

文章编号:1001-2486(2011)01-0065-07

## 机载超宽带 SAR 运动误差建模与分析\*

安道祥,黄晓涛,周智敏

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要:**机载超宽带合成孔径雷达(UWB SAR)具有大积累角和长合成孔径的特点,这使得这类 SAR 系统的运动误差变得非常复杂。建立了机载 UWB SAR 运动误差模型,并基于该模型推导了存在运动误差情况下的回波信号频谱。分析了运动误差影响 SAR 成像处理的根本原因,以及不同特性运动误差对 SAR 图像所产生的不同影响。仿真实验结果证明了文中理论分析的正确性。

**关键词:**超宽带;合成孔径雷达;运动误差

**中图分类号:**TN957.5 **文献标识码:**A

## Modeling and Analysis of Motion Errors of Airborne Ultra-wide Band SAR

AN Dao-xiang, HUANG Xiao-tao, ZHOU Zhi-min

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Airborne Ultra-Wide Band Synthetic Aperture Radar (UWB SAR) has larger integrated angle and longer synthetic aperture, which gives rise to more complexity in motion errors. In light of this, first the motion model of airborne UWB SAR was derived. Then, the expression of echo spectrum in presence of motion error was deducted. Theoretic analysis on the reason of the motion error impacts on SAR imaging and the influences on SAR images induced by the different motion errors were carried out. Experiment results on simulated data proved the validity of the theory analysis presented in this paper.

**Key words:** ultra-wide band; synthetic aperture radar; motion error

在 SAR 技术发展过程中,如何消除 SAR 平台运动误差一直是研究热点之一<sup>[1-7]</sup>。为此,人们先后提出了多种运动补偿方法,这极大地改善了机载 SAR 图像质量。但有关机载 SAR 运动误差建模和理论分析的研究却不多。而很多运动补偿方法在被提出的同时,也缺少相应的理论证明。

按照运动误差在一个合成孔径时间的变化周期数,可将其划分为低频运动误差、中频运动误差和高频运动误差<sup>[2]</sup>。对于同一个 SAR 平台来说,当安装不同 SAR 系统时,运动误差特性是不同的。例如,以同一个飞机平台来说,当安装的是高频窄带 SAR 系统时,合成孔径时间较短,飞机平台在一个合成孔径内的波动幅度和波动频率均相对较小,此时雷达平台的运动误差属于低频/中频运动误差情况。同样的飞机平台,当安装上低频 UWB SAR 时,由于合成孔径时间变长,则飞机平台在一个合成孔径时间内的波动幅度和波动频率

增加,此时的运动误差属于中频/高频运动误差。同理,对于同一 SAR 系统来说,当被安装在不同平台上时,运动误差特性也是不同的。这就是 UWB SAR 比高频窄带 SAR 的运动补偿难度大,小型机载平台比大型机载平台的运动补偿难度大的原因。

文献[1]分析了不同运动误差下的 SAR 图像散焦现象,但未从理论上分析造成所出现散焦现象的根本原因。本文将对这个问题作深入研究。

### 1 机载 SAR 运动误差建模及回波信号推导

机载 SAR 的运动误差包括转动误差、航向速度误差和平动(偏航)误差<sup>[7]</sup>。其中转动误差主要影响天线波束指向。实际中,可通过安装稳定平台等方法补偿天线转动误差。航向速度误差和平动误差将影响回波距离弯曲校正(RCMC)和方位压缩。其中,航向速度误差可通过实时调整 PRF

\* 收稿日期:2010-07-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60972121);教育部新世纪人才支持计划项目(NCET-07-0223);国防科技大学优秀研究生创新资助项目(B090404)

作者简介:安道祥(1982—),男,博士生。

或事后插值来补偿;平动误差可通过基于高精度传感器或基于参数估计的方法进行补偿。由于转动误差和航向速度误差相对简单,且已有较多研究<sup>[7]</sup>,在本文讨论中,假设转动误差和航向速度误差已被精确补偿,仅考虑载机平动误差的影响。

实际中,平动误差可分解成线性平动误差和正弦平动误差。其中线性平动误差对 SAR 图像质量影响较小,主要引起图像几何形变。正弦平动误差会对图像质量影响较大,必须在 SAR 成像过程中进行有效补偿。本文主要研究正弦平动误差对回波频谱和 SAR 图像质量的影响。

### 1.1 理想情况下的回波频谱

设 SAR 系统发射信号为线性调频信号

$$s(\tau) = \text{rect}\left[\frac{\tau}{T_p}\right] \exp[j2\pi f_c \tau + j\pi \kappa \tau^2] \quad (1)$$

其中  $\text{rect}[\cdot]$  为矩形窗函数,  $T_p$  为发射信号脉宽,  $f_c$  为信号载频,  $\kappa$  为发射信号调频率,  $\tau$  为距离向快时间。则接收到正交解调后的斜距  $r_0$  处的目标回波信号为(忽略信号中的常数项)

$$ss(r', x'; r_0) = \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R(x'; r_0, x)\right] \cdot \exp\left[j \frac{4\pi \kappa}{c^2} (r' - R(x'; r_0, x))^2\right] \quad (2)$$

其中,  $r' = c\tau/2$  表示斜距距离,  $\lambda = c/f_c$  为发射信号中心波长,  $r$  为目标到飞行航迹的垂直斜距,  $x$  为目标方位位置,  $x'$  表示雷达平台的瞬时方位位置,  $R(x'; r, x) = \sqrt{r^2 + (x' - x)^2}$  表示理想情况下雷达与目标间的瞬时斜距距离。由式(2)可求得理想情况下的 SAR 回波频谱为

$$SS(\eta, \xi; r_0) = \exp\left(-j \frac{\eta^2}{4\pi \kappa}\right) \cdot \exp\left(-j r_0 \sqrt{\left(\eta + \frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 - \xi^2}\right) = \exp\left(-j \frac{\eta^2}{4\pi \kappa}\right) G(\eta, \xi; r_0) \quad (3)$$

其中,  $\eta = 4\pi f_r/c$  为距离波数,  $\xi = 2\pi f_a/v$  为方位波数。式(3)中的第一项为距离调制项,可在距离频域内进行补偿。由于平动误差不会影响距离压缩,以下假设距离压缩已完成,所有讨论均基于距离压缩后的回波信号进行。  $G(\eta, \xi; r)$  表示雷达平台沿理想轨迹运行时 SAR 系统的传输函数。

### 1.2 非理想情况下的回波频谱

令  $\Delta r(x'; r_0)$  表示斜距  $r_0$  处的 LOS 方向平动误差,则目标到实际航迹的瞬时斜距  $R'(x'; r, x)$  为

$$R'(x'; r_0, x) = \sqrt{[r_0 + \Delta r(x'; r_0)]^2 + (x' - x)^2} \approx \sqrt{r_0^2 + (x' - x)^2} + \Delta r(x'; r_0) = R(x'; r_0, x) + \Delta r(x'; r_0) \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)中,可得非理想情况下斜距  $r_0$  处的回波信号为

$$ss'(r, x'; r_0) = \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R'(x'; r_0, x)\right] \cdot \exp\left\{j \frac{4\pi \kappa}{c^2} [r - R'(x'; r_0, x)]^2\right\} \quad (5)$$

其中  $r$  表示斜距距离。利用式(5),可求得非理想情况下的回波信号频谱

$$SS'(\eta, \xi; r_0) = \exp[-j(\eta + 4\pi/\lambda)r_0] \cdot \int E(\eta, \zeta; r_0) G(\eta, \xi - \zeta; r_0) d\zeta \quad (6)$$

其中,  $E(\eta, \zeta; r)$  为平动误差项的频谱。用  $e(\eta, x'; r)$  表示距离频域、方位时域内的平动误差项,则有

$$e(\eta, x'; r_0) = \exp[-j(\eta + 4\pi/\lambda)\Delta r(x'; r_0)] \quad (7)$$

$$E(\eta, \xi; r_0) = \mathcal{F}_{x' \rightarrow \xi}[e(\eta, x'; r_0)] \quad (8)$$

式(3)~(8)是分析正弦平动误差对 SAR 成像处理影响的基础。

设平动误差  $\Delta r(x'; r_0)$  呈正弦函数变化,即

$$\Delta r(x'; r_0) = a(r_0) \sin(\xi_e x') \quad (9)$$

其中,  $a(r_0)$  为  $r_0$  处的误差幅度,  $\xi_e$  为误差频率。对式(9)作第一类贝塞尔函数<sup>[4]</sup>展开得

$$e(\eta, x'; r_0) = \sum_{k=0}^{+\infty} C_{kj} J_k(A) \cos(k\xi_e x' + k\pi/2) \quad (10)$$

其中,  $C_0 = 1$ ,  $C_k = 2 (k \neq 0)$ 。  $J_k(A)$  为  $k$  阶第一类贝塞尔函数,  $A(\eta; r_0) = (\eta + 4\pi/\lambda)a(r_0)$ 。将式(10)代入式(6)中,即可得到存在正弦平动误差情况下的回波信号频谱

$$SS'(\eta, \xi; r_0) = \exp[-j(\eta + 4\pi/\lambda)r_0] \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C'_{kj} |k| J_{|k|}(A) \cdot G(\eta, \xi - k\xi_e; r_0) \exp(jk\pi/2) \quad (11)$$

其中,  $C'_0 = 2$ ,  $C'_k = 1 (k \neq 0)$ 。在一定近似条件下<sup>[4]</sup>,式(11)可写为

$$SS'(\eta, \xi; r_0) = \exp[-j(\eta + 4\pi/\lambda)r_0] \cdot \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C'_k |k| J_{|k|}(A(r_c)) \cdot G_x(\eta, \xi - k\xi_e; r_0) \exp(jk\pi/2)$$

$$= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C'_{kj} |k| J_{|k|} (A(r_c)) \exp(k\pi/2) \cdot SS(\eta, \xi - k\xi_e; r_0) \quad (12)$$

式(12)即是式(6)的离散域表达式。由式(12)可知,在正弦平动误差情况下,回波频谱变成了理想频谱(期望/真实目标对应的频谱,即  $J_0(A)$ , 又称为主谱)与重叠次谱(理想频谱的平移谱,即  $J_k(A)$ ,  $k \neq 0$ )的集合,重叠次谱的方位平移量为  $k\xi_e$  ( $k = \pm 1, \pm 2, \dots$ ),如图 1 所示。SAR 成像时,除主谱会生成真实目标外,每个重叠次谱还会产生一个“虚假目标”,导致 SAR 图像质量下降。由式(12)可发现,正弦平动误差频率和幅度对回波频谱有很大影响:

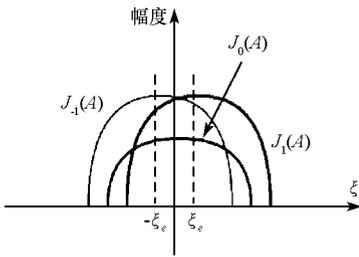


图 1 正弦平动误差下的方位谱  
Fig.1 The azimuth spectrum in presence of sinusoidal displacement

(1)误差频率的影响。由式(12)可知,第  $k$  阶重叠次谱的方位偏移量为  $k\xi_e$ ,因此正弦平动误差  $\xi_e$  决定了重叠次谱相对主谱的方位偏移量。正弦平动误差频率越高,则第  $k$  阶重叠次谱相对主谱的偏移量越大,从而对 SAR 图像聚焦质量的影响越大。

(2)误差幅度的影响。在分析正弦平动误差幅度影响前,先来了解下第一类贝塞尔函数特性。设雷达波长  $\lambda = 0.75\text{m}$ ,图 2 给出不同误差幅度下,第一类贝塞尔函数随阶数变化曲线。

由图 2 可发现第一类贝塞尔函数随阶数变化的两个特点:

1)随着阶数  $k$  的变大,第一类贝塞尔函数逐渐收敛,最终收敛到零值。但当正弦平动误差幅度增大时,收敛速度越来越慢。理论上,式(12)中的第一类贝塞尔函数的阶数可取无穷大。但实际情况中,那些加权系数很小的重叠次谱,由于能量低,所生成“虚假目标”的脉冲响应幅度远小于真实目标的脉冲响应幅度,因此可忽略其对 SAR 图像聚焦质量的影响,因此式(12)可改写为

$$SS'(\eta, \xi; r_0) = \sum_{k=-M/2}^{+M/2} C'_{kj} |k| J_{|k|} (A(r_c)) \cdot \exp(jk\pi/2) SS(\eta, \xi - k\xi_e; r_0) \quad (13)$$

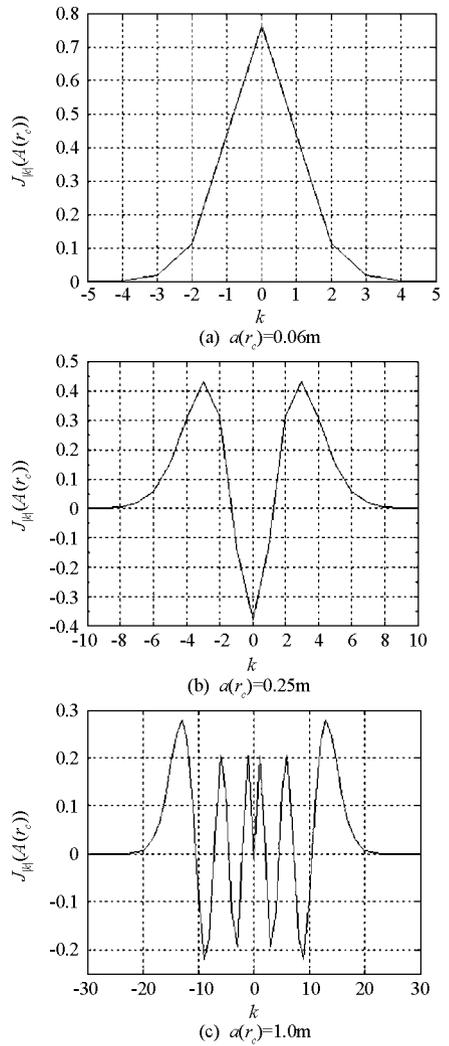


图 2 第一类贝塞尔函数随阶数变化曲线  
Fig.2 The curves of the first Bessel function with respect to the orders

其中  $M$  表示会对 SAR 图像质量产生较大影响,不可忽略的重叠次谱个数。

2)当正弦平动误差幅度较小时,第一类贝塞尔函数随阶数变化趋势呈金字塔形状,第零阶第一类贝塞尔函数值最大。随着正弦平动误差幅度增大,第一类贝塞尔函数值开始围绕零值振荡,振荡频率随误差幅度的增大而增大。在某些情况下,第零阶第一类贝塞尔  $J_0(A)$  小于其它阶第一类贝塞尔函数,导致加权后的主谱幅度小于重叠次谱幅度。

综合上述分析,可得出结论:正弦平动误差频率决定重叠次谱相对主谱的方位偏移量,误差幅度决定对 SAR 图像有较大影响的重叠次谱个数。

## 2 平动误差对 SAR 成像处理的影响分析

由于正弦平动误差的影响,在 SAR 成像中,如果按照理想回波频谱设计匹配滤波器,则所设计滤波器在与主谱匹配的同时,与重叠次谱是失

配的。这种失配现象就会降低 SAR 图像聚焦质量。将式(6)中系统的传输函数  $G(\eta, \xi; r_0)$  写成下述形式:

$$G(\eta, \xi; r_0) = G_1(\eta, \xi; r_0) \cdot G_2(\eta, \xi; r_0) \quad (14)$$

其中  $G_1(\eta, \xi; r_0)$ 、 $G_2(\eta, \xi; r_0)$  分别表示方位调制项和包含距离方位耦合项,其形式为

$$G_1(\xi; r_0) = \exp\left[-j r_0 \left(\sqrt{\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 - \xi^2}\right)\right] \quad (15)$$

$$G_2(\eta, \xi; r_0)$$

$$= \exp\left[-j r_0 \left(\sqrt{(\eta + 4\pi/\lambda)^2 - \xi^2} - \sqrt{\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 - \xi^2}\right)\right] \quad (16)$$

在 SAR 成像中,RCMC 可通过修正 Stolt 插值<sup>[8]</sup>完成,方位压缩可通过在距离多普勒域内乘以  $G_1^*(\eta, \xi; r_0)$  完成。将式(15)、(16)代入式(6)中得

$$SS'(\eta, \xi; r_0) = \exp(-j(\eta + 4\pi/\lambda)r_0) \cdot \int d\zeta E(\zeta) G_1(\eta, \xi - \zeta; r_0) G_2(\eta, \xi - \zeta; r_0) \quad (17)$$

由式(17)可发现,平动误差对回波频谱的影响可分解成对距离徙动项(Range Cell Migration, RCM)的影响和对方位调制项的影响。

### 2.1 距离弯曲校正影响分析

由于重叠次谱相对主谱的发生方位偏移,使得按理想情况设计的 RCM 滤波器与重叠次谱失配,引起重叠次谱的 RCMC 处理误差。为便于分析,对式(16)作泰勒级数展开,并忽略高阶项,得

$$G_2(\xi, \eta; r_0) \approx \exp\left(j \frac{\lambda r_0 \lambda \xi^2}{4\pi 4\pi 2} \eta\right) \quad (18)$$

由式(18)可得第  $k$  个重叠次谱的距离徙动项为

$$G_2(\xi + k\xi_e, \eta; r_0) \approx \exp\left(j \frac{\lambda r_0 \lambda (\xi + k\xi_e)^2}{4\pi 4\pi 2} \eta\right) \quad (19)$$

将式(19)乘以式(18)的共轭,即可求得 RCM 滤波失配所引起的相位误差

$$\begin{aligned} & \Delta G_2(\xi + k\xi_e, \eta; r_0) \\ &= G_2(\xi + k\xi_e, \eta; r_0) G_2^*(\xi, \eta; r_0) \\ &= \exp\left(j \frac{\lambda r_0 \lambda k^2 \xi_e^2 + 2\xi \cdot k\xi_e}{4\pi 4\pi 2} \eta\right) \end{aligned} \quad (20)$$

由式(20)可发现,该误差项的相位是关于距离频率  $\eta$  的一次函数。其中一次函数系数就表示了第  $k$  阶重叠次谱的距离徙动误差量  $\Delta r_{RCM}(k; r_0)$ ,其值与方位波数  $\xi$ 、正弦平动误差频率  $\xi_e$  和斜距  $r_0$  有关。

$$\Delta r_{RCM}(k; r_0) = \frac{\lambda r_0 \lambda k^2 \xi_e^2 + 2\xi \cdot k\xi_e}{4\pi 4\pi 2} \Big|_{\xi = B_0/2} \quad (21)$$

由此可发现,RCM 滤波失配将降低“重叠次谱”的 RCMC 精度,导致“虚假目标”散焦,从而影响目标聚焦质量。下面通过仿真实验来分析不同频率平动误差对回波 RCMC 的影响,仿真参数如表 1。

表 1 仿真参数设置

Tab.1 Simulation parameters

参数	参数值	参数	参数值	参数	参数值
信号	300MHz	脉冲重		载机飞行	
载频	/10GHz	复频率	100Hz	高度	720m
信号	150MHz	方位		测绘带	
带宽		分辨率	1.0m	中心斜距	1km
采样		载机飞行		测绘带	
频率	200MHz	速度	50m/s	宽度	200m

图 3 给出了不同波段 SAR 下,第 1 阶重叠次

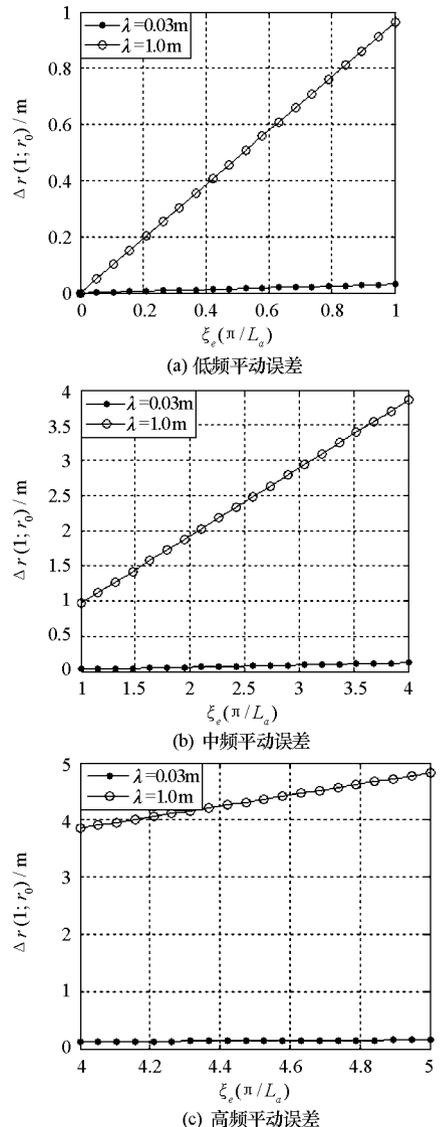


图 3 第 1 阶“虚假目标”的 RCM 误差量  
Fig.3 The RCM error of the first order ghost target

谱由于 RCM 滤波失配所产生的距离徙动误差随平动误差频率的变化曲线。可发现:(1)随着 SAR 工作波段的下降,距离徙动误差变大;(2)随着误差频率提高,距离徙动误差亦变大,并逐渐超过一个距离分辨单元,严重影响“虚假目标”的 RCMC 精度。

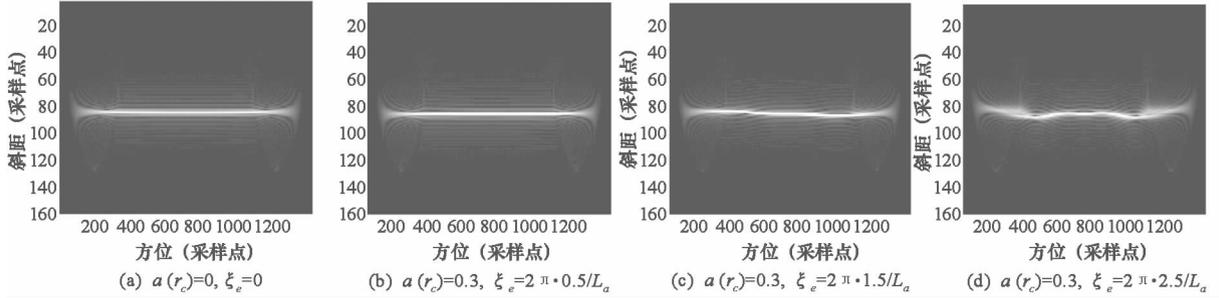


图 4 不同平动误差情况下的 RCMC 结果

Fig.4 RCMC results in presence of different displacement errors

实际中,RCMC 后,“虚假目标”的信号轨迹和真实目标的信号轨迹相互重叠,无法分离,因此,图 4 给出的是重叠后的信号轨迹,而不是真实目标的信号轨迹。由图 4 可发现,随着误差频率的提高,RCMC 结果越来越差。因为随着误差频率的提高,重叠次谱相对主谱偏移量增大,滤波器失配加重,导致“虚假目标”RCMC 精度下降,在 SAR 图像上表现为 RCMC 处理结果变差。同理,当误差频率不变,而误差幅度增大,则出现滤波失配现象的重叠次谱个数增多,亦会导致 RCMC 结果变差。由此可知,SAR 图像聚焦质量降低的真正原因是:由于 RCM 滤波器失配导致“虚假目标”RCMC 精度降低,进而引起“虚假目标”散焦,使得 SAR 图像聚焦质量下降。

## 2.2 方位压缩的影响分析

与 2.1 节的分析类似,由于重叠次谱相对主谱发生方位偏移,将使得按理想情况设计的方位压缩滤波器与重叠次谱失配。对式(15)的方位调制项作泰勒级数展开,并忽略高阶项,得

$$G_1(\xi; r_0) \approx \exp\left(-j \frac{\lambda r_0 \xi^2}{4\pi} \right) \quad (22)$$

设正弦平动误差频率为  $\xi_e$ ,则目标频谱的第  $k$  个重叠次谱可表示为

$$G_1(\xi + k\xi_e; r_0) \approx \exp\left(-j \frac{\lambda r_0 (\xi + k\xi_e)^2}{4\pi} \right) \quad (23)$$

由式(22)、(23),可算出利用理想滤波函数作方位压缩后,第  $k$  个重叠次谱失配所引入的相位误差

$$\Delta G_1(\xi + k\xi_e; r_0)$$

与上述仿真相对应,图 4 给出了不同平动误差下,P 波段 SAR 的 RCMC 结果。图 4(a)~(d)分别对应无运动误差、低频平动误差、中频平动误差和低频平动误差四种情况下,场景中心目标的 RCMC 结果。

$$\begin{aligned} &= G_1(\xi + k\xi_e; r_0) G_1^*(\xi; r_0) \\ &= \exp\left(-j \frac{\lambda r_0 k^2 \xi_e^2}{4\pi} \right) \exp\left(-j \frac{\lambda r_0 k \xi_e \xi}{4\pi} \right) \quad (24) \end{aligned}$$

式(24)中第二行第一项为常数项;第二项是一个关于方位频率  $\xi$  的线性函数,其系数与运动误差频率  $\xi_e$ 、信号波长  $\lambda$  和斜距  $r_0$  有关。

$$\Delta x(k; r_0) = \frac{\lambda r_0}{4\pi} k \xi_e \quad (25)$$

由式(25)知,方位匹配滤波后,“虚假目标”将位于  $x + \Delta x(k; r_0)$  处。而由  $k = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M/2$  可知,“虚假目标”将对出现。下面仍然通过仿真实验来观察不同频率正弦平动误差对方位压缩处理的影响,仿真参数如表 1。图 5 给出了不同波段 SAR 情况下,第 1 阶重叠次谱由于方位滤波失配产生的方位偏移量随误差频率的变化曲线。由图 5 可得出两点结论:(1)不同波段情况下,方位偏移量相差不大;(2)随着误差频率的提高,“虚假目标”方位偏移量变大,并由低频误差情况下的小于一个方位分辨单元逐渐变成几倍于方位分辨单元。

与图 5 相对应,图 6 给出不同正弦平动误差下场中心目标的成像结果。所加入的正弦平动误差分别为:小幅度低频误差、小幅度中频误差、小幅度高频误差和大幅度低频误差。成像过程中未加入运动补偿措施。实验中,信号载频选择 10GHz,目的是减小目标距离徙动量,降低平动误差对目标 RCMC 处理的影响,以便更清楚地观察平动误差对目标方位压缩的影响。

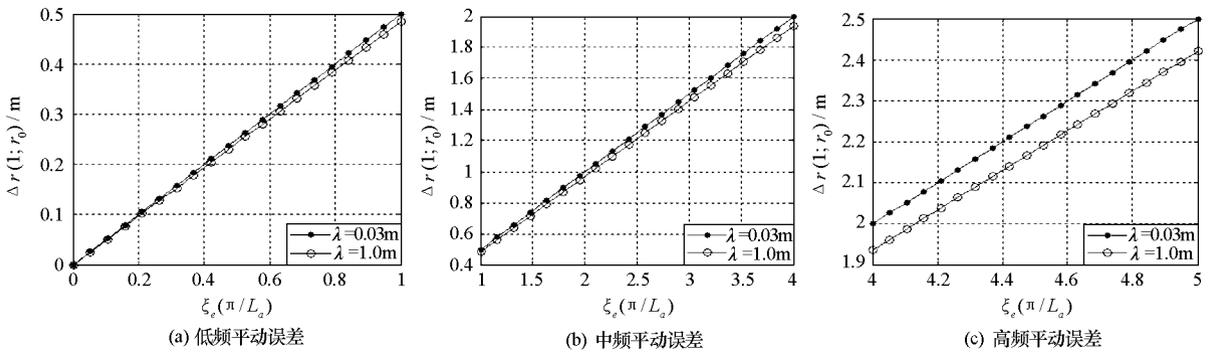


图5 第1阶“虚假目标”的方位偏移量

Fig.5 The azimuth offset of the first order ghost target

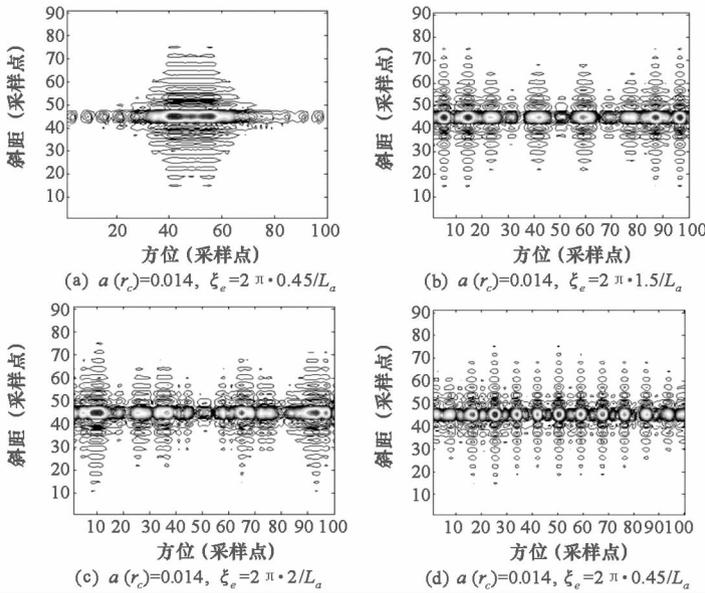


图6 不同平动误差下的 SAR 成像结果

Fig.6 SAR imaging results in presence of different displacement errors

由图6的成像结果,可得出以下结论:

(1)小幅度低频平动误差。此时重叠次谱相对主谱的偏移量很小。成像后,“虚假目标”相对真实目标的方位偏移很小,“虚假目标”主瓣与真实目标主瓣间存在部分重合。SAR 图像上表现为:真实目标主瓣展宽,旁瓣很高,但不存在明显的“虚假目标”,如图6(a)所示。

(2)小幅度中/高频平动误差。这种情况下,重叠次谱相对主谱偏移量较大。成像后,“虚假目标”相对真实目标的方位偏移较大,导致“虚假目标”主瓣与真实目标主瓣间完全分离。SAR 图像上表现为真实目标聚焦良好,但在真实目标两侧(沿方位向)出现大量成对“虚假目标”,某些情况下,真实目标脉冲响应幅度甚至小于“虚假目标”脉冲响应幅度,如图6(b)、(c)所示。

(3)大幅度低频平动误差。虽然误差频率较低,但幅度较大。由第1节的分析可知,误差幅度变大会使有效重叠次谱个数增加,即  $M$  值变大。

而由重叠次谱相对主谱的偏移量  $k\xi_e$  可知,新增重叠次谱的方位偏移较大。这种情况下,SAR 成像结果与前一种情况类似,即真实目标聚焦良好,但在真实目标两侧出现大量“虚假目标”,如图6(d)所示。

由上述分析可知,SAR 成像中,正弦平动误差频率越高,幅度越大,对成像处理影响越大。

### 3 UWB SAR 运动误差空变性分析

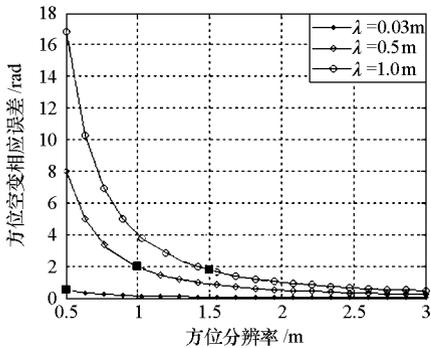
与高频窄带 SAR 相比,低频 UWB SAR 不但受运动误差影响更大,低频 UWB SAR 中的运动误差还具有较强的空变性,这也增加了这类 SAR 系统的运动补偿难度。

(1)距离向空变性。高分辨 UWB SAR 测绘带宽,这使得 UWB SAR 中的运动误差具有较强距离空变性。设  $\Delta y(t_a)$ 、 $\Delta z(t_a)$  分别表示载机平动误差在  $Y$  方向和  $Z$  方向上的投影<sup>[7]</sup>,则俯视角  $\theta$  处对应的平动误差为

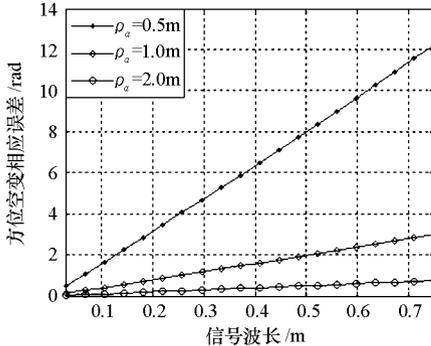
$$\Delta r(t_a; \theta) = \Delta y(t_a) \sin\theta + \Delta z(t_a) \cos\theta \quad (26)$$

由式(26)可发现,平动误差的距离空变性取决于俯视角  $\theta$  的变化范围。UWB SAR 波束角大,测绘带宽,俯仰角  $\theta$  的变化范围可达几十度,因此平动误差具有很大的距离空变性。

(2)方位向空变性。UWB SAR 大积累角还会导致运动误差的方位空变性。设  $\alpha$  表示目标偏离波束中心角度,则目标相对波束中心的方位空变误差为  $\Delta r(1 - \cos\alpha)$ 。显然,当  $\alpha$  等于方位积累角一半时,方位空变误差最大。设平动误差  $\Delta r = 10\text{m}$ ,图7给出了不同波段 SAR 的方位空变相位误差随方位分辨率变化曲线,以及不同方位分辨率下方位空变相位误差随发射信号波长的变化曲线。



(a) 空变相位误差随方位分辨率变化



(b) 空变相位误差随信号波长变化

图7 相位误差方位空变性分析

Fig.7 Analysis on the azimuth-variant of the phase error

由图7可得出两点结论:(1)在发射信号波长相同的情况下,方位分辨率越高,运动误差的方位空变性越强;(2)在方位分辨相同的条件下,SAR工作波段越低,运动误差的方位空变性越强。

## 4 结论

推导了存在正弦平动误差情况下的回波信号频谱,并基于所推导频谱,分析了正弦平动误差对SAR成像处理中的距离弯曲校正和方位压缩处理的影响,以及这种影响随误差频率和幅度的变化情况。仿真实验结果证明了文中理论分析的正确性。

## 参考文献:

- [1] 郭微光. 机载超宽带合成孔径雷达运动补偿技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2003.
- [2] 赖涛. 机载超宽带合成孔径雷达子孔径运动补偿方法研究[D]. 长沙:国防科技大学,2004.
- [3] 薛国义. 机载高分辨超宽带合成孔径雷达运动补偿技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2008.
- [4] Fornaro G. Trajectory Deviations in Airborne SAR: Analysis and Compensation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(3): 997 - 1009.
- [5] Cumming I G, Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation [M]. Norwood, MA: Artech House, 2005.
- [6] Moreira A, Huang Y H. Airborne SAR Processing of Highly Squinted Data Using a Chirp Scaling Approach with Integrated Motion Compensation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(5): 1029 - 1040.
- [7] Xing M D, Jiang X W, Wu R B, et al. Motion Compensation for UAV SAR Based on Raw Radar Data [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8): 2870 - 2882.
- [8] Reigber A, Alivizatos E, Potsis A, et al. Extended Wavenumber Domain Synthetic Aperture Radar Focusing with Integrated Motion Compensation [J]. IEE Proc. Radar Sonar Navig., 2006, 153(2): 301 - 310.