

一般构型机载双站 SAR 的距离徙动特性分析

武拥军^{①②} 黄冶^②

^①(脉冲功率激光技术国家重点实验室 合肥 230037)

^②(解放军电子工程学院信息系 合肥 230037)

摘要: 机载双站 SAR 的距离徙动由其几何结构和收、发载机的运动参数共同决定, 在一般构型情况下具有了 2 维空变性。该文建立了一般构型机载双站 SAR 的空间几何模型, 通过对双站斜距做 Taylor 级数展开, 得到了双站 SAR 在时域的距离走动和距离弯曲表达式, 并利用收、发雷达的斜距解耦合公式, 推导出了距离弯曲的补偿条件。通过仿真, 验证了距离徙动的变化特性及其徙动补偿后残余距离弯曲的非对称性变化特点。

关键词: 机载双站 SAR; 一般构型; 距离徙动; 斜距耦合; 距离徙动补偿

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)12-3008-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01550

Range Migration Properties Analyses for Airborne Bistatic SAR with General Configuration

Wu Yong-jun^{①②} Huang Ye^②

^①(Key Lab of Impulse Power & Laser Technology, Hefei 230037, China)

^②(Information Department, Electronic and Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China)

Abstract: The range migration of the airborne bistatic SAR is determined jointly by its geometric configuration and the motion parameters of the transmitter and receiver, so it has two-dimensional space-variant properties under general configuration. The space geometric model of the airborne bistatic SAR for general configuration is firstly proposed. Via Taylor polynomial expansions to the bistatic range, the expressions of the range walk and range cure in time domain are derived. Making use of the uncoupling expressions both the transmitter range and the receiver range, the range cure compensation condition is derived. By simulations, the variant properties of the range migration and the asymmetry variant characters of the residual range cure after the migration compensation are validated.

Key words: Airborne bistatic SAR; General configuration; Range migration; Slant range coupling; Range migration compensation

1 引言

机载双站合成孔径雷达(BiSAR)的系统实现容易, 成本较低, 已经成为双站 SAR 研究中最活跃的类型之一^[1,2]。在其所有构型中, 收、发雷达斜飞、斜视是成像的一般模式, 但倾斜的飞行轨迹增加了雷达回波的复杂性, 限制了成像理论与技术的发展。文献[3]给出了一般构型机载双站 SAR 的空间模型和信号模型, 并仿真出了椭圆形的等距离曲线; 文献[4]讨论了一般构型机载双站 SAR 的斜距历程随目标距离的变化, 揭示出其方位向移变的新特点; 文献[5]研究了星-机混合双站 SAR 沿平行轨迹非等

速飞行时, 其双站斜距历程的方位向空变特性。这些研究成果表明, 一般构型机载双站 SAR 的斜距历程具有距离向和方位向的 2 维空变性, 会对目标的回波特性产生新的影响, 但距离徙动的具体变化特点及其补偿要求, 在现有的文献中还很少涉及^[6-8], 本文对此进行了研究。先建立了一般构型机载双站 SAR 的空间几何模型, 给出了回波信号表达式, 再从双站斜距历程出发, 通过 Taylor 级数展开分离出双站距离走动和距离弯曲, 然后利用收、发雷达的斜距解耦合公式, 分析了双站 SAR 距离弯曲的特点, 推导出了距离弯曲的补偿条件。最后, 通过仿真验证了一般构型机载双站 SAR 的距离徙动特性及其补偿特点, 为成像算法的研究提供了理论指导。

2 一般构型机载双站 SAR 的空间几何模型

一般构型机载双站 SAR 的空间几何模型如图 1

2009-12-04 收到, 2010-06-09 改回

国家自然科学基金(60671051)和高等学校博士点专项科研基金(20060357004)资助课题

通信作者: 武拥军 j_wuyong@sina.com

所示。发射机和接收机分别以速度 \mathbf{v}_T 和 \mathbf{v}_R 向前做匀速直线飞行,并不断以斜视角 θ_{T_0} 向观测区域辐射电磁脉冲信号,以斜视角 θ_{R_0} 接收侧向散射回波。设发射机在飞行过程中的位置为 $\mathbf{T}(t)$,接收机的位置为 $\mathbf{R}(t)$,观测区域中任一点目标的位置为 $\mathbf{P}(R_{R_0}, t_{R_0})$,其中 t_{R_0} 为从接收机轨迹垂直观测该点目标的时刻, R_{R_0} 为对应时刻的目标斜距,即 $R_{R_0} = |\mathbf{R}_R(t_{R_0}; R_{R_0}, t_{R_0})|$,则任一时刻接收机到该点目标的斜距为

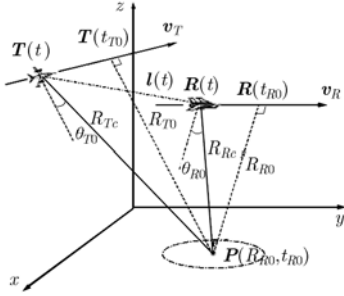


图 1 一般构型机载双站 SAR 的几何模型

$$\mathbf{R}_R(t; R_{R_0}, t_{R_0}) = \mathbf{R}_R(t_{R_0}; R_{R_0}, t_{R_0}) - \mathbf{v}_R \cdot (t - t_{R_0}) \quad (1)$$

式中 t 为合成孔径(方位)时间。

同样,设发射机垂直观测点目标 $\mathbf{P}(R_{R_0}, t_{R_0})$ 的时刻为 t_{T_0} ,此时接收机到该点目标的斜距为 R_{T_0} ,即 $R_{T_0} = |\mathbf{R}_T(t_{T_0}; R_{T_0}, t_{T_0})|$,则任一时刻发射机到点目标 $\mathbf{P}(R_{R_0}, t_{R_0})$ 的斜距为

$$\mathbf{R}_T(t; R_{T_0}, t_{T_0}) = \mathbf{R}_T(t_{T_0}; R_{T_0}, t_{T_0}) - \mathbf{v}_T \cdot (t - t_{T_0}) \quad (2)$$

发射机和接收机之间的基线用矢量 $\mathbf{l}(t)$ 表示,它与收、发载机位置之间的关系为 $\mathbf{l}(t) = \mathbf{R}(t) - \mathbf{T}(t)$ 。

为了描述机载双站 SAR 的结构,定义结构参数 $a_0 = t_{T_0} - t_{R_0}$ 为发、收载机垂直飞过点目标 $\mathbf{P}(R_{R_0}, t_{R_0})$ 的时间差,定义对应时刻的斜距之比为结构参数 $a_2 = R_{T_0}/R_{R_0}$ ^[9]。根据这两个参数的取值及其变化情况,可以对机载双站 SAR 的空间构型进行分类^[10]。

当 $a_2 \neq 1$, $a_0 \neq 0$,且随 R_{R_0} 和 t_{R_0} 变化时,为一般构型机载双站 SAR。收、发载机以不同的速度矢量沿非平行轨迹飞行,基线 $\mathbf{l}(t)$ 的长度和方向随方位时间 t 变化,雷达回波信号同时具有了距离空变性和方位移变特性。

3 机载双站 SAR 的距离徙动特性分析

设机载双站 SAR 的辐射信号为 $s_t(\tau) = \text{rect}(\tau/T_p) \exp\{j2\pi f_c \tau + j\pi k \tau^2\}$,式中 $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数,当 $|\tau/T_p| \leq 1/2$ 时其值为 1, $|\tau/T_p| > 1/2$ 时其值为 0, $\tau \in [-T_p/2, T_p/2]$, T_p 为脉冲宽度, k 为线性调频率。该信号照射到观测场景中的目标上发生散射,接收机收到的散射回波为

$$s_r(\tau, t; R_{R_0}, t_{R_0}) = \sigma(R_{R_0}, t_{R_0}) w_a(t) \text{rect} \left(\frac{\tau - R_B(t)}{T_p} \right) \cdot \exp \left\{ j2\pi f_c \left[\tau - \frac{R_B(t)}{c} \right] + j\pi k \left[\tau - \frac{R_B(t)}{c} \right]^2 \right\} \quad (3)$$

式中 $R_B(t)$ 为机载双站 SAR 的斜距历程,可以写成 $R_B(t) = |\mathbf{R}_T(t; R_{T_0}, t_{T_0})| + |\mathbf{R}_R(t; R_{R_0}, t_{R_0})|$

$$= \sqrt{R_{R_0}^2 + v_R^2 (t - t_{R_0})^2} + \sqrt{R_{T_0}^2 + v_T^2 (t - t_{T_0})^2} \quad (4)$$

经过解调,并利用参考函数 $s_{\text{ref}}(\tau) = \exp(j\pi k \tau^2)$ 对雷达回波做距离向压缩,可得

$$ss_r(\tau, t; R_{R_0}, t_{R_0}) = A_1 \cdot w_a(t) \text{sinc} \left[B_r \left(\tau - \frac{R_B(t)}{c} \right) \right] \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} R_B(t) \right\} \quad (5)$$

式中 A_1 为复常数, $\text{sinc}(\cdot)$ 项表示沿距离向的脉冲包络,它的时延变化形成了 SAR 回波的距离徙动。与单站 SAR 类似,该距离徙动对目标散射回波的影响主要体现在两个方面^[11,12]: (1)对包络移动的影响;(2)对回波信号相位,即多普勒的影响。下面主要分析距离徙动对雷达回波包络的影响。

由于 $R_{R_0} \gg v_R(t - t_{R_0})$, $R_{T_0} \gg v_T(t - t_{T_0})$,对 $R_B(t)$ 做 Taylor 级数展开,得

$$R_B(t) = R_{Rc} - v_R \sin \theta_{R_0} \cdot t + \frac{v_R^2 \cos^2 \theta_{R_0}}{2R_{Rc}} \cdot t^2 + \frac{v_R^3 \cos^2 \theta_{R_0} \sin \theta_{R_0}}{2R_{Rc}^2} \cdot t^3 + \dots + R_{Tc} - v_T \sin \theta_{T_0} \cdot t + \frac{v_T^2 \cos^2 \theta_{T_0}}{2R_{Tc}} \cdot t^2 + \frac{v_T^3 \cos^2 \theta_{T_0} \sin \theta_{T_0}}{2R_{Tc}^2} \cdot t^3 + \dots \quad (6)$$

式中 R_{Rc} 和 R_{Tc} 分别为收、发雷达天线的波束中心扫过目标时的斜距。利用多普勒质心 f_{dc} 、多普勒调频率 f_r 和多普勒调频率变化率 \dot{f}_r 的概念,将式(6)写成

$$R_B(t) = (R_{Rc} + R_{Tc}) - \frac{\lambda}{2} f_{dc} \cdot t - \frac{\lambda}{4} f_r \cdot t^2 - \frac{\lambda}{12} \dot{f}_r \cdot t^3 - \dots \quad (7)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} f_{dc} &= \frac{2}{\lambda} (v_R \sin \theta_{R_0} + v_T \sin \theta_{T_0}) \\ f_r &= -\frac{2}{\lambda} \left(\frac{v_R^2 \cos^2 \theta_{R_0}}{R_{Rc}} + \frac{v_T^2 \cos^2 \theta_{T_0}}{R_{Tc}} \right) \\ \dot{f}_r &= -\frac{6}{\lambda} \left(\frac{v_R^3 \cos^2 \theta_{R_0} \sin \theta_{R_0}}{R_{Rc}^2} + \frac{v_T^3 \cos^2 \theta_{T_0} \sin \theta_{T_0}}{R_{Tc}^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

于是, 距离徙动可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta R_{B,mi} &= R_B - (R_{Rc} + R_{Tc}) \\ &\approx -\frac{\lambda}{2} f_{dc} \cdot t - \frac{\lambda}{4} f_r \cdot t^2 - \frac{\lambda}{12} \cdot \dot{f}_r t^3 - \dots \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\Delta R_{B,mi}$ 表示双站 SAR 的总距离徙动, 它由 t 的 1 次项、2 次项、3 次项等高阶项组成, 其中 t 的 1 次项表示双站 SAR 的距离走动, 2 次项表示距离弯曲, 3 次项以上的高阶分量在中度斜视情况下很小, 通常看作是总距离徙动中的误差, 称之为扰动项。距离走动与双站 SAR 的多普勒质心有关, 而距离弯曲与多普勒调频率有关, 下面具体分析它们的特点。

3.1 距离走动

由式(9)可得双站 SAR 的距离走动为

$$\Delta R_{B,w} = (v_R \sin \theta_{R0} + v_T \sin \theta_{T0}) \cdot t \quad (10)$$

则在一个合成孔径时间内, 最大的距离走动为

$$\Delta R_{B,w,max} = (v_R \sin \theta_{R0} + v_T \sin \theta_{T0}) \cdot T_s \quad (11)$$

式(11)中, T_s 为合成孔径时间。由该式可见, 双站 SAR 的最大距离走动与收、发雷达的运动速度、斜视角以及合成孔径时间有关。如果将式(11)变换成

$$\Delta R_{B,w,max} = v_R \sin \theta_{R0} \left(1 + \frac{v_T \sin \theta_{T0}}{v_R \sin \theta_{R0}} \right) \cdot T_s, \text{ 可见, 当}$$

$v_T \sin \theta_{T0} > v_R \sin \theta_{R0}$, 即发射机相对于目标的纵向速度大于接收机相对于目标的纵向速度时, 双站 SAR 的距离走动大于接收机单站的距离走动, 反之, 小于接收机单站的距离走动。

3.2 距离弯曲

由式(9)可得双站 SAR 的距离弯曲为

$$\Delta R_{B,cure} = \left(\frac{v_R^2 \cos^2 \theta_{R0}}{2R_{Rc}} + \frac{v_T^2 \cos^2 \theta_{T0}}{2R_{Tc}} \right) t^2 \quad (12)$$

则在一个合成孔径时间内, 最大的距离弯曲为

$$\Delta R_{B,cure,max} = \left(\frac{v_R^2 \cos^2 \theta_{R0}}{2R_{Rc}} + \frac{v_T^2 \cos^2 \theta_{T0}}{2R_{Tc}} \right) \frac{T_s^2}{4} \quad (13)$$

$$\Delta R_{B,cure,max} = \left(\frac{v_R^2 \cos^3 \theta_{R0}}{R_{R0} + \Delta R_R} + \frac{v_T^2 \cos^3 \theta_{T0}}{R_{T0} + \Delta R_T} \right) \frac{T_s^2}{8}$$

$$= \left(\frac{v_R^2 \cos^3 \theta_{R0}}{R_{R0} + \Delta R_R} + \frac{v_T^2 \cos^3 \theta_{T0}}{a_2 R_{R0} + \sin \alpha_B \sin \mu_T \cdot (v_R \Delta t_R) + \cos \alpha_B \sin \mu_T / \sin \mu_R \cdot \Delta R_R} \right) \frac{T_s^2}{8} \quad (15)$$

可见, 一般构型机载双站 SAR 的距离弯曲不仅随着目标的距离 ($R_{R0} + \Delta R_R$) 变化, 而且与收、发载机的飞行轨迹夹角 α_B 及目标的方向向位置偏移 ($v_R \Delta t_R$) 有关, 即同时具有了距离向和方向向空变性。当 $\alpha_B = 0$, $a_1 = 0$, $a_2 = 1$, $v_T = v_R$, $\mu_T = \mu_R$ 时, 式(15)退化成 $\Delta R_{B,cure,max} = v_T^2 \cos^3 \theta_T / (R_{R0} + \Delta R_R) \cdot (T_s^2 / 4)$, 就是单站 SAR 的距离弯曲公式^[11,12]。

由式(13)可见, 双站 SAR 的最大距离弯曲与收、发雷达的运动速度、斜视角、半单站斜距以及合成孔径时间有关。对上式做简单变换, 得 $\Delta R_{B,cure,max} = \frac{v_R^2 \cos^2 \theta_{R0}}{2R_{Rc}} \left(1 + \frac{v_T^2 \cos^2 \theta_{T0} R_{Rc}}{v_R^2 \cos^2 \theta_{R0} R_{Tc}} \right) \frac{T_s^2}{4}$ 。可见, 当

$v_T \cos \theta_{T0} / v_R \cos \theta_{R0} > \sqrt{R_{Tc} / R_{Rc}}$ 时, 双站 SAR 的距离弯曲大于接收机单站的距离弯曲, 反之, 小于接收机单站的距离弯曲。

4 机载双站 SAR 距离徙动补偿

由式(10)可知, 机载双站 SAR 的距离走动由发射机半单站的距离走动和接收机半单站的距离走动组成, 它们与目标的距离变化无关, 因此是非空变的。如果式(11)表示的最大距离走动量 $\Delta R_{B,w,max} < \rho_r / \xi$ ($\xi > 2$), 可以忽略距离走动的影响; 反之, 需要补偿, 这可以采用类似于单站 SAR 的处理方法, 在时域中直接补偿。

而式(12)表示的双站距离弯曲与目标斜距 R_{Rc} 和 R_{Tc} 有关, 会随着目标位置发生空变。利用机载双站 SAR 的飞行轨迹解耦合公式^[10], 即

$$\left. \begin{aligned} \Delta R_T &= \sin \alpha_B \sin \mu_T \cdot (v_R \Delta t_R) + \frac{\cos \alpha_B \sin \mu_T}{\sin \mu_R} \cdot \Delta R_R \\ (v_T \Delta t_T) &= \cos \alpha_B \cdot (v_R \Delta t_R) - \frac{\sin \alpha_B}{\sin \mu_R} \cdot \Delta R_R \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中 ΔR_R 和 $(v_R \Delta t_R)$ 分别表示以接收机飞行轨迹为参考, 目标相对于观测场景中心的距离向偏移和方位向偏移; ΔR_T 和 $(v_T \Delta t_T)$ 分别表示以发射机飞行轨迹为参考, 目标相对于观测场景中心的距离向偏移和方位向偏移; μ_T 和 μ_R 分别为发射机和接收机波束垂直照射观测场景中心时的投射角; α_B 为收、发载机飞行轨迹的夹角。将式(14)代入式(13), 可得

当式(15)表示的双站距离弯曲 $\Delta R_{B,cure,max} < \rho_r / \xi$ ($\xi > 2$) 时, 可以忽略该距离弯曲的影响; 反之, 需要补偿。在补偿时, 可以采用调频率变标(chirp scaling)的思想^[7,12], 以场景中心的回波为参考信号, 先将各距离门目标回波信号的距离弯曲校正成与参考信号的弯曲相同, 再统一校正距离弯曲, 如此校正后的最大距离弯曲残余为

$$\begin{aligned} \delta(\Delta R_{B,cure,max}) &= \Delta R_{B,cure,max} - \Delta R_{B,cure,max,0} \approx -\frac{T_s^2}{8} \left(\frac{v_R^2 \cos^3 \theta_{R0} \Delta R_R}{R_{R0}^2} + \frac{v_T^2 \cos^3 \theta_{T0} \Delta R_T}{R_{T0}^2} \right) \\ &= -\frac{T_s^2}{8} \left(\frac{(a_2^2 v_R^2 \cos^3 \theta_{R0} + v_T^2 \cos^3 \theta_{T0} \cos \alpha_B \sin \mu_T / \sin \mu_R) \cdot \Delta R_R}{a_2^2 R_{R0}^2} + \frac{v_T^2 \cos^3 \theta_{T0} \sin \alpha_B \sin \mu_T \cdot (v_R \Delta t_R)}{a_2^2 R_{R0}^2} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

可见, 这个残余的距离弯曲也具有距离向和方位向的 2 维空变性, 在补偿时既要考虑目标斜距对残余误差的影响, 也要考虑目标方位向位置变化对残余误差的影响。因此, 在宽场景成像时, 通常要对回波数据做距离向和方位向分块, 使 $|\delta(\Delta R_{B,cure,max})| < \rho_r / \xi (\xi > 2)$ 条件成立, 这是一般构型机载双站 SAR 距离徙动补偿的显著特点。

5 仿真试验

为了验证一般构型机载双站 SAR 的距离徙动特点及其补偿特性, 采用如表 1 所示的系统仿真参数。由于观测区域是收、发天线波束照射的重叠部分, 而且接收机靠近目标, 因此取接收机的方位向照射宽度为参考。

图 2 给出了双站距离走动的变化特性, 其中图 2(a)是对确定的点目标, 在改变收、发雷达的斜视角时, 其距离走动的变化情况。由图可见, 双站距离走动随着收、发雷达斜视角的增加而逐渐增大。再取接收机的斜视角为 0° , 目标斜距 R_{R0} 从 10 km 增加到 30 km, 发射机斜视角 θ_{T0} 从 0° 增加到 60° , 画出了双站距离走动的变化曲面, 如图 2(b)所示。可见, 其距离走动随着发射机斜视角和目标斜距的增加而逐渐增大。由这些结果可知, 双站 SAR 的距离走动具有与单站 SAR 类似的特点, 随着收、发雷达斜视角的增加而增大, 随着目标斜距的增加而增大。

图 3 给出了双站距离弯曲的变化特性, 其中图 3(a)是对确定的点目标, 在收、发雷达斜视角变化时, 其距离弯曲的变化情况。由图可见, 双站距离弯曲随着发射机斜视角的增大而逐渐减小, 随着发射机斜视角的增大而逐渐增大。再取接收机的斜视

角为 0° , 目标斜距 R_{R0} 从 10 km 增加到 30 km, 发射机斜视角 θ_{T0} 从 0° 增加到 60° , 画出了双站距离弯曲的变化曲面, 如图 3(b)所示。由图可见, 随着发射机斜视角的增加, 距离弯曲逐渐减小; 随着目标斜距的增加, 距离弯曲增大。综合分析可知, 双站 SAR 的距离弯曲比单站的复杂, 而且随着发射机斜视角的增大, 其距离弯曲会减小, 这对成像是有利的; 从数值上来看, 双站距离弯曲仍比距离走动小得多, 对双站 SAR 成像的影响较小。

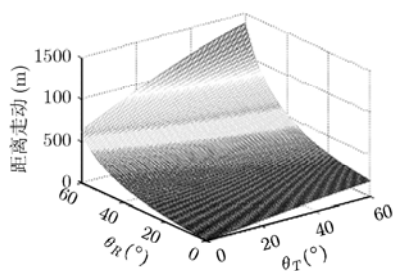
图 4 给出了观测场景的距离弯曲特性及其补偿后残余量的变化特点, 其中图 4(a)是基于表 1 的系统参数, 对距离向 4 km, 方位向 16 km 的目标区域, 计算出的距离弯曲特性, 由图可见, 双站距离弯曲沿 $v_R \cdot \Delta t_R = 0$ 平面已不再具有对称性, 左上顶点处的距离弯曲最大, 右下顶点的距离弯曲最小, 这种非对称性正是由于收、发载机飞行轨迹不平行引起的。图 4(b)进一步给出了利用调频率变标法补偿了双站距离弯曲之后, 观测场景的残余距离弯曲, 由图可见, 残余距离弯曲也是非对称的, 在其中一个顶点处具有最大值, 这也是收、发载机非平行轨迹引起的, 需要按照这个最大值来确定数据分块的大小, 这成为一般构型机载双站 SAR 距离弯曲补偿的新特点。

6 结论

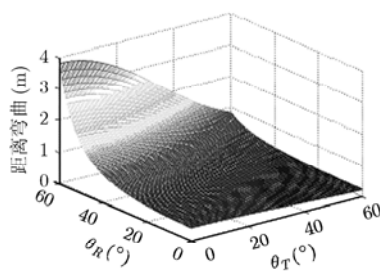
一般构型机载双站 SAR 的回波受其空间几何结构及其运动参数的影响, 具有更加复杂的特性, 其中双站距离走动是两个半单站距离走动之和, 与目标距离无关, 虽然对成像影响很大, 但易于补偿; 而双站距离弯曲的数值较小, 其与目标距离的关联性对成像算法的影响很大, 是成像算法中需要解决

表 1 一般构型的机载双站 SAR 的系统参数

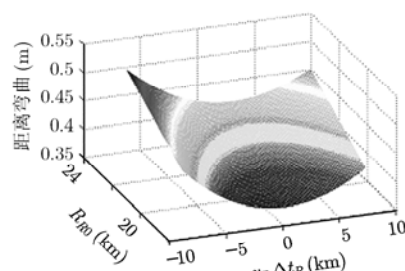
| 参 数 | 发 射 机 | 接 收 机 |
|-----------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 飞行速度 | $v_T = 120$ m/s | $v_R = 100$ m/s |
| 斜视角 | 1.55° | 0° |
| 天线波束宽度 | 0.5° | 0.5° |
| 轨迹到场景中心点目标的最近距离 | $R_{T0} = 27.348$ km | $R_{R0} = 20.6155$ km |
| $t = 0$ 时刻的位置 | $(-4.16$ km, -7.07 km, 10.72 km) | $(0$ km, 0 km, 5 km) |
| 飞行轨迹之间的夹角 | 18° | |



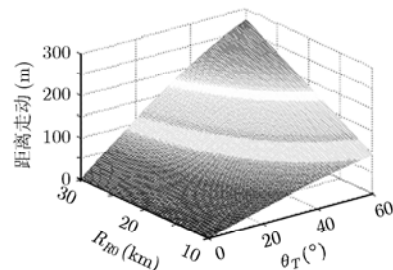
(a) 随收、发雷达斜视角的变化



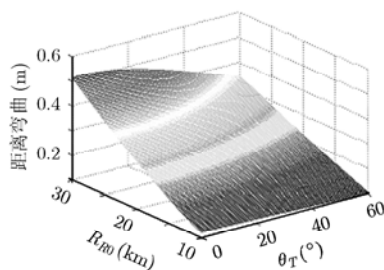
(a) 随收、发雷达斜视角的变化



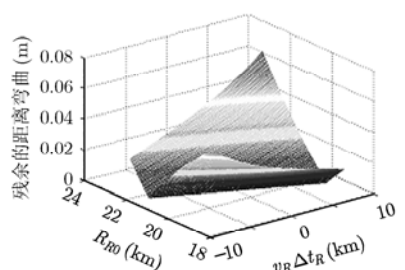
(a) 观测场景的距离弯曲



(b) 随目标斜距和发射机斜视角的变化



(b) 随目标斜距和发射机斜视角的变化



(b) 补偿后的残余距离弯曲

图2 双站 SAR 距离走动的变化特性

图3 双站 SAR 距离弯曲的变化特性

图4 观测场景的距离弯曲及其补偿后的残余量

的主要问题。根据本文给出的距离弯曲补偿条件，可以通过对回波数据做距离向和方位向分块的方法，解决回波数据的 2 维空变性问题，这为一般构型机载双站 SAR 成像算法的研究提供了思路。

参考文献

- [1] Walterscheid I, Brenner A R, and Ender J H G. Geometry and system aspects for a bistatic airborne SAR experiments[C]. Proc. EUSAR, Ulm, Germany, 2004: 567-570.
- [2] Wendler M, Krieger G, and Rodriguez M, *et al.* Analysis of bistatic airborne SAR data [C]. Proc. EUSAR, Ulm, Germany, 2004: 571-572.
- [3] Ender J H G. Signal theoretical aspects of bistatic SAR [C]. Proc. IGARSS, Toulouse, France, 2003: 1438-1441.
- [4] BenKassem M J and Saillard J. BiSAR mapping I: theory and modeling [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2006, 61: 39-65.
- [5] Yang Yong-hong and Pi Yi-ming. Azimuth space-variant properties of BiSAR with nonequal velocities [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2008, 19(5): 919-922.
- [6] Natroshvili K, Loffeld O, and Maya A, *et al.* Focusing of general bistatic SAR configuration data with 2-D inverse scaled FFT [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(10): 2718-2727.
- [7] Wong F H, Cumming I G, and Neo Y L. Focusing bistatic SAR data using the nonlinear chirp scaling algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(9): 2493-2505.
- [8] Zhang L, Jing W, and Xing M D, *et al.* Unparallel trajectory bistatic spotlight SAR imaging [J]. *Science China Information Sciences*, 2009, 52(1): 91-99.
- [9] Loffeld O, Nies H, Petersburg V, and Knedlik S. Models and useful relations for bistatic SAR processing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2034-2038.
- [10] 武拥军. 机载双-多站合成孔径雷达成像理论与算法研究[D]. [博士论文], 安徽大学, 2009.
- [11] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 125-132.
- [12] Cumming I G and Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation [M]. Norwood, Artech House 2005: 194-200.

武拥军: 男, 1970年生, 博士, 研究方向为天线技术与微波成像。
黄冶: 男, 1973年生, 博士, 研究方向为天线技术与计算电磁学。