

# 斜视 SAR 运动补偿研究

李燕平 邢孟道 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 该文建立了斜视 SAR 的运动误差模型, 分析了不同斜视角度和波束宽度情况下运动误差造成的影响, 提出了小斜视和大斜视情况下各自的运动补偿方法, 分析表明该方法较常规运动补偿方法适用范围更广。仿真和实测数据的处理结果表明了该方法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 运动补偿; 小斜视 SAR; 大斜视 SAR

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1421-04

## Study of Motion Compensation for Squinted-Looking SAR

Li Yan-ping Xing Meng-dao Bao Zheng

(National Key Lab. of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on the proposed motion error model and detailed influence analysis, with respect to different squint angle and beam width, novel motion compensation methods are presented in this paper for slightly squinted-looking SAR and highly squinted-looking SAR, respectively. It is shown that the application scope of the proposed methods is wider than the existing ones. Lastly, both simulation and results of real data are provided to demonstrate the effectiveness of the proposed methods.

**Key words:** SAR; Motion compensation; Slightly squinted-looking SAR; Highly squinted-looking SAR

### 1 引言

斜视SAR成像在军事上具有重要的应用价值, 比如战斗机、轰炸机需要观察前方情况, 还有一些人造目标必须在一定视角下观察。目前斜视SAR成像主要研究的是不存在运动误差情况下的成像方法<sup>[1-3]</sup>, 但实际中载机受气流等因素的影响, 飞行往往存在运动误差, 导致成像后分辨率下降, 因而运动补偿同样重要, 通常的运动补偿方法<sup>[4,5]</sup>往往基于正侧视模型, 其适用范围有限。本文通过建立斜视SAR运动误差模型并分析不同斜视角度和波束宽度情况下运动误差造成的影响, 提出了一种斜视SAR的运动补偿方法。在小斜视波束内相位误差差别可以忽略的情况下, 可以采用类似常规运动补偿的简单处理方法进行补偿; 在大斜视波束内相位误差差别不可忽略的情况下, 则需要在一阶补偿的基础上增加方位空变相位误差的补偿。分析表明常规运动补偿方法是本文方法在正侧视、窄波束情况下的简化, 而本文方法的适用范围更广。

### 2 斜视 SAR 的运动补偿

如图1所示,  $X$  轴向为理想航迹, 实线为实际航迹。假设载机前向速度的变化已通过实时调整 PRF 或者事后插值补偿, 实际雷达天线相位中心位置可表示为  $[Vt_m, Y(t_m), Z(t_m)]$ ,  $V$  为理想飞行速度,  $Y(t_m)$  和  $Z(t_m)$  分别是  $Y, Z$  方

向的运动误差分量。

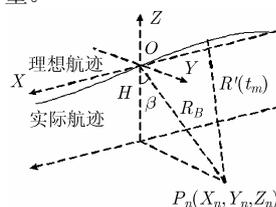


图1 存在运动误差的斜视 SAR 几何关系

实际雷达天线相位中心到点目标  $P_n$  的斜距  $R'(t_m)$  为

$$R'(t_m) = \sqrt{(X_n + Vt_c - Vt_m)^2 + (Y(t_m) - Y_n)^2 + (Z(t_m) - Z_n)^2} \quad (1)$$

其中  $t_c = R_B \tan \theta_0 / V$ ,  $\theta_0$  为雷达斜视角,  $R_B = \sqrt{Y_n^2 + Z_n^2}$  为垂直距离。对式(1)化简并忽略影响较小的高次项可得

$$\begin{aligned} R'(t_m) &= [R^2(t_m) + Y^2(t_m) + Z^2(t_m) - 2Y(t_m)R_B \sin \beta \\ &\quad - 2Z(t_m)R_B \cos \beta]^{1/2} \\ &\approx [R^2(t_m) - 2Y(t_m)R_B \sin \beta - 2Z(t_m)R_B \cos \beta]^{1/2} \\ &\approx R(t_m) - [Y(t_m) \sin \beta + Z(t_m) \cos \beta] \frac{R_B}{R(t_m)} \\ &\approx R(t_m) - \Delta R_B(t_m) \cos \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $R(t_m) = [(X_n + Vt_c - Vt_m)^2 + Y_n^2 + Z_n^2]^{1/2}$  为不存在运动误差情况下的斜距历程,  $\alpha$  为点目标斜视角,  $\theta_0 - (\Delta\theta/2) \leq \alpha \leq \theta_0 + (\Delta\theta/2)$ ,  $\Delta\theta$  为波束宽度,  $\Delta R_B(t_m) = Y(t_m) \sin \beta + Z(t_m) \cos \beta$ , 由图1的几何关系可知  $\Delta R_B(t_m)$  为载机的侧向偏移。从式(2)可以看出在斜视情况下, 载机的非理想运动造成的运动误差对不同斜视角的目标影响是不一样的, 如图2所示。下面进一步分析不同斜视角和不同波束宽度情况下该

2005-10-24 收到, 2006-04-13 改回

国家自然科学基金(60502044), 微波成像重点实验室基金(51442020 404DZ0102)资助课题

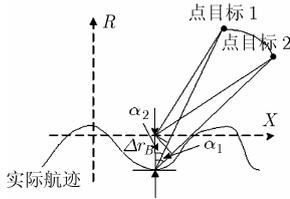


图2 波束内不同斜视角的点的运动误差

误差的影响。

### 2.1 小斜视、窄波束情况

运动误差  $\Delta R_B(t_m)$  对波束两侧方向产生的距离误差分别为

$$\Delta R_B(t_m) \left[ \cos \left( \theta_0 - \frac{\Delta \theta}{2} \right) - \cos \theta_0 \right] \approx \Delta R_B(t_m) \frac{\Delta \theta}{2} \sin \theta_0 \quad (3)$$

$$\Delta R_B(t_m) \left[ \cos \left( \theta_0 + \frac{\Delta \theta}{2} \right) - \cos \theta_0 \right] \approx -\Delta R_B(t_m) \frac{\Delta \theta}{2} \sin \theta_0 \quad (4)$$

以X波段为例,若雷达斜视角  $8^\circ$ ,波束宽度  $2.5^\circ$ ,  $\Delta R_B$  为1m,则  $\left| \Delta R_B \frac{\Delta \theta}{2} \sin \theta_0 \right| = 0.003$  m,该运动误差引起的波束内相位误差的差别小于  $\lambda/8$ ,可以忽略,可用统一的相位值进行补偿。对某一时刻的回波用统一的相位值进行补偿正是常规运动补偿方法的做法,可以看出,这种做法其实隐含了一个条件  $\left| \Delta R_B(t_m) \frac{\Delta \theta}{2} \sin \theta_0 \right| \leq \frac{\lambda}{8}$ ,即小斜视、窄波束。常规运动补偿方法<sup>[4,5]</sup>通常是基于正侧视模型,由式(2)可以看出在小斜视、窄波束情况下,虽然可用统一的相位值进行补偿,但补偿量还要考虑雷达斜视角  $\theta_0$ ,此时式(2)可写为

$$\begin{aligned} R'(t_m) &= R(t_m) - \cos \theta_0 \left[ Y(t_m) \frac{\sqrt{R_B^2 - H^2}}{R_B} + Z(t_m) \frac{H}{R_B} \right] \\ &\approx R(t_m) - \cos \theta_0 \left[ Y(t_m) \left( 1 - \frac{H^2}{2R_B^2} \right) + Z(t_m) \frac{H}{R_B} \right] \\ &= R(t_m) - \cos \theta_0 \left[ Y(t_m) \left( 1 - \frac{H^2}{2R_s^2 \cos^2 \theta_0} \right) \right. \\ &\quad \left. + Z(t_m) \frac{H}{R_s \cos \theta_0} \right] \\ &\approx R(t_m) - \cos \theta_0 \left[ Y(t_m) \left( 1 - \frac{H^2}{2 \cos^2 \theta_0 R_{s0}^2} + \frac{H^2 \Delta R}{\cos^2 \theta_0 R_{s0}^3} \right) \right. \\ &\quad \left. + Z(t_m) \left[ \frac{H}{\cos \theta_0 R_{s0}} - \frac{H \Delta R}{\cos \theta_0 R_{s0}^2} \right] \right] \\ &= R(t_m) - \cos \theta_0 \Delta r_{B\_I}(t_m) - \cos \theta_0 \Delta r_{B\_II}(t_m) \quad (5) \end{aligned}$$

其中  $R_{s0}$  为场景中心斜距,  $R_B = R_s \cos \theta_0$ ,  $R_s = R_{s0} + \Delta R$ , 这里利用了  $\frac{1}{R_s} \approx \frac{1}{R_{s0}} \left( 1 - \frac{\Delta R}{R_{s0}} \right)$ , 和  $\frac{1}{R_s^2} \approx \frac{1}{R_{s0}^2} \left( 1 - \frac{2\Delta R}{R_{s0}} \right)$ ,  $\Delta r_{B\_I}(t_m)$  为相对场景中心的偏移量,  $\Delta r_{B\_II}(t_m)$  为随距离变化而变化的偏移量,分别为

$$\begin{aligned} \Delta r_{B\_I}(t_m) &= \int_0^{t_m} \int_0^s \left[ a_Y(u) \left( 1 - \frac{H^2}{2 \cos^2 \theta_0 R_{s0}^2} \right) \right. \\ &\quad \left. + a_Z(u) \frac{H}{\cos \theta_0 R_{s0}} \right] du ds \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta r_{B\_II}(t_m) &= \int_0^{t_m} \int_0^s \left[ a_Y(u) \frac{H^2}{\cos^2 \theta_0 R_{s0}^2} \right. \\ &\quad \left. - a_Z(u) \frac{H}{\cos \theta_0 R_{s0}} \right] \frac{\Delta R}{R_{s0}} du ds \quad (7) \end{aligned}$$

其中  $a_Y(t_m)$  和  $a_Z(t_m)$  为载机Y, Z方向的加速度(本文假定载机的加速度参数可以从惯导获得,在测量精度有限的情况下也可采用从回波数据提取的方法<sup>[7]</sup>,这方面本文不作重点讨论)。由于一阶补偿分量  $\Delta r_{B\_I}(t_m)$  相对较大,有可能影响距离徙动的校正,因此需要在距离徙动校正前先进行包络和相位的校正,其距离频率域的补偿公式为

$$S_{\text{cmp}}(f_r) = \exp \left( j \frac{4\pi f_r \Delta r_{B\_I}(t_m) \cos \theta_0}{c} + j \frac{4\pi \Delta r_{B\_I}(t_m) \cos \theta_0}{\lambda} \right) \quad (8)$$

二阶补偿分量  $\Delta r_{B\_II}(t_m)$  一般较小,对距离徙动校正(RMC)的影响小,距离徙动校正可以在忽略这部分误差的情况下进行,可以在距离徙动校正后按距离单元进行相位校正,其补偿公式为

$$\phi_{\text{cmp}}(t_m) = \exp \left( j \frac{4\pi \Delta r_{B\_II}(t_m) \cos \theta_0}{\lambda} \right) \quad (9)$$

整个运动补偿的流程图如图3所示。

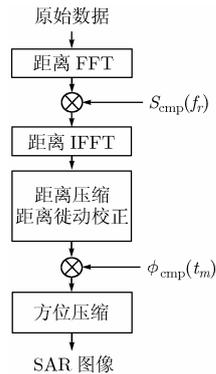


图3 小斜视、窄波束情况运动补偿流程图

### 2.2 正侧视、窄波束情况

常规运动补偿方法正是基于这种情况,这种情况可以看作是2.1节情况的特例,即斜视角为0,因而运动补偿也可采用图3所示的流程,只需要把斜视角替换为0即可。

前面讨论的两种情况其波束内相位误差的差别都可以忽略,因而可用统一的相位值进行补偿。下面讨论这种波束内相位误差的差别不可以忽略的情况。

### 2.3 大斜视、窄波束情况

由式(3),式(4)可以看出,这种波束内相位误差的差别与雷达斜视角和波束宽度成正比,仍以2.1节中所举的参数为例,只是把雷达斜视角改为  $50^\circ$ ,  $|\Delta R_B(\Delta \theta/2) \sin \theta_0| = 0.0167$  m可见虽然同样是窄波束,但在大斜视情况下这种波束内相位误差的差别已经不可忽略,因而运动补偿需要考虑这种方位空变的运动误差的补偿。此时式(5)应写为

$$R'(t_m) = R(t_m) - \cos \alpha \Delta r_{B\_I}(t_m) - \cos \alpha \Delta r_{B\_II}(t_m) \quad (10)$$

可以考虑先对原始数据在距离频率域按式(8)进行一阶

补偿, 补偿后式(10)变为

$$R'(t_m) = R(t_m) + (\cos \theta_0 - \cos \alpha) \Delta r_{B\_I}(t_m) - \cos \alpha \Delta r_{B\_II}(t_m) \quad (11)$$

此时式(11)的后两项一般较小, 对距离徙动校正的影响小, 距离徙动校正可以在忽略这部分误差的情况下进行, 距离徙动校正后再对这种方位空变的相位误差进行校正。具体的做法是: 先对距离分段, 对  $\Delta r_{B\_II}(t_m)$  按距离段中心的  $\Delta r_{B\_II\_mid}$  代替, 再对方位进行分块, 对  $\Delta r_{B\_I}(t_m)$  按方位块中心的  $\Delta r_{B\_I\_mid}$  代替, 由于方位块的脉冲数一般取得较少, 目标相对雷达的视角可看作不变, 对划分的子块变换到方位频率域, 由于不同的方位频率对应不同的斜视角, 这时就可以对这种与斜视角有关的相位误差进行补偿, 其公式为

$$\phi_{\text{cmp}_a}(f_a) = \exp \left[ j \frac{4\pi}{\lambda} \left( \left[ \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda f_a}{2V} \right)^2} - \cos \theta_0 \right] \Delta r_{B\_I\_mid} + \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda f_a}{2V} \right)^2} \Delta r_{B\_II\_mid} \right) \right] \quad (12)$$

其中  $-\text{PRF}/2 + f_{dc} \leq f_a \leq f_{dc} + \text{PRF}/2$ , 乘上补偿因子后对各子块做方位IFFT即完成补偿。

由于本文是通过划分子块在方位频率域校正空变的相位误差, 而方位子块的大小是一个需要考虑的问题, 如果子块选得较大, 子块之间的运动误差变化较大, 则补偿以后的连接处发生相位突变, 从而导致成像质量下降; 如果子块选得太小, 由于补偿时角度分辨率较低, 会影响补偿效果。解决以上问题的一个可行办法是在方位分块的时候对子块进行重叠, 此时子块脉冲数可稍微取多些, 由于各子块中间部分数据的运动误差与空变补偿时采用的运动误差最为接近, 因而补偿后存在的误差最小, 可在子块补偿后只保留中间部分数据而丢弃其余数据。大斜视要考虑方位空变相位误差的情况下, 其运动补偿的流程如图4所示。

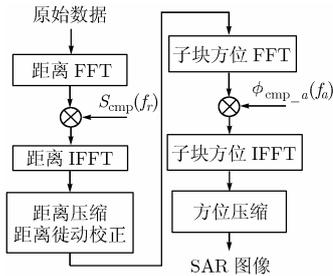


图4 大斜视考虑方位空变相位误差补偿流程图

### 2.4 正侧视、宽波束情况

这种情况的一个典型例子就是目前研究较多的超宽带合成孔径雷达, 由于超宽带合成孔径雷达波束张角很大(通常有几十度), 飞行状况不理想时往往  $|\Delta R_B(t_m)(\cos(\Delta\theta/2) - 1)| > \lambda/8$ , 因此运动误差造成的这种波束内相位误差的差别同样不可忽略。从运动补偿的角度这种情况也可以看作是2.3节情况的特例, 即斜视角为0, 因而运动补偿也可采用图4所示的流程, 只需要把斜视角替换为0即可。

以上讨论的几种情况在SAR成像中比较常见, 本文针对不同的情况采用了不同的方法处理, 可以看出常规运动补偿方法是本文方法在不考虑波束内相位误差差别情况下的一种简化, 适用于正侧视, 窄波束情况。对于本文重点研究的斜视SAR的运动补偿, 在小斜视波束内相位误差差别可以忽略的情况下, 可以采用类似常规运动补偿的简单处理方法按图3流程进行运动补偿, 在大斜视波束内相位误差差别不可忽略的情况下, 则需要在一阶补偿的基础上按图4流程增加方位空变相位误差的补偿。

### 3 仿真和实测数据验证

仿真分为小斜视情况和大斜视情况分别进行验证, 小斜视情况仿真参数为: 波长0.03m, 带宽70MHz, 方位波束宽度3°, 重复频率1200Hz, 载机速度110m/s, 雷达斜视角8°。仿真中设置了两个点目标, 点目标1位于场景中心, 点目标2与点目标1沿距离向相距2km。载机Y方向和Z方向的扰动速度选择了幅值为1.5m, 周期为8s的正弦波。图5, 图6是两个点目标运动补偿后方位冲击响应的比较, 可以看出, 由于常规补偿是基于正侧视模型, 直接应用到斜视情况时效果不好, 采用本文小斜视的运动补偿方法后, 点目标方位冲击响应接近理想情况(没有运动误差), 表明小斜视情况下, 采用图3流程不用考虑方位空变相位误差的补偿也可以达到良好的补偿效果。

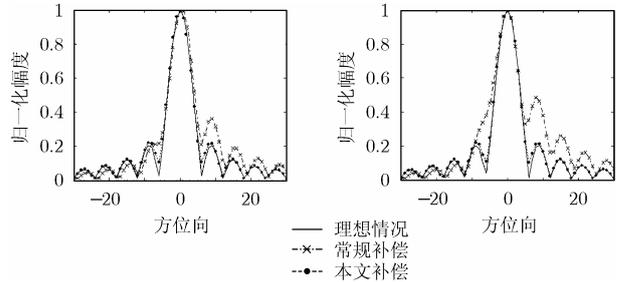


图5 小斜视点目标1方位冲击响应比较

图6 小斜视点目标2方位冲击响应比较

大斜视情况的仿真参数为: 波长0.03m, 带宽70MHz, 方位波束宽度2.5°, 重复频率1000Hz, 载机速度135m/s, 场景中心斜距28km, 雷达斜视角为50°。仿真中同样对载机的Y方向和Z方向加入正弦振荡的运动误差。图7, 图8是两个点目标运动补偿后方位冲击响应的比较, 可见若仍然按图3流程进行一阶补偿, 点目标成像后仍然散焦严重, 这主要是由

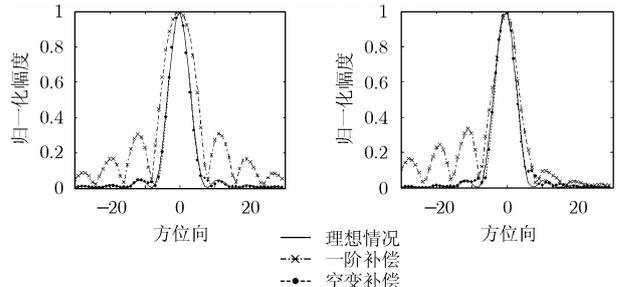


图7 大斜视点目标1方位冲击响应比较

图8 大斜视点目标2方位冲击响应比较

于大斜视时波束内相位误差的差别不可忽略造成的(当然,在成像所需要的方位波束较窄,或者是载机的运动误差较小时,这种方位空变的相位误差可以不用考虑),对方位划分子块进行方位空变运动补偿(Azimuth-variant MOCO)后,点目标的聚焦状况有了明显改善。

针对2.3节提到的子块补偿可能引起相位突变的问题,本文进一步进行了分析验证,仿真和实测数据处理表明,在运动误差缓变的情况下,子块重叠与不重叠补偿后效果差别不大,为了节省运算量子块可以不用重叠。对于运动误差变化较快的情况本文进行了仿真,图9是子块不重叠补偿后点目标冲击响应的等高线图,可以看出由于子块内运动误差的变化不可忽略,子块补偿后相位突变造成成像后点目标的冲击响应存在栅瓣,影响图像质量。图10是子块重叠(重叠一半)补偿后点目标的冲击响应,可以看出栅瓣现象基本消失,聚焦状况良好,说明在运动误差变化较快时有必要采用子块重叠的补偿方式。

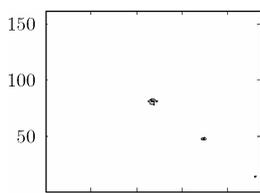


图9 子块不重叠补偿后点目标的冲击响应

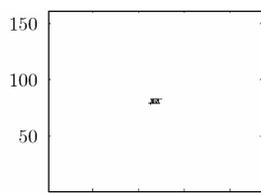


图10 子块重叠补偿后点目标的冲击响应

采用本文方法对实测的大斜视回波数据进行了处理(雷达斜视角 $50^\circ$ ),该雷达的系统参数与仿真参数相同,由于大斜视时距离走动严重,成像中采用时域校正距离走动,距离频率-方位频率域校正距离弯曲的方法<sup>[2,6]</sup>,图11是常规运动补偿后的成像结果,地物轮廓比较模糊,聚焦状况不好,说

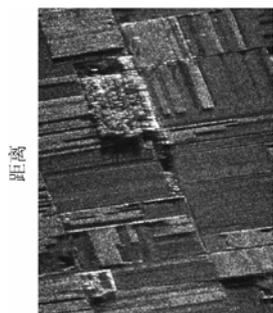


图11 常规运动补偿后的成像结果

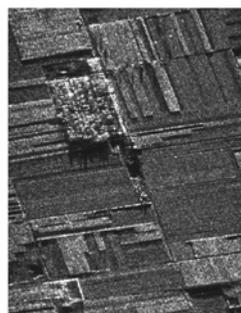


图12 本文方法运动补偿后的成像结果

明常规运动补偿方法在大斜视情况下不适用。图12是采用本文方法进行运动补偿后的成像结果,可以看出聚焦状况得到了明显改善。

#### 4 结束语

本文通过建立斜视SAR运动误差模型并分析不同斜视角度和波束宽度情况下运动误差造成的影响,提出了一种斜视SAR的运动补偿方法,在小斜视波束内相位误差差别可以忽略的情况下,可以采用类似常规运动补偿的简单处理方法进行补偿;在大斜视波束内相位误差差别不可忽略的情况下,则需要在一阶补偿的基础上增加方位空变相位误差的补偿。常规运动补偿方法是本文方法在正侧视、窄波束情况下的简化,其适用范围较本文方法有限。仿真和实测数据处理表明本文方法是有效的。

#### 参考文献

- [1] Chang C Y, Jin M, and Curlander J C. Squint mode SAR processing algorithms[A]. Proc IGARSS'89[C]. Vancouver, 1989: 1702-1706.
- [2] Smith A M. A new approach to range-Doppler SAR processing. *Int. J. Remote Sensing*, 1991, 12(2): 235-251.
- [3] Davidson G W, Cumming I G, and Ito M R. A chirp scaling approach for processing squint model SAR data. *IEEE Trans. on AES*, 1996, 32(1): 121-133.
- [4] Franceschetti G and Landari R. Synthetic Aperture Radar Processing[M]. London: CRC Press, 1999: 141-144.
- [5] Fornaro G. Trajectory deviations in airborne SAR: Analysis and compensation[J]. *IEEE Trans. on AES*, 1999, 35(3): 997-1009.
- [6] Jin M Y and Wu C. A SAR correlation algorithm which accommodates large range migration. *IEEE Trans. on GRS*, 1984, 22(6): 592-597.
- [7] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 185-227.

李燕平: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为雷达成像和动目标检测.

邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为雷达成像和目标识别.

保铮: 男, 1927年生, 教授, 中科院院士, 博士生导师, 研究领域为信号处理和雷达系统.