

非匀速平飞模式下双基地 SAR 成像分析

彭岁阳 张军 胡卫东 卢大威 沈振康
(国防科技大学电子科学与工程学院ATR实验室 长沙 410073)

摘要: 该文研究了收发平台非匀速平飞模式下的双基地SAR成像问题。首先构建收发非匀速平飞模式的几何场景, 并通过对回波瞬时收发距离的分析得到了双基地SAR回波的近似模型。收发平台速度变化使得波束不同步, 导致SAR数据在方位向非均匀采样, 该文首先分析了将非匀速平飞双基地模型等效成单基地变速运动模型的方法, 然后采用非均匀傅里叶变换处理变速运动引起的非均匀采样的问题。多组不同条件下的仿真实验表明双基地SAR图像质量较好, 验证了该文方法的有效性。

关键词: 双基地SAR; 非匀速平飞模式; 等效场景; 非均匀离散傅里叶变换; 距离多普勒算法

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)11-2648-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01461

The Imaging Analysis of Bistatic SAR With Parallel Track of Variable Velocity

Peng Sui-yang Zhang Jun Hu Wei-dong Lu Da-wei Shen Zhen-kang
(ATR Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The asynchronous bistatic SAR imaging issue of variable velocity transceiver is studied in this paper. First of all, the geometric scene of the variable velocity transceiver model is constructed, and the approximation model of the echo of the bistatic SAR is obtained based on the analysis of the instantaneous transceiver distance of the echo. Variable velocity transceiver leads to transceiver position asynchronous, and cause that the SAR data in the azimuth position samples non-uniformly. This paper first analyzes the method with which asynchronous bistatic model equals to monostatic variable velocity motion model. Then with the non-uniform FFT, it resolves the non-uniform sample problems raised by variable velocity motion. The simulation experiments show that the bistatic SAR images have good quality, which verifies the effectiveness of the method provided in this paper.

Key words: Bistatic Synthetic Aperture Radar (SAR); Parallel track of variable velocity; Equivalent scene; Non-uniform Discrete Fourier Transform (DFT); Range-Doppler algorithm

1 引言

双基地合成孔径雷达是一种收发平台分置的雷达体制, 具有安全性好、隐蔽性强、获取目标信息丰富等特点。Soumekh最先进行了双基地SAR成像算法的研究^[1], Ender等人^[2]则完成了对实际双基地SAR数据的成像处理^[2]。近年来, 双基地SAR的CS算法^[3], BPA算法^[4]以及用于聚束模式成像的PFA算法^[5]等也相继成熟。但收发分置与平台飞行的不确定性给SAR系统的空间同步、时间同步和相位同步带来更大的困难。时间同步和相位同步主要通过硬件系统和信号的发射机制来解决^[6], 而空间位置同步不仅依赖于硬件系统的设计, 还需要开发合适的成像算法才能获取良好图像, 特别是收发平台速度变化将进一步增加成像系统的复杂性。

本文研究了收发平台非匀速平飞时的双基地

SAR成像问题。首先构建了收发平台作变速直线运动时的几何场景和信号模型, 推导了在同步、不同步匀速和不同步非匀速等3种条件下将非匀速平飞双基地模型等效成单基地变速运动模型的方法, 并采用非均匀傅里叶变换处理变速运动引起的非均匀采样的问题。然后详细推导和分析了非匀速平台基于时域校正距离走动的双基地Range-Doppler成像算法, 并通过仿真实验验证了算法的有效性。

2 双基地 SAR 几何场景

双基地 SAR 条带工作方式的收发平台与目标位置的几何关系如图 1 所示, 收发平台的高度分别为 H_R 和 H_T , 收发平台的斜视角分别为 θ_R 和 θ_T , 收发平台波束中心与点目标 P 所在距离单元的斜视距离 BB_2 和 AA_2 分别为 r_R 和 r_T , 发射平台 A 点处在地面的射影为 A_1 , 接收平台 B 点处在地面的射影为 B_1 。那么根据图 1 的几何关系得到, AA_2 在地面的射影 l_T (即地距 A_1A_2) 等于 $\sqrt{r_T^2 - H_T^2}$, BB_2 在地面

的射影 l_T (即地距 B_1B_2) 等于 $\sqrt{r_R^2 - H_R^2}$ 。设点目标 P 横向位置为 y , 收发平台波束中心在地面的“足迹”的横向位置分别为 y_R 和 y_T , 则线段 B_2P 为 $|y_R - y|$, 线段 A_2P 为 $|y_T - y|$, r_R 与 B_2P 的夹角为 $\pi/2 + \theta_R$, r_T 与 B_2P 的夹角为 $\pi/2 + \theta_T$ 。图 2 给出了收发平台瞬时斜距的几何关系。

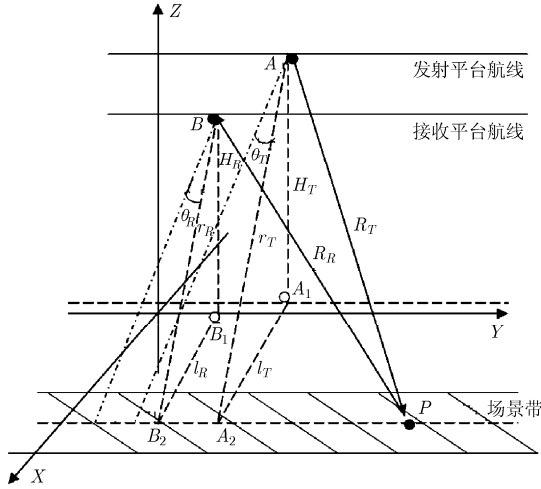


图 1 双基地 SAR 测绘场景示意图

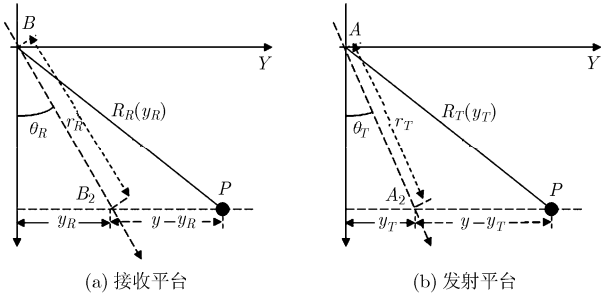


图 2 收发平台瞬时斜距几何关系示意图

接收平台瞬时斜距(如图2(a))为

$$R_R(y_R) = \sqrt{H_R^2 + l_R^2 + (y - y_R)^2 - 2\sqrt{H_R^2 + l_R^2}(y - y_R)\cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_R\right)} = \sqrt{r_R^2 + (y - y_R)^2 - 2r_R(y - y_R)\cos(\pi/2 + \theta_R)} \approx r_R - \sin\theta_R(y_R - y) + \frac{\cos^2\theta_R}{2r_R}(y_R - y)^2 \quad (1)$$

同理发射平台的瞬时斜距(如图 2(b))为

$$R_T(y_T) \approx r_T - \sin\theta_T(y_T - y) + \frac{\cos^2\theta_T}{2r_T}(y_T - y)^2 \quad (2)$$

那么波束从发射平台到点目标 P 再反射到接收平台的瞬时双程距离为

$$R(y_R, y_T) = R_T(y_T) + R_R(y_R) = r_T + r_R - \sin\theta_R(y_R - y) - \sin\theta_T(y_T - y) + \frac{\cos^2\theta_T}{2r_T}(y_T - y)^2 + \frac{\cos^2\theta_R}{2r_R}(y_R - y)^2 \quad (3)$$

3 双基地距离多普勒成像算法

点目标 P 的基带回波可表示为

$$s_r(t, y_R, y_T) = A_0 w_r[t - R(y_R, y_T)/c] w_T(y_T) \cdot w_R(y_R) \exp\left\{-\frac{j2\pi f_c}{c} R(y_R, y_T)\right\} \cdot \exp\{j\pi K_r(t - R(y_R, y_T)/c)^2\} \quad (4)$$

其中 A_0 是回波强度, $w_r(t)$ 是距离窗函数(即距离包络函数), $w_T(y_T)$ 是发射时的方位窗函数, $w_R(y_R)$ 是接收时的方位窗函数, t 是距离时间, f_c 是载频, K_r 是距离向调频率, c 是光速。利用距离压缩因子 $H_0(f_r) = \exp\{j\pi(f_r^2/K_r)\}$, 对回波 $s_r(t, t_m)$ 进行距离压缩并变换到距离频率域:

$$s_r(f_r, y_R, y_T) = A_0 W_r(f_r) w_T(y_T) w_R(y_R) \cdot \exp\left\{-\frac{j2\pi(f_c + f_r)}{c} R(y_R, y_T)\right\} \quad (5)$$

$W_r(f_r)$ 是 $w_r(t)$ 对应的频率窗函数。将式(3)代入式(5), 并进行整理得到

$$s_r(f_r, y_R, y_T) = A_0 W_r(f_r) w_T(y_T) w_R(y_R) \cdot \exp\left\{-\frac{j2\pi(f_c + f_r)}{c}(r_T + r_R + y \sin\theta_R + y \sin\theta_T)\right\} \exp\left\{\frac{j2\pi(f_c + f_r)}{c}(\sin\theta_R y_R + \sin\theta_T y_T)\right\} \exp\left\{-\frac{j\pi f_r}{c}\left[\frac{\cos^2\theta_T}{r_T}(y_T - y)^2 + \frac{\cos^2\theta_R}{r_R}(y_R - y)^2\right]\right\} \cdot \exp\left\{-\frac{j\pi f_c}{c}\left[\frac{\cos^2\theta_T}{r_T}(y_T - y)^2 + \frac{\cos^2\theta_R}{r_R}(y_R - y)^2\right]\right\} \quad (6)$$

式(6)中第 1 指数项表示距离向位置因子, 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 指数项是方位脉冲压缩项。中小斜视角条件下, 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。点目标双基地 SAR 公式的 2 维频谱的计算非常困难, 涉及复杂的等效运算。目前主流的做法是对收发相位历程在各自的驻定相位点处二阶泰勒展开, 然后再利用驻定相位原理求二维频谱^[7]。本文考虑非匀速飞行时收发平台的方位多普勒中心不同, 采取先在时域校正距离走动以分别补偿多普勒中心到零点, 然后再变换到方位频率域进行处理。

令 $r' = (r_T + r_R + y \sin\theta_R + y \sin\theta_T)/2$, $\lambda = c/f_c$ 。式(6)乘以 $H_1(f_r) = \exp\{-[j2\pi(f_c + f_r)/c](\sin\theta_R y_R +$

$\sin \theta_T y_T$) 以补偿距离走动, 得到式(7):

$$\begin{aligned} s_{rc}(f_r, y_R, y_T) &\approx A_0 W_r(f_r) w_T(y_T) w_R(y_R) \\ &\cdot \exp\left\{-\frac{j4\pi(f_c + f_r)}{c} r'\right\} \\ &\cdot \exp\left\{-j\pi \frac{f_r}{f_c} \left[\frac{\cos^2 \theta_T}{\lambda R_{cT}} (y_T - y)^2\right.\right. \\ &\quad \left.\left. + \frac{\cos^2 \theta_R}{\lambda R_{cR}} (y_R - y)^2\right]\right\} \exp\left\{-j\pi \left[\frac{\cos^2 \theta_T}{\lambda R_{cT}}\right.\right. \\ &\quad \left.\left.(y_T - y)^2 + \frac{\cos^2 \theta_R}{\lambda R_{cR}} (y_R - y)^2\right]\right\} \quad (7) \end{aligned}$$

令 $K_T = \cos^2 \theta_T / (\lambda R_{cT})$, $K_R = \cos^2 \theta_R / (\lambda R_{cR})$, 对式(7)整理可以得到

$$\begin{aligned} s_{rc}(f_r, y_R, y_T) &\approx A_0 W_r(f_r) w_T(y_T) w_R(y_R) \\ &\cdot \exp\left\{-\frac{j4\pi f_r}{c} r'\right\} \exp\left\{-j\pi \frac{f_r}{f_c} (K_T + K_R)\right. \\ &\quad \left.\cdot \left(\frac{K_T}{K_T + K_R} y_T + \frac{K_R}{K_T + K_R} y_R - y\right)^2\right\} \\ &\cdot \exp\left\{-j\pi (K_T + K_R) \left(\frac{K_T}{K_T + K_R} y_T\right.\right. \\ &\quad \left.\left.+ \frac{K_R}{K_T + K_R} y_R - y\right)^2\right\} \exp\left\{-j\pi \left(1 + \frac{f_r}{f_c}\right)\right. \\ &\quad \left.\cdot \frac{K_T K_R}{K_T + K_R} (y_T - y_R)^2\right\} \quad (8) \end{aligned}$$

式(8)可以看作是双基地 SAR 二阶泰勒展开后的总公式, 后续算法将在式(8)基础上根据不同的运动方式进行处理。在双基地平飞方式中, 收发平台的运动主要有三种情况: 同步、不同步匀速、不同步非匀速。

(1) 同步 同步的条件是 $V_T = V_R = V$, 那么 $y_T = y_R = V t_m = V t_m$, t_m 是方位时间。此时式(8)中第4指数项的相位为0, 故可知化为

$$\begin{aligned} s_{rc}(f_r, y_R, y_T) &\approx A_0 W_r(f_r) w_T(y_T) w_R(y_R) \exp\left\{-\frac{j4\pi f_r}{c} r'\right\} \\ &\cdot \exp\left\{-j\pi \frac{f_r}{f_c} (K_T + K_R) V^2 (t_m - y/V)^2\right\} \\ &\cdot \exp\{-j\pi (K_T + K_R) V^2 (t_m - y/V)^2\} \quad (9) \end{aligned}$$

令等效的方位调频率 $K_{dr} = (K_T + K_R) V^2 = \frac{V^2 \cos^2 \theta_T}{\lambda R_{cT}} + \frac{V^2 \cos^2 \theta_R}{\lambda R_{cR}}$, 将式(9)稍作变化得到

$$\begin{aligned} s_{rc}(f_r, t_m) &\approx A_0 W_r(f_r) w_{T,R}(t_m) \exp\left\{-\frac{j4\pi f_r}{c} r'\right\} \\ &\cdot \exp\{-j\pi (f_r / f_c) K_{dr} (t_m - y/V)^2\} \\ &\cdot \exp\{-j\pi K_{dr} (t_m - y/V)^2\} \quad (10) \end{aligned}$$

此处 $w_{T,R}(t_m)$ 是窗函数 $w_T(y_T) w_R(y_R)$ 进行单双基地等效后对应的窗函数形式。可以看出式(10)就是经典的单基地 SAR 成像公式。

(2) 不同步, 收发平台匀速运动 此时收发平台作匀速运动, 速度分别为 V_T 和 V_R , 但 $V_T \neq V_R$ 。那么收发平台方位位置与 t_m 的关系分别为 $y_R = V_R t_m$ 和 $y_T = V_T t_m$ 。式(8)中第4指数项的相位不为0, 是非同步运动造成的空变误差。补偿空变误差的相位因子可以表示成

$$H_2(f_r) = \exp\left\{j\pi \left(1 + \frac{f_r}{f_c}\right) \frac{K_T K_R}{K_T + K_R} (y_T - y_R)^2\right\} \quad (11)$$

乘上补偿因子 $H_2(f_r)$, 并将 $y_R = V_R t_m$ 和 $y_T = V_T t_m$ 代入式(8), 那么得到

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{rc}(f_r, y_R, y_T) &= s_{rc}(f_r, y_R, y_T) \cdot H_2(f_r) \\ &= A_0 W_r(f_r) w_T(y_T) w_R(y_R) \\ &\cdot \exp\left\{-\frac{j4\pi f_r}{c} r'\right\} \exp\left\{-j\pi \frac{f_r}{f_c} (K_T + K_R)\right. \\ &\quad \left.\cdot \left(\left(\frac{K_T V_T}{K_T + K_R} + \frac{K_R V_R}{K_T + K_R}\right) t_m - y\right)^2\right\} \\ &\cdot \exp\left\{-j\pi (K_T + K_R) \left[\left(\frac{K_T V_T}{K_T + K_R}\right.\right.\right. \\ &\quad \left.\left.\left.+ \frac{K_R V_R}{K_T + K_R}\right) t_m - y\right]^2\right\} \quad (12) \end{aligned}$$

令 $\bar{V} = \frac{K_T V_T}{K_T + K_R} + \frac{K_R V_R}{K_T + K_R}$, 将式(12)化为

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{rc}(f_r, t_m) &= A_0 W_r(f_r) w_{T,R}(t_m) \exp\left\{-\frac{j4\pi f_r}{c} r'\right\} \\ &\cdot \exp\left\{-j\pi \frac{f_r}{f_c} (K_T + K_R) \bar{V}^2 (t_m - y/\bar{V})^2\right\} \\ &\cdot \exp\{-j\pi (K_T + K_R) \bar{V}^2 (t_m - y/\bar{V})^2\} \quad (13) \end{aligned}$$

令方位调频率 $\bar{K}_{dr} = (K_T + K_R) \bar{V}^2$, 由式(13)得到等效的单基地 SAR 公式。

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{rc}(f_r, t_m) &= A_0 W_r(f_r) w_{T,R}(t_m) \exp\left\{-\frac{j4\pi f_r}{c} r'\right\} \\ &\cdot \exp\left\{-j\pi \frac{f_r}{f_c} \bar{K}_{dr} (t_m - y/\bar{V})^2\right\} \\ &\cdot \exp\{-j\pi \bar{K}_{dr} (t_m - y/\bar{V})^2\} \quad (14) \end{aligned}$$

式(14)的后续成像即可按一般单基地 RD 成像方法处理。

(3) 不同步, 收发平台非匀速运动 收发平台非匀速运动, 速度分别为 $V_R(t_m)$ 和 $V_T(t_m)$ 。那么收发平台方位位置与 t_m 的关系分别为 $y_R = \int_0^{t_m} V_R(t) dt$

和 $y_T = \int_0^{t_m} V_T(t)dt$ 。由于方位位置 y_R 和 y_T 是非均匀采样,无法直接采用经典的成像公式。如果速度变化很小,那么可以采用经典的运动补偿法,将回波补偿成均匀采样的形式。

本文引入场景等效的思想,利用非均匀傅里叶变换来完成由非均匀方位时域数据到方位频域的变换。令 $\tilde{y} = \frac{K_T}{K_T + K_R} y_T + \frac{K_R}{K_T + K_R} y_R$, 则实际上式(8)中的双基地 SAR 模式可以等效为单基地 SAR 模式,其等效航线沿 \tilde{y} 运动。设 \tilde{y} 在整个合成孔径时间内的平均速度为 \tilde{V} ,可构造这样的测绘场景: SAR 平台沿航线 \tilde{y} 以恒定速度 \tilde{V} 运动,不过此时的采样时间是非等间隔的,用公式表述即 $u_m = \tilde{y} / \tilde{V}$ 。那么式(8)可表示为

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{rc}(f_r, u_m) = & A_0 W_r(f_r) w_{T,R}(u_m) \exp\left\{-\frac{j4\pi f_r}{c} r'\right\} \\ & \cdot \exp\left\{-j\pi \frac{f_r}{f_c} (K_T + K_R) \tilde{V}^2 \left(u_m - \frac{y}{\tilde{V}}\right)^2\right\} \\ & \cdot \exp\{-j\pi (K_T + K_R) \tilde{V}^2 (u_m - y / \tilde{V})^2\} \\ & \cdot \exp\left\{-j\pi \left(1 + \frac{f_r}{f_c}\right) \frac{K_T K_R}{K_T + K_R} (y_T - y_R)^2\right\} \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)中的第 4 指数项是空变误差项,可用 $H_2(f_r)$ 进行补偿。令方位调频率 $\tilde{K}_{dr} = (K_T + K_R) \tilde{V}^2$, 那么补偿空变误差后的回波可表示为

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{rc}(f_r, u_m) = & A_0 W_r(f_r) w_{T,R}(u_m) \exp\left\{-\frac{j4\pi f_r}{c} r'\right\} \\ & \cdot \exp\{-j\pi (f_r / f_c) \tilde{K}_{dr} (u_m - y / \tilde{V})^2\} \\ & \cdot \exp\{-j\pi \tilde{K}_{dr} (u_m - y / \tilde{V})^2\} \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)与式(14)的表达式很类似,但其意义是不同的。式(15)的 \tilde{V} 是等效航线 \tilde{y} 上的平均速度, u_m 是等效的非均匀采样时间,而式(14)已经是经典的单基地 SAR 回波公式了。

对于式(16)的处理,可以采用非均匀傅里叶变换的方法。文献[8]探讨了 FS 算法中沿非均匀位置进行傅里叶积分的方法。在此基础上,本文采用非均匀傅里叶变换(NDFT)处理场景等效后将非均匀时间域 u_m 变换到均匀频率域 f_u 的问题。直接采用 NDFT 的计算复杂度是 $O(M^2)$, 对应快速非均匀傅里叶变换(CG-NuFFT)[8]的计算复杂度是 $O(kM \log 2^{kM})$, 其中 M 是方位数据点数, k 是过采样因子。采用驻定相位原理可得到 $\tilde{s}_{rd}(f_r, u_m)$ 的方位频率形式:

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{rc}(f_r, f_u) \approx & A_0 W_r(f_r) W_{T,R}(f_u) \exp\left\{-\frac{j4\pi f_r}{c} r'\right\} \\ & \cdot \exp\left\{\frac{j\pi f_r^2}{f_c K_{dr}} f_u^2\right\} \exp\left\{-\frac{j\pi f_r}{f_c K_{dr}} f_u^2\right\} \\ & \cdot \exp\left\{\frac{j\pi}{K_{dr}} f_u^2\right\} \exp\{-2\pi f_u (x / V)\} \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)中 $H_3(f_r, f_u) = \exp\left\{\frac{j\pi f_r^2}{f_c K_{dr}} f_u^2\right\}$ 是二次脉冲压缩因子, $H_4(f_r, f_u) = \exp\left\{-\frac{j\pi f_r}{f_c \tilde{K}_{dr}} f_u^2\right\}$ 是距离弯曲因子, $H_5(f_u) = \exp\left\{\frac{j\pi}{\tilde{K}_{dr}} f_u^2\right\}$ 是方位聚焦因子。按照 RD 算法流程完成二次脉冲压缩、距离弯曲校正和方位聚焦后,可得到如下二维频率域表达式:

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{out}(f_r, f_u) = & \tilde{s}_{rc}(f_r, f_u) \cdot H_3^*(f_r, f_u) \cdot H_4^*(f_r, f_u) \cdot H_5^*(f_u) \\ = & A_0 W_r(f_r) W_a(f_u) \exp\left\{-\frac{j4\pi(f_c + f_r)}{c} r'\right\} \\ & \cdot \exp\{-j2\pi f_u (x / V)\} \end{aligned} \quad (18)$$

对式(18)作方位向和距离向傅里叶逆变换即可得到最后的成像结果。

对于同步和不同步匀速这两种情况,算法处理比较简单,只需要将双基地模型等效成单基地模型(如式(10)和式(14)),然后按单基地 SAR 成像算法处理。而不同步非匀速条件下,算法全过程中实际有两次等效操作(如图 3 所示),首先将双基地模型等效成单基地模型,然后将等效的单基地非匀速运动模型等效成速度均匀变化而采样时间非均匀变化的运动模型。

4 仿真实验

4.1 速度测量准确时的仿真分析

如图 1 所示场景,收发平台在方位向平行运动。场景带中心与航线地面射影(OY 轴)的距离为

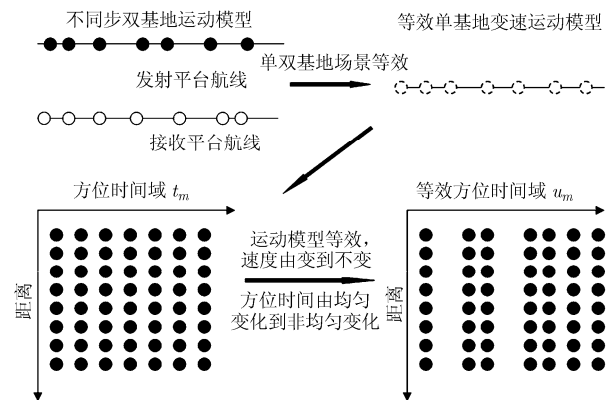


图 3 单双基地场景模型与运动模型等效示意图

2000 m, 理想航线的高度为9798 m。雷达载频4 GHz, 脉宽 1.67×10^{-6} s, 带宽200 MHz, 脉冲重复周期为 4.883×10^{-4} s, 发射平台距离地面6000 m, 与场景带中心的视线距离为11000 m, 接收平台距离地面2000 m, 与场景带中心的视线距离为9000 m。理论方位分辨率和距离分辨率均为1.5 m。在上述参数条件下, 分别在得到点目标仿真图像如图4和图5所示。

图4和表1分别给出了小斜视角双基地SAR成像结果及其图像质量分析。图4(a)是速度恒定且相等时双基地SAR成像结果, 图4(b)是速度恒定并相差很小时双基地SAR成像结果。从图4(b)可以看出速度不等时在散射点边缘有模糊重影, 而速度相差较大时, 散射点边缘模糊程度加深(如图4(c)示), 表1给出了其PSLR和ISLR, 均有所抬升。速度差值较大时图像质量下降的原因是双基地双程距离公式是以各自驻相点二阶泰勒展开, 忽略了高次项造成的空变误差。

变速运动的仿真条件是平台在飞行方向的采样点服从均匀随机分布, 其平均速度为200 m/s。变速运动导致方位向非均匀采样, 本文采用非均匀DFT处理, 其结果如图4(d)所示, 散射点周围清晰可见, 非均匀处理只会造成方位域有类似噪声的杂波。若平均速度也不相等, 则成像质量比图4(d)相对要差。

此外斜视角大小也会对高次项误差造成影响, 进而造成图像质量下降。图5及表2是中低斜视角

双基地SAR成像结果, 与小斜视角相比图像质量要差一些。特别是收发平台速度差和斜视角变化都较大时图像质量较差, 这说明高次项空变误差与平台速度差和斜视角均有关, 大斜视角下高次空变误差会导致匹配滤波失配, 方位向ISLR严重下降。

4.2 速度测量有误差时的仿真分析

实际收发平台平飞时, 惯导系统对速度和位置的测量存在误差。速度和位置误差将导致距离徙动校正后残余部分徙动量。由于位置是速度的积分函数, 位置误差的影响可视为是速度误差引起的。因此, 此处仅考察采用本文算法时速度误差对成像结果的影响。仿真时的基本参数采用图5(b)的参数, 速度估计误差服从高斯随机分布。

图6(a)是SAR图像采用图5(b)参数时, 速度误差的均方差为5 m/s时的成像结果。该次仿真时, 点目标方位向PSLR和ISLR分别为-9.76 dB和-9.30 dB。若其他条件下不变, 将收发平台改为变速飞行, 则得到图6(b)的结果, 图中点目标方位向PSLR和ISLR分别为-5.55 dB和-4.15 dB。在单次仿真时, 速度测量误差的均方差为5 m/s时, 不等匀速飞行时双基地SAR图像质量大约下降2~3 dB。而同样的测速精度条件下, 变速飞行时双基地SAR图像质量更差, 图像模糊得出现散焦现象。

考虑到误差的随机性因素, 下面以100次蒙特卡洛仿真实验分析存在速度误差时的平均图像质量。图7是存在测量误差时速度误差均方差与方位向PSLR和ISLR的性能关系曲线。除速度改为变速飞

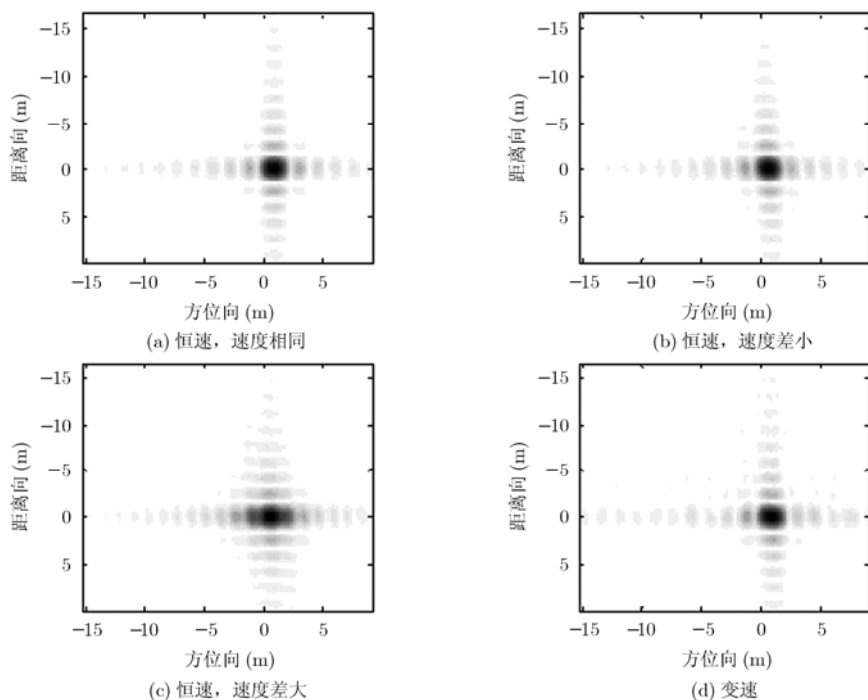


图4 小斜视角双基地SAR成像结果

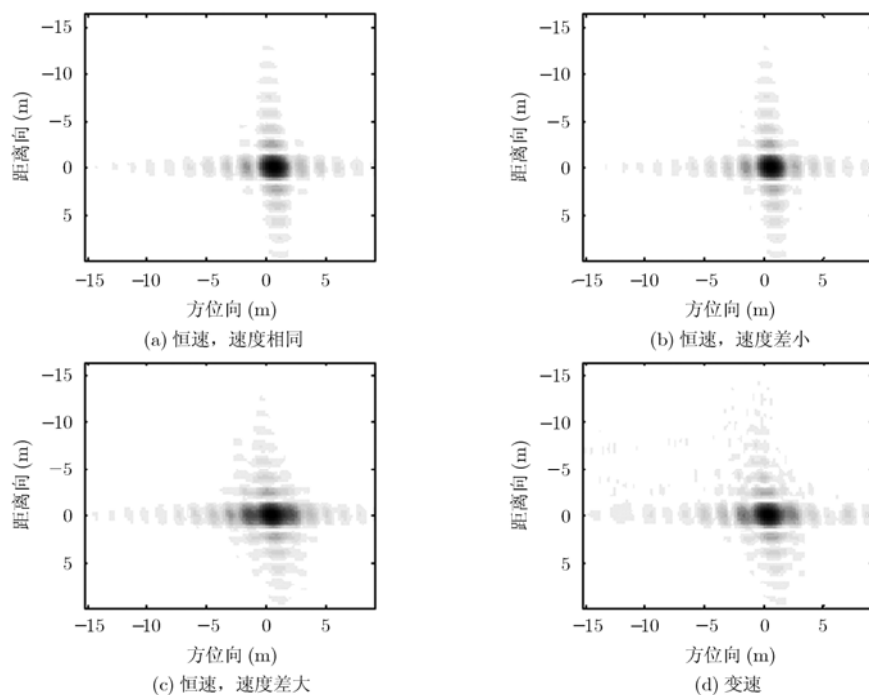


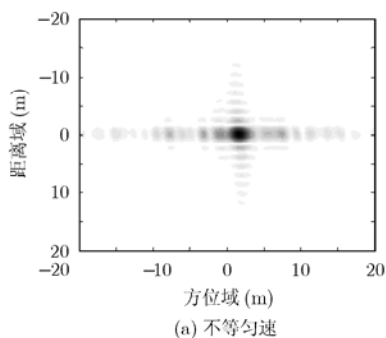
图5 中低斜视角下双基地SAR结果

表 1 小斜视角双基地 SAR 成像质量分析

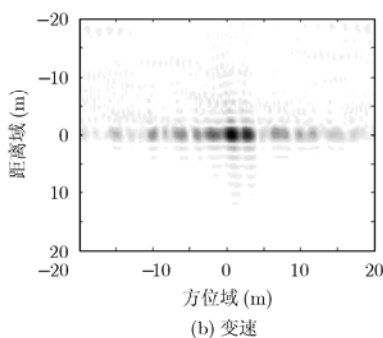
场景特征	T 平台斜视角 ($^{\circ}$)	R 平台斜视角 ($^{\circ}$)	T 平台速度(m/s)	R 平台速度(m/s)	SAR 图像	方位向 PSLR(dB)	方位向 ISLR (dB)
恒速, 速度相同	0	0	200	200	图 4(a)	-13.1	-9.41
恒速, 速度差小	3	7	200	216	图 4(b)	-11.77	-9.44
恒速, 速度差大	3	7	200	248	图 4(c)	-6.70	-5.17
变速	3	7	200(平均)	200(平均)	图 4(d)	-12.17	-6.73

表 2 中低斜视角双基地 SAR 成像结果分析

场景特征	T 平台斜视角 ($^{\circ}$)	R 平台斜视角 ($^{\circ}$)	T 平台速度(m/s)	R 平台速度(m/s)	SAR 图像	方位向 PSLR(dB)	方位向 ISLR(dB)
恒速, 速度相同	5	15	500	500	图 5(a)	-12.35	-9.92
恒速, 速度差小	5	15	500	540	图 5(b)	-11.80	-9.48
恒速, 速度差大	5	25	500	620	图 5(c)	-6.37	-7.12
变速	5	25	500(平均)	540(平均)	图 5(d)	-9.54	-6.34



(a) 不均匀速



(b) 变速

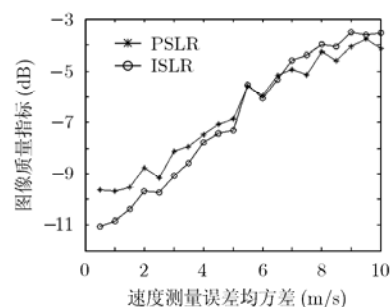


图6 速度测量误差的均方差为5 m/s时双基地SAR成像结果

图7 存在速度测量误差时的双基地SAR图像质量曲线

行外,其仿真参数与图5(b)相同,如发射平台平均速度500 m/s,接收平台平均速度540 m/s等。由图可知,图像质量随速度测量误差变化而急剧下降。这是因为,测量误差会导致距离徙动存在残余随机误差。另一方面速度测量误差将导致位置误差,采用NDFFT将数据变换到频率域时,位置误差就相当于加入随机性的相位误差,这样会导致频谱失真,最终使得方位聚焦时滤波器匹配。

5 结束语

收发平台非匀速平飞导致传统的双基地SAR算法很难获得清晰的图像。通过对回波瞬时双程距离的分析,本文构建了双基地SAR回波的近似模型,然后推导了同步、不同步匀速和不同步非匀速三种条件下基于时域距离走动校正的双基地RD算法。仿真实验表明,采用本文算法能得到较好的双基地SAR成像结果,对双基地SAR的工程实现具有重要的参考价值。本文主要探讨中小斜视角下非匀速双基地SAR的算法实现,大斜视角及其他工作模式下的非匀速双基地SAR成像算法还有待进一步分析。

参考文献

- [1] Soumekh M. Bistatic synthetic aperture radar inversion with application in dynamic object imaging[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1991, 39(9): 2044-2054.
- [2] Ender J, Walterscheid I, and Brenner A. Bistatic SAR translational invariant processing and experimental results[J]. *IEE Proceedings-Radar Sonar Navigation*, 2006, 153(3): 177-183.
- [3] Neo Y L, Wong F H, and Cumming I. Focusing bistatic SAR images using non-linear chirp scaling. Radar 2004, Toulouse, France, Oct. 2004: 18-22.
- [4] Ding Y and Munson D C. A fast back-projection algorithm for bistatic SAR imaging. *IEEE International Conference on Image Processing*, Austin, 1994: 456-460.
- [5] Rigling B D and Moses R L. Polar format algorithm for bistatic SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 40(4): 1147-1159.
- [6] 雷科,汪学刚,公岷. 基于双向同步技术的机载双站 SAR 同步研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(4): 641-643.
Lei Ke, Wang Xue-gang, and Gong Min. Airborne bistatic SAR technique research based on two-way synchronization. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(4): 641-643.
- [7] Otmar Loffeld and Holger Nies, et al. Models and useful relations for bistatic SAR[J]. *IEEE Transactions on Geosci Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2031-2038.
- [8] 井伟,张磊,邢孟道,保铮. 非匀速平台 SAR 成像算法研究[J]. *西安电子科技大学学报*, 2008, 35(4): 605-608.
Jing Wei, Zhang Lei, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. Novel algorithm for the processing of non-uniform motion SAR data. *Journal of Xiidian University*, 2008, 35(4): 605-608.
- [9] Liu Q H and Nguyen N. An accurate algorithm for Non-Uniform Fast Fourier Transforms(NUFFT's)[J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1998, 8(1): 18-20.
- [10] 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. *电子与信息学报*, 2008, 30(7): 1718-1721.
Zhang Sheng-kang and Yang Ru-liang. A squint mode bistatic synthetic aperture radar imaging formation algorithm based on second range compression, *Journal of Electronics and Information Technology*, 2008, 30(7): 1718-1721.

- 彭岁阳: 男, 1981年生, 博士生, 从事雷达成像算法、目标识别和信号处理方面的研究。
- 张军: 男, 1973年生, 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。
- 胡卫东: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师, 从事数据融合与目标识别的科研与教学。
- 卢大威: 男, 1982年生, 博士生, 从事宽带目标联合跟踪与识别和雷达信号处理方面的研究。
- 沈振康: 男, 1936年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为数字图像处理、目标识别、信号处理。