{T0}}{R'_T(t_a)} \approx \frac{TT_3}{TT_2} = \cos \theta_T$ 。而式(8)的第 3 项中,若同样以地面“足迹”替代点目标位置,则 $\frac{x_b - V_{Tt_a} \cos \psi_T - X_{T0}}{R'_T(t_a)} \approx \frac{T_2 T_3}{TT_2} = \sin \theta_T$,

$R'_T(t_a)$ 以中心斜距 TT_2 的值 R_{T0} 替代,则式(8)进一步写成:

$$R_T(t_a) \approx R'_T(t_a) + V_{Tt_a} \sin \psi_T \cos \theta_T + \frac{\sin^2 \theta_T}{2 R_{T0}} (V_{Tt_a} \sin \psi_T)^2 \quad (10)$$

同理接收平台也可写成如下形式:

$$R_R(t_a) \approx R'_R(t_a) - V_{Rt_a} \sin \psi_R \cos \theta_R + \frac{\sin^2 \theta_R}{2 R_{R0}} (V_{Rt_a} \sin \psi_R)^2 \quad (11)$$

此处

$$R'_R(t_a) = \sqrt{(r_b - Y_{R0})^2 + (x_b - V_{Rt_a} \cos \psi_R - X_{R0})^2} \quad (12)$$

R_{R0} 是接收平台的中心斜距值。式(10)和式(11)中的第 2 项和第 3 项即为需要运动补偿的部分。若只进行一阶补

偿,不妨记一阶近似项为 $\Delta R_1 = V_{Tt_a} \sin \psi_T \cos \theta_T - V_{Rt_a} \sin \psi_R \cos \theta_R$, 则其校正因子为:

$$H_{1c}(f_r, t_a) = \exp\left\{ \frac{j2\pi(f_c + f_r)}{c} \Delta R_1 \right\} \quad (13)$$

若进行二阶补偿,不妨记二阶近似项为 $\Delta R_2 = \Delta R_1 + \frac{\sin^2 \theta_T}{2 R_{T0}} (V_{Tt_a} \sin \psi_T)^2 + \frac{\sin^2 \theta_R}{2 R_{R0}} (V_{Rt_a} \sin \psi_R)^2$, 同理可得到其运动补偿因子

$$H_{2c}(f_r, t_a) = \exp\left\{ \frac{j2\pi(f_c + f_r)}{c} \Delta R_2 \right\} \quad (14)$$

校正完第二项,则收发平台到点目标的等效瞬时距离分别为 $R'_T(t_a)$ 和 $R'_R(t_a)$ 。

3.2 模型近似法

下面我们从模型的角度来考虑距离偏移。由 3.1 节的分析可以得知,运动补偿的实质是将 $R_T(t_a)$ 和 $R_R(t_a)$ 分别补偿成 $R'_T(t_a)$ 和 $R'_R(t_a)$ 的形式。即从斜飞模式场景的瞬时斜距补偿成平飞模式场景的瞬时斜距。此时,不妨考虑构建平飞模式下的斜距,然后比较二者的距离偏移。模型构建时,需特别注意一点,即不能给平飞模式的斜距增加多余的方位向偏移量,否则会造成方位向多余的空变误差,从而造成方位散焦。由此可知,建立的模型不能引入方位向的分速度,于是斜距模型和平飞模型需要作简化处理。模型构建方法如下:

Step 1 考虑到实际中点目标位置 (r_b, x_b) 是未知的,因此无法得到其精确的相位,此时不妨以波束中心在地面的“足迹”替代点目标位置。

Step 2 设 t_a 等于 0 时,地面“足迹”的坐标为 (R_c, X_c) , 那么在 t_a 时刻地面“足迹”的坐标为 $(R_c, X_c + V_{t_a})$ (同步)。于是,由式(9)得到发射平台到地面“足迹”的瞬时距离为:

$$R_{Tc}(t_a) = \sqrt{(R_c - Y_{T0} - V_{Tt_a} \sin \psi_T)^2 + (X_c - V_{Rt_a} \cos \psi_R - X_{T0})^2} \quad (15)$$

式(15)中 $-V_{Rt_a} \cos \psi_R$ 项与方位向处理相关,为避免补偿时引入新的空变误差,将此项置 0。于是得到简化后的瞬时斜距:

$$\tilde{R}_{Tc}(t_a) = \sqrt{(R_c - Y_{T0} - V_{Tt_a} \sin \psi_T)^2 + (X_c - X_{T0})^2} \quad (16)$$

这样处理的实质是将斜飞模型分成两个部分,一是平飞部分,一是距离向运动部分。针对运动补偿,采用距离向运动部分。

Step 3 由式(6)得到补偿后发射平台到地面“足迹”的理想瞬时距离(即双基平飞场景的瞬时距离)为:

$$R'_{Tc}(t_a) = \sqrt{(R_c - Y_{T0})^2 + (X_c - V_{Rt_a} \cos \psi_R - X_{T0})^2} \quad (17)$$

由于我们构建的简化斜飞场景是式(16),不考虑方

位向的运动,于是式(17)需要作同样的处理,简化后的平飞瞬时斜距:

$$\tilde{R}'_{Tc}(t_a) = \sqrt{(R_c - Y_{T0})^2 + (X_c - X_{T0})^2} \quad (18)$$

Step 4 同理可得到接收平台与地面“足迹”的相应关系:

$$\tilde{R}_{Rc}(t_a) = \sqrt{(R_c - Y_{R0} - V_{Rt_a} \sin \psi_R)^2 + (X_c - X_{R0})^2} \quad (19)$$

$$\tilde{R}'_{Rc}(t_a) = \sqrt{(R_c - Y_{R0})^2 + (X_c - X_{R0})^2} \quad (20)$$

于是得到此时需要补偿的距离为 $\Delta R_{mc} = \tilde{R}'_{Tc}(t_a) + \tilde{R}_{Rc}(t_a) - \tilde{R}'_{Tc}(t_a) - \tilde{R}'_{Rc}(t_a)$, 则完整的相位补偿式可以表示为:

$$H_{mc}(f_r, t_a) = \exp\left\{j \frac{2\pi(f_c + f_r)}{c} \Delta R_{mc}\right\} \quad (21)$$

式(16)、式(18)、式(19)和式(20)是可以根据几何场景的简化模型得到的,故本文称之为“模型近似法”。

从上述构造过程可以看出,模型构建有两处近似:(1)利用“足迹”替代目标位置;(2)不考虑方位向运动引起的空变误差.如果瞬时斜距中含有方位向分速度,则 ΔR_{mc} 中有多余的由方位向分速度引起空变误差,这一误差将引起方位向散焦。

3.3 近似方法的比较

从原理上说,泰勒近似法与模型近似法的类似之处都在于将斜飞场景的瞬时斜距补偿成平飞场景的瞬时斜距.区别在于近似的方法,即泰勒近似法通过数学上的泰勒展开公式进行近似,而模型近似法则利用场景模型的差异进行近似.运动补偿完后,二者的后续成像操作是相同的。

为比较泰勒近似法与模型近似法运动补偿效果,

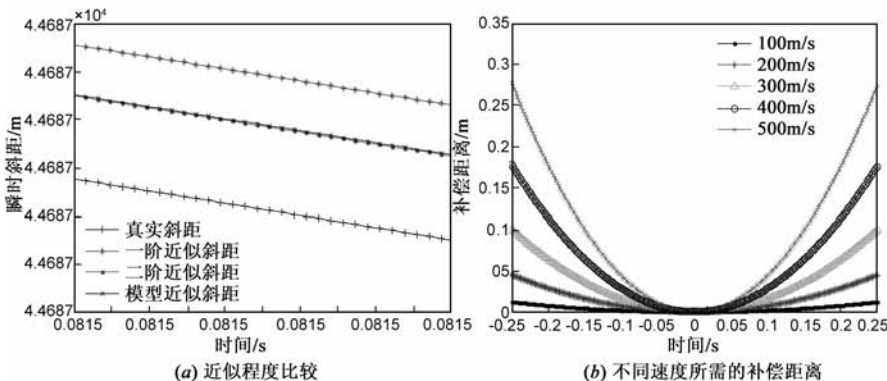


图3 两种近似方法的比较

采用时域距离走动校正的方法时,需要考虑坐标系的选取,一般以视线方向的斜距为纵轴,而以航向为横轴.双基地几何场景中,斜距方向不同,设 $R_2 R$ 为 r_R , $T_2 T$ 为 r_T ,则一般以 $\frac{r_R + r_T}{2}$ 为等效斜距,横向坐标的选择则要复杂.虽然收发平台的视线斜距方向不同,但同步时的足迹相同,设初始时刻收发平台在地面的“足

图3(a)给出了这两种方法近似程度的比较.此处发射平台距离向的分速度为 100m/s,接收平台距离向的分速度为 300m/s,方位向同步速度为 500m/s.可以看出,泰勒一阶近似的斜距要差于二阶近似和模型近似法,模型近似法和二阶近似法的近似程度接近,后者稍好一些.为比较不同速度条件下的补偿距离,图3(b)给出了接收平台在不同距离向分速度条件下采用模型近似法时需补偿的 ΔR_{mc} ,距离向分速度越大,需要补偿的距离越多。

4 改进的距离多普勒算法

运动补偿完毕后,双基地 SAR 相当于平飞时的几何场景如图4所示.其回波表达式可表示如下:

$$\begin{aligned} s_{mc}(f_r, t_a) &= s(f_r, t_a) \cdot H_1(f_r, t_a) \\ &\approx W_r(f_r) w_T(t_a) w_R(t_a) \\ &\cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi(f_c + f_r)}{c} (R'_T(t_a) + R'_R(t_a))\right\} \quad (22) \end{aligned}$$

由于“双根号”问题的存在,导致二维频谱很难计算.目前的处理方法主要是在各自驻相点展开然后求近似频谱.在参数差异较大时,用该方法求得的频谱误差较大.李燕平提出了求解解析解和求数值解的两种方法^[17].其中数值解适合后处理,而不适应于机载或弹载等实时处理平台;而采用解析方法时,其中的等效斜视角相当于场景中心处点目标的斜视角,这样求得二维频谱在边缘处也存在误差.本文采用的是基于时域距离走动的改进距离多普勒算法,首先进行距离走动校正,然后再求解二维频谱,并进行距离弯曲和方位聚焦。

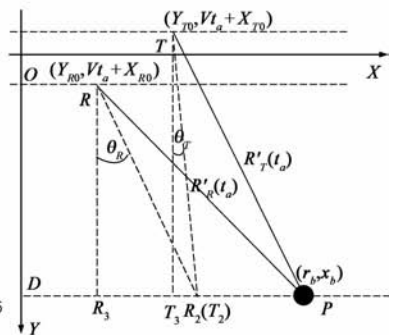


图4 运动补偿完毕后的等效平飞几何场景

迹”为 D_0 , DD_0 等于 X_0 , 则点目标 P 沿方位向到视线斜距的长度为 $D_0 P$, 设 $D_0 P$ 等于 x , 那么有 $x_b = x + X_0$. 于是得到如图5所示几何参数设定。

根据图4的几何关系, TP 等于 $R'_T(t_a)$. $R'_R(t_a)$ 可利用三角关系 $TT_2 P$ 求得. 根据三角余弦定理得到:

$$R'_T(t_a) = \sqrt{r_T^2 + (x - V_{T_a})^2 - 2(x - V_{T_a}) r_T \cos(\pi - \theta_T)} \quad (23)$$

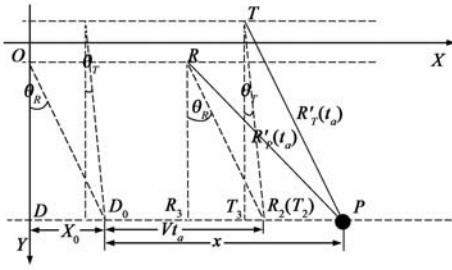


图5 斜视坐标系下的几何参数设定

式(23)和式(9)是等价的关系,只不过坐标表示不同.对式(23)进行二阶泰勒展开近似,得到如下表达式:

$$R'_T(t_a) \approx r_T - \sin\theta_T(V_{T_a} - x) + \frac{(V_{T_a} - x)^2 \cos^2\theta_T}{2r_T} \quad (24)$$

同理,得到发射平台的瞬时斜距近似表达式:

$$R'_R(t_a) \approx r_R - \sin\theta_R(V_{R_a} - x) + \frac{(V_{R_a} - x)^2 \cos^2\theta_R}{2r_R} \quad (25)$$

将式(24)、式(25)代入式(22),并进行整理得到:

$$\begin{aligned} s_{mc}(f_r, t_a) = & A_0 W_r(f_r) w_T(y_T) w_R(y_R) \\ & \cdot \exp\left\{-\frac{j2\pi(f_c + f_r)}{c}(r_T + r_R + x\sin\theta_R + x\sin\theta_T)\right\} \\ & \cdot \exp\left\{\frac{j2\pi(f_c + f_r)}{c}(V_{T_a}\sin\theta_R + V_{R_a}\sin\theta_T)\right\} \\ & \cdot \exp\left\{-\frac{j\pi f_r}{c}\left[\frac{V^2 \cos^2\theta_T}{r_T}\left(t_a - \frac{x}{V}\right)^2 + \frac{V^2 \cos^2\theta_R}{r_R}\left(t_a - \frac{x}{V}\right)^2\right]\right\} \\ & \cdot \exp\left\{-\frac{j\pi f_c}{c}\left[\frac{V^2 \cos^2\theta_T}{r_T}\left(t_a - \frac{x}{V}\right)^2 + \frac{V^2 \cos^2\theta_R}{r_R}\left(t_a - \frac{x}{V}\right)^2\right]\right\} \end{aligned} \quad (26)$$

式(26)中第1指数项是距离向因子,第2指数项是距离走动因子,第3指数项是距离弯曲项,第4指数项是方位压缩项.第3指数项中的 r_T 和 r_R 可以用收发平台到场景带中心线的斜视距离 R_{cT} 和 R_{cR} 替代.

令 $r' = (r_T + r_R + y\sin\theta_R + y\sin\theta_T)/2$, $\lambda = c/f_c$, 并令式(26)乘以距离走动补偿因子 $H_2(f_r, t_a) = \exp\left\{-\frac{j2\pi(f_c + f_r)}{c}(\sin\theta_R V_{T_a} + \sin\theta_T V_{R_a})\right\}$, 则得到:

$$\begin{aligned} s_{umc}(f_r, t_a) = & A_0 W_r(f_r) w_T(y_T) w_R(y_R) \cdot \exp\left\{-\frac{j4\pi(f_c + f_r)}{c}r'\right\} \\ & \cdot \exp\left\{-\frac{j\pi f_r}{c}\left[\frac{V^2 \cos^2\theta_T}{r_T}\left(t_a - \frac{x}{V}\right)^2 + \frac{V^2 \cos^2\theta_R}{r_R}\left(t_a - \frac{x}{V}\right)^2\right]\right\} \\ & \cdot \exp\left\{-\frac{j\pi f_c}{c}\left[\frac{V^2 \cos^2\theta_T}{r_T}\left(t_a - \frac{x}{V}\right)^2 + \frac{V^2 \cos^2\theta_R}{r_R}\left(t_a - \frac{x}{V}\right)^2\right]\right\} \end{aligned} \quad (27)$$

令 $\lambda = c/f_c$, $K_a = \frac{V^2 \cos\theta_R}{\lambda r_R} + \frac{V^2 \cos\theta_T}{\lambda r_T}$, 对式(27)稍做变化得到:

$$\begin{aligned} s_r(f_r, t_a) = & A_0 W_r(f_r) w_T(y_T) w_R(y_R) \cdot \exp\left\{-\frac{j4\pi(f_c + f_r)}{c}r'\right\} \\ & \cdot \exp\left\{-\frac{j\pi f_r}{f_c}\left[K_r\left(t_a - \frac{x}{V}\right)^2\right]\right\} \cdot \exp\left\{-j\pi\left[K_r\left(t_a - \frac{x}{V}\right)^2\right]\right\} \end{aligned} \quad (28)$$

对式(28)做方位傅里叶变换,其解的形式应通过驻定相位原理(POSP)求解.利用 POSP 可以得到相位驻定点 $t_a = \frac{x}{V} - \frac{f_a}{\left(1 + \frac{f_r}{f_c}\right)K_d}$, 从而得到回波在二维频率的表达形式:

$$\begin{aligned} s_r(f_r, f_a) = & A_0 W_r(f_r) W_a(f_a) \cdot \exp\left\{-\frac{j4\pi(f_c + f_r)}{c}r'\right\} \\ & \cdot \exp\left\{-\frac{j\pi}{\left(1 + \frac{f_r}{f_c}\right)K_a}f_a^2\right\} \exp\left\{-j2\pi f_a \frac{x}{V}\right\} \end{aligned} \quad (29)$$

又 $\frac{1}{1 + \frac{f_r}{f_c}} \approx 1 - \frac{f_r}{f_c} + \frac{f_r^2}{f_c^2}$, 并将该式代入式(29)得到:

$$\begin{aligned} s_r(f_r, f_a) = & A_0 W_r(f_r) W_a(f_a) \cdot \exp\left\{-\frac{j4\pi(f_c + f_r)}{c}r'\right\} \\ & \cdot \exp\left\{-j\pi\left(\frac{f_r}{f_c} - \frac{f_r^2}{f_c^2}\right)\frac{f_a^2}{K_a}\right\} \cdot \exp\left\{\frac{j\pi}{K_a}f_a^2\right\} \\ & \cdot \exp\left\{-j2\pi f_a \frac{x}{V}\right\} \end{aligned} \quad (30)$$

由式(30)知,因式 $H_3(f_r, f_a) = \exp\left\{j\pi\left(\frac{f_r}{f_c} - \frac{f_r^2}{f_c^2}\right)\frac{f_a^2}{K_a}\right\}$

用于二次距离压缩和距离徙动校正, $H_4(f_a) = \exp\left\{-\frac{j\pi}{K_a}f_a^2\right\}$ 是方位聚焦因子.

对式(30)进行二次距离压缩、距离徙动校正和方位聚焦,再采用二维 IFFT 变换即可获得双基地 SAR 图像.具体的框图如图 6 所示.上图表明,泰勒近似法和模型近似法在成像流程上是基本相同的,区别在于运动补偿中距离偏移的计算.成像流程采用改进后的 RD 算法,从推导过程与框图可以看出,补偿因子、距离徙动校正因

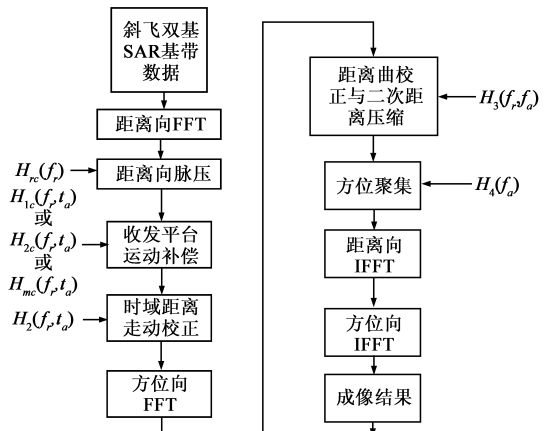


图6 斜飞模式下双基地 SAR 成像算法框图

子和聚焦因子均通过复乘实现,具有较好的实时性.

5 仿真实验分析

5.1 泰勒近似补偿方法仿真

收发平台斜飞运动,几何场景如图 1 所示. 雷达载频 35.5GHz,脉宽 1.67×10^{-6} s,带宽 66.7MHz,脉冲重复周期为 4.8828×10^{-4} s,发射平台距离地面 25000m,与场景带中心线的距离为 11000m,接收平台距离地面 2000m,与场景带中心线的距离为 9000m.理论方位分辨率和距离分辨率均为 4.5m.发射平台的速度为 510m/s,航线与方位向的夹角 ψ_t 为 11.3° ,接收平台的速度为 522m/s,航线与方位向的夹角 ψ_r 为 16.7° .由收发速度和方位夹角可知,收发平台在方位向的分速度均为 500m/s,满足斜飞模式的同步条件.发射平台在距离向的分速度为 100m/s,接收平台在距离向的分速度为 200m/s.

图 7(a)是双基地斜飞模式收发平台正侧视 SAR 成像的结果,而图 7(b)是斜视成像的结果,其中发射平台斜视角 20° ,接收平台斜视角 40° ,运动补偿算法采用泰勒一阶近似法.可以看出正侧视散射点非常清晰,而斜视时方位分辨率下降且散射点有稍许模糊,这是因为距离徙动校正时存在残余,导致方位聚焦时滤波器不完全匹配所致.在图 7 的基础上改变仿真参数,收发平台距离向的分速率均为 200m/s,但方向相反.发射平台斜视角 30° ,接收平台斜视角 40° ,分别采用泰勒一阶近似法和泰勒二阶近似法进行运动补偿,得到仿真结果如图 8 所示,显然泰勒二阶近似后的补偿效果要好于

一阶近似.图 8(a)中散射点的 PSLR 为 -8.13dB ,ISLR 为 -6.27dB .图 8(b)中散射点的 PSLR 为 -10.26dB ,ISLR 为 -7.52dB .

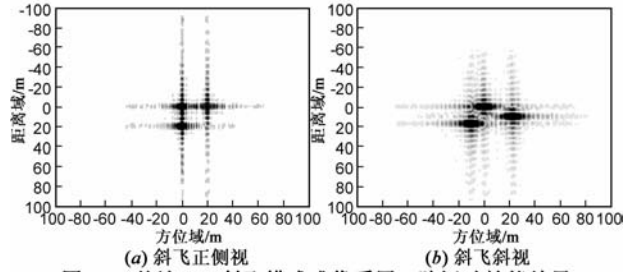


图7 双基地SAR斜飞模式成像采用一阶运动补偿结果

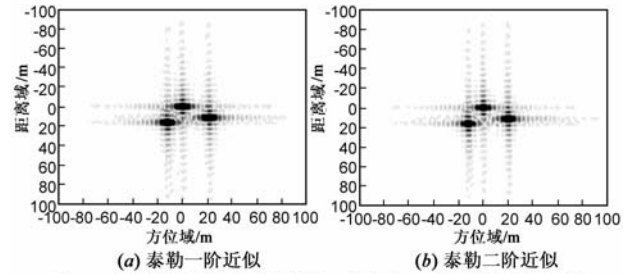


图8 不同泰勒近似方法进行运动补偿后的成像结果比较

5.2 模型近似补偿法仿真与比较

在 5.1 的基础上,将发射平台距离向分速度改为 100m/s,接收平台距离向分速度改为 300m/s,而其他仿真条件不变,得到仿真结果如图 9、图 10 和表 1 所示.

由图 9(a)和图 10(a)可知,接收平台距离向分速度增大后,采用一阶近似法运动补偿的效果有限,成像质量严重下降.采用模型近似法和泰勒二阶近似法的运动补偿效果要优于一阶近似法,故图 9(a)的图像质

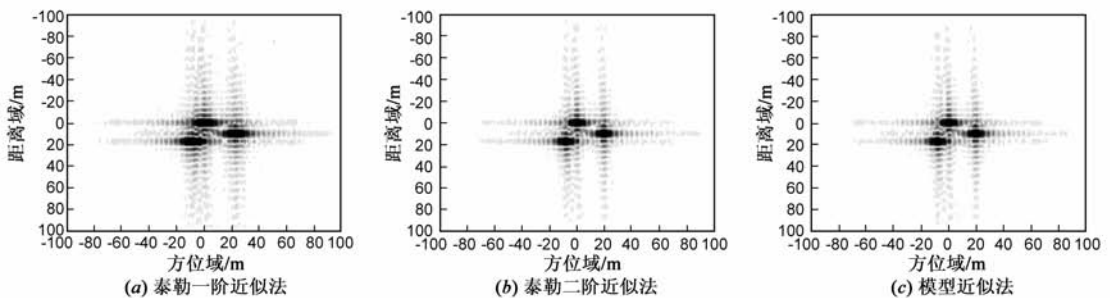


图9 斜飞场景下采用不同运动补偿方法得到SAR图像

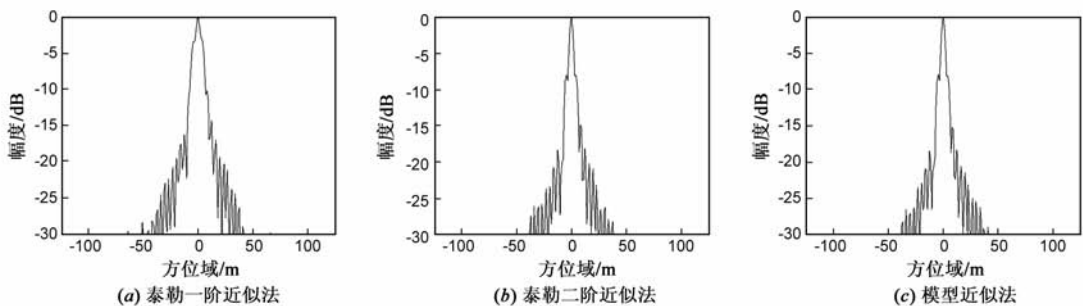


图10 图9中坐标(0,0)位置的方位剖面

量要差,而图 9(b)和图 9(c)的图像质量几乎相同,方位剖面除边缘略有不同外,形状也几乎一致.这与图 3(a)的分析是吻合的,图 3(a)中泰勒二阶近似与模型法近似的瞬时斜距几乎重合.图 10(b)是图 9(b)中坐标(0,0)位置的方位剖面,此时方位向 PSLR 抬升为 -8.11dB.为检验 SAR 成像算法的性能,仿真实验未加窗进行旁瓣抑制.由表 1 可知,斜飞条件下,像点的 PSLR 和 ISLR 都有所下降,其中模型近似法和泰勒二阶近似法进行运动补偿后其 PSLR 较理想情况下降 5dB,ISLR 下降 3dB.出现这一情况有两种原因.一是斜飞双基地 SAR 的成像算法存在近似性,“双根号”问题一直未能得到彻底解决,二是模型近似法和泰勒二阶近似法得到的瞬时斜距较真实的斜飞瞬时斜距还有残余量,从而导致运动补偿后仍然存在空变误差残余,最终导致图像质量下降.

经算法改进后,上述仿真流程均可经复乘实现,Matlab 实验中,图 9(a)的成像过程需 0.4701s,图 9(b)的成像过程需 0.4759s,图 9(c)的成像过程需 0.4718s,成像时间相差无几,且算法的计算速度较快.

表 1 不同近似方法成像结果比较

	方位分辨率(m)	方位 PSLR(dB)	方位 ISLR(dB)
泰勒一阶近似法	17.65	-3.72	-2.61
泰勒二阶近似法	6.86	-8.03	-6.15
模型近似法	6.86	-8.11	-6.17

6 结论

双基地 SAR 具有获取信息丰富、抗干扰能力强等诸多优点,但采用斜飞模式时成像比较难.本文首先从几何场景出发,构建了斜飞双基地 SAR 的理论模型.斜飞条件下存在距离向的空变运动误差,本文为此设计了泰勒近似法和模型近似法两种运动补偿的方法,然后详细推导和分析了距离徙动校正和二次脉压的过程.仿真实验验证了本文方法的有效性,对双基地 SAR 的工程实现具有较好的参考价值.

参考文献

[1] Krieger G, Moreira A. Spaceborne bi- and multistatic SAR: Potentials and challenges[J]. IEE Proc, Radar Sonar Navig, 2006, 153(3): 184 - 198.

[2] Soumekh M. Bistatic synthetic aperture radar inversion with application in dynamic object imaging[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1991, 39(9): 2044 - 2054.

[3] Ender J H G. A step to bistatic SAR processing[A]. 2004 European conference on synthetic aperture radar[C]. Ulm, Germany, May, 2004. 359 - 364.

[4] Ender J H G, Walterscheid I, Brenner A R. New aspects of

bistatic SAR: processing and experiments[A]. 2004 Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Alaska, September, 2004. 1758 - 1762.

[5] Ender J, Walterscheid I, Brenner A. Bistatic SAR translational invariant processing and experimental results[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2006, 153(3): 177 - 183.

[6] 朱振波, 汤子跃, 蒋兴舟. 平飞模式双站 SAR 成像算法研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(11): 2702 - 2705.

Zhu Zhen-bo, Tang Zi-yue, Jiang Xing-zhou. The imaging algorithm of bistatic SAR with parallel track[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(11): 2702 - 2705. (in Chinese)

[7] 况凌, 沈晓峰, 杨万麟. 机载双基地 SAR 成像算法比较[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2311 - 2314.

Kuang Ling, Shen Xiao-feng, Yang Wan-lin. A comparison of airborne bistatic SAR imaging algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2311 - 2314. (in Chinese)

[8] 张升康, 杨汝良. 基于二次距离压缩的双基地合成孔径雷达斜视成像算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(7): 1717 - 1721.

Zhang Sheng-kang, Yang Ru-liang. A squint mode bistatic synthetic aperture radar image formation algorithm based on second range compression[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(7): 1717 - 1721. (in Chinese)

[9] Neo Y L, Wong F H, Cumming I. Focusing bistatic SAR images using non-linear chirp scaling[A]. 2004 IEEE International Conference on Radar Systems[C]. Toulouse, October, 2004. 18 - 22.

[10] 李燕平, 邢孟道, 井伟, 保铮. 一种双基 SAR 的 SR-ECS 成像算法[J]. 自然科学进展, 2008, 18(3): 323 - 333.

[11] Ding Y, Munson D C. A fast back-projection algorithm for bistatic SAR imaging[A]. 2002 International Conference on Image Processing[C]. New York, 2002, 2: 449 - 452.

[12] 何峰, 梁甸农, 董臻. 基于大斜视角的星载双基地 SAR 波数域成像算法[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1011 - 1014.

He Feng, Liang Dian-nong, Dong Zhen. A wavenumber domain algorithm for spaceborne bistatic SAR imaging with large squint angle[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1011 - 1014. (in Chinese)

[13] 刘■, 杨建宇, 皮一鸣, 张晓玲. 基于相位近似的双基地 SAR 波数域成像算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9): 2094 - 2097.

Liu Zhe, Yang Jian-yu, Pi Yi-ming, Zhang Xiao-ling. A wavenumber domain imaging algorithm for bistatic SAR system based on phase approximation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(9): 2094 - 2097. (in Chinese)

[14] 汤子跃, 张守融, 等. 双站合成孔径雷达系统原理[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 107 - 116.

- [15] 丁金闪, Otmar Loffeld, Holger Nies, 保铮, 邢孟道. 异构平台双基 SAR 成像的 RD 算法[J]. 电子学报, 2009, 37(6): 1170 - 1174.
Ding Jin-shan, Otmar Loffeld, Holger Nies, Bao Zheng, Xing Meng-dao. Focusing bistatic SAR data from heterogeneous platforms using the range Doppler algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(6): 1170 - 1174. (in Chinese)
- [16] 丁金闪, Otmar Loffeld, Holger Nies, 邢孟道, 保铮. 双基 SAR 成像的点目标解析频谱研究[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 763 - 767.
Ding Jin-shan, Otmar Loffeld, Holger Nies, Xing Meng-dao, Bao Zheng. Study of point target spectrum for bistatic SAR imaging[J]. Journal of Electronic & Information Technology, 2009, 31(4): 763 - 767. (in Chinese)
- [17] 李燕平, 张振华, 邢孟道, 保铮. 星基双基地 SAR 的目标二维频谱计算[J]. 自然科学进展, 2007, 17(12): 1699 - 1706.

作者简介



彭岁阳 男, 1981 年出生, 湖南益阳人, 国防科技大学电子科学与工程学院博士生, 从事 SAR 成像算法、弹载雷达信号处理和目标识别等方面的研究.

E-mail: lvye002004@163.com

张 军 男, 1973 年出生, 湖南长沙人, 副教授, 从事雷达智能信号处理和制导雷达应用技术等研究.

E-mail: zhj64068@sina.com

沈振康 男, 1936 年生于上海, 教授, 国防科技大学电子科学与工程学院博士生导师, 主要研究方向: 数字图像处理、目标识别、信号处理.