

FMCW SAR 运动补偿处理技术研究

贾高伟,常文革

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要: 调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)技术与合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术的结合,促进了小型化、低成本、低功耗、高分辨率成像传感器的发展.本文建立了非理想情况下 FMCW SAR 的回波信号模型,分析了 FMCW SAR 运动补偿处理同脉冲体制 SAR 的区别;提出了完整的三维误差补偿流程,并分别论证了前向运动误差及沿视线方向(Line of Sight, LOS)方向运动补偿处理方法;文中最后采用 FMCW SAR 实测数据对所提处理流程进行了验证.

关键词: 调频连续波;合成孔径雷达;运动补偿;距离多普勒;频率变标

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)09-1665-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.001

Analysis of Motion Compensation for FMCW Synthetic Aperture Radar

JIA Gao-wei, CHANG Wen-ge

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: The combination of frequency modulated continuous wave(FMCW) and synthetic aperture radar(SAR) leads to the rapid development of the compact, low-cost, low power imaging sensors. The model of imaging in the presence of motion error is presented firstly, based on which the difference of motion compensation between FMCW SAR and pulsed SAR is compared. The integrated processing flow of motion compensation is proposed, contains the compensation along track and in the line of sight. The experimental FMCW SAR data and focused SAR images verify the feasibility of the proposed method.

Key words: frequency modulated continuous wave; synthetic aperture radar; motion compensation; range Doppler; frequency scaling

1 引言

SAR 作为一种具有全天时全天候高分辨成像能力的高性能传感器,与无人机的结合,一方面极大拓展了 SAR 的应用范围,另一方面增强了无人机的感知能力,因而受到了广泛关注.微小型无人机因操作简便,易于携带,造价低廉等因素在全球范围内有着广泛应用.但微小型无人机有限的载荷及功耗不适合装配体积重量大、功耗高的脉冲体制 SAR.

FMCW 与 SAR 技术的结合很好地解决了这一问题并大大促进了小体积、低功耗、低成本、高分辨率成像传感器的发展与革新^[1,2]. FMCW SAR 能装配于多种运输平台,包括微小型无人机甚至航模,因而在国防和民事领域具有广泛的应用前景,且已成为国内外研究的热点.相比于传统脉冲体制 SAR, FMCW SAR 发射信号的

持续时间更长^[1,3],致使传统的“停-走-停”假设不再成立,因而脉冲 SAR 的运动补偿方法将不再适合于 FMCW SAR.同时,微小型无人机更容易受不稳定气流的影响,飞行平稳性较差.这大大增大了高分辨 SAR 运动补偿的难度^[4].本文将分析高波段 FMCW SAR 运动补偿的特点,并提出适用于 FMCW SAR 实时成像处理的运动补偿方法.

2 FMCW SAR 成像几何及信号模型

图 1 为非理想情况下正侧视条带 SAR 的成像几何.图中 XYZ 确立了三维直角坐标系, X 轴是载机预定航迹,且以点 O 垂直于平面 ZOY. 预定航迹的高为 H, 图中虚线为实际飞行轨迹, P_e 为实际航线上的任意一点,其相对理想状况的三维误差为 $\Delta X(t)$ 、 $\Delta Y(t)$ 、 $\Delta Z(t)$, P_e 点的坐标为 $[X(t), \Delta Y(t), \Delta Z(t)]$, $X(t)$ 表

示载机的实际位置, t 为时间变量.

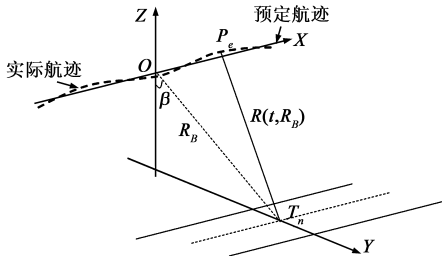


图1 机载SAR成像几何关系图

设测绘带中有一个点目标 T_n , 坐标为 $[X_n, Y_n, Z_n]$, 它到 X 轴的垂直距离为 R_B , 直线 OT_n 与 Z 轴的夹角为 β . 依据图 1, 天线相位中心 (Antenna Phase Center, APC) 到静止点目标 T_n 的瞬时斜距可以表示为:

$$R(t, R_B) = \sqrt{(X(t) - X_n)^2 + (\Delta Y(t) - Y_n)^2 + (\Delta Z(t) - Z_n)^2} \quad (1)$$

理想情况下, 式(1)可表示为:

$$R(t, R_B) = \sqrt{(Vt - X_n)^2 + Y_n^2 + Z_n^2} = \sqrt{(Vt - X_n)^2 + R_B^2} \quad (2)$$

其中 $V(t)$ 表示载机匀速飞行速度, $R_B^2 = Y_n^2 + Z_n^2$.

在 $|\Delta Y(t) \sin\beta + \Delta Z(t) \cos\beta| \ll \sqrt{(X(t) - X_n)^2 + R_B^2}$ 的条件下对式(1)进行泰勒级数展开, 保留至一阶项, 得到:

$$R(t, R_B) = \sqrt{(X(t) - X_n)^2 + R_B^2} - \Delta r(t, R_B) \cos\theta \quad (3)$$

其中 $\cos\theta = \frac{R_B}{\sqrt{(V_x t - X_n)^2 + R_B^2}} \approx \frac{R_B}{\sqrt{(V_x t_m - X_n)^2 + R_B^2}}$, θ 表示雷达 APC 相对目标 T_n 的瞬时斜视角, $\Delta r(t, R_B) = \Delta Y(t) \sin\beta + \Delta Z(t) \cos\beta$.

式(3)表明可以将 SAR 三维运动误差分解为沿航向运动误差以及沿 LOS 方向运动误差, 对于忽略了脉内连续运动的脉冲 SAR 来说, 式(3)可以表述为:

$$R(t_m, R_B) = \sqrt{(X(t_m) - X_n)^2 + R_B^2} - \Delta r(t_m, R_B) \cdot \cos\theta \quad (4)$$

t_m 表示慢时间. $X(t_m)$ 表示载机沿航向的位置, $\Delta r(t_m, R_B) = \Delta Y(t_m) \sin\beta + \Delta Z(t_m) \cos\beta$. 直观地, 式(4)是将式(3)中的全时间 t 替换为 t_m 得到的, 可以用图 2 来描述这一关系.

图 2 中细实线表示理想航迹, 粗实线表示载机的真实航迹, 它是关于全时间连续变化的, 即为式(3)所示. 对于脉冲 SAR 而言, 因其忽略了脉内载机运动, 可以用图中长划线近似表示, 它可以视为是真实航迹以脉冲重复间隔 (Pulse Repetition Time, PRT) 为间隔的采样结果.

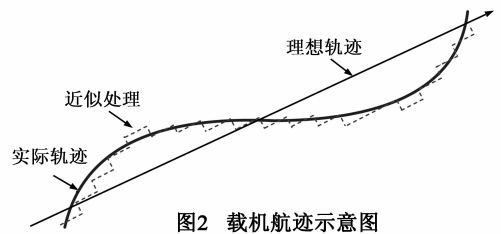


图2 载机航迹示意图

设 FMCW SAR 辐射 LFM 信号的持续时间为 T_r , 它通常为 10^{-4} s 量级^[1], 在 T_r 时间间隔中, 可以认为载机的三维速度是不变的, 即 $V(t_m + \hat{t}) = V(t_m)$, $V_r(t_m + \hat{t}) = V_r(t_m)$, $\hat{t} \in [0, T_r]$, 其中 V_r 表示载机沿 LOS 方向的飞行速度. 可以对式(3)做进一步的分解:

$$\begin{aligned} R(t, R_B) &\approx \sqrt{(X(t) - X_n)^2 + R_B^2} - \Delta r(t_m, R_B) \cos\theta \\ &\quad - (V_y(t_m) \sin\beta \cdot \hat{t} + V_z(t_m) \cos\beta \cdot \hat{t}) \cos\theta \\ &\approx \sqrt{(X(t) - X_n)^2 + R_B^2} - \Delta r(t_m, R_B) - \xi_{t_m} \cdot \hat{t} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\xi_{t_m} = V_y(t_m) \sin\beta + V_z(t_m) \cos\beta$.

由文献[1]可知, 理想条件下 FMCW SAR 的回波形式为:

$$\begin{aligned} s(\hat{t}, t_m) &= W_r \left[\hat{t} - \frac{2R(t)}{c} \right] w_a[t_m] \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t, R_B)) \\ &\quad \cdot \exp(-j \frac{4\pi k \hat{t}}{c} \cdot R(t, R_B)) \exp(j \frac{4\pi k R^2(t, R_B)}{c^2}) \end{aligned} \quad (6)$$

近似表示为

$$\begin{aligned} s(\hat{t}, t_m) &= \{ w_r[\hat{t}] w_a[t_m] \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t, R_B)) \\ &\quad \cdot \exp(-j \frac{4\pi k \hat{t}}{c} \cdot R(t, R_B)) \} \otimes \exp(-j \pi k \hat{t}^2) \end{aligned} \quad (7)$$

$w_r[\hat{t}]$, $w_a[t_m]$ 分别表示回波信号在距离向和方位向的矩形窗. 将式(5)带入式(6), 可以得到含有运动误差的 FMCW SAR 信号模型. 忽略斜距误差对信号包络的影响, 以及载机脉内运动误差对 RVP 项的影响, 得到:

$$\begin{aligned} s(\hat{t}, t_m) &= w_r[\hat{t} - \frac{2R(t)}{c}] w_a[t_m] \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_1(t, R_B)) \\ &\quad \cdot \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r(t_m, R_B)) \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \xi_{t_m} \cdot \hat{t}) \\ &\quad \cdot \exp(-j \frac{4\pi k \hat{t}}{c} \cdot R_1(t, R_B)) \exp(j \frac{4\pi k \hat{t}}{c} \cdot \Delta r(t_m, R_B)) \\ &\quad \cdot \exp(j \frac{4\pi k \xi_{t_m}}{c} \cdot \hat{t}^2) \exp(j \frac{4\pi k R_1^2(t_m, R_B)}{c^2}) \\ &\quad \cdot \exp(j \frac{8\pi k R_1(t_m, R_B)}{c^2} \cdot \Delta r(t_m, R_B)) \\ &\quad \cdot \exp(j \frac{4\pi k \Delta r^2(t_m, R_B)}{c^2}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $R_1(t, R_B) = \sqrt{(X(t) - X_n)^2 + R_B^2}$, $R_1(t_m, R_B) = \sqrt{(X(t_m) - X_n)^2 + R_B^2}$. 式(8)表示了包含运动误差的高

波段 FMCW SAR 回波模型,它将是高波段 FMCW SAR 运动补偿的理论基础。

3 FMCW SAR 前向运动误差的补偿方法

由式(3)得知,载机在运动过程中的三维误差可被分解为正交的前向运动误差和 LOS 方向运动误差。对于高波段 SAR,前向运动误差对 LOS 方向的影响很小^[5],可以独立补偿。针对 SAR 前向非匀速飞行,相应的处理手段有两类:(1)通过运动补偿方法处理;(2)利用方位向非均匀位置的信息构建均匀化的信号模型^[6]。前者具有实时性好,补偿方便的特点;后者通常涉及到非均匀傅里叶变换,且需基于一定的运动模型,运算量较大。因此基于运动补偿的方法得到了普遍应用。

实时调整 PRF 是脉冲体制 SAR 中普遍使用的前向运动误差补偿方法。FMCW SAR 的信号体制为连续波,占空比为 1,因而无法通过调整 PRF 的方法实现前向运动误差补偿,需要设计新的补偿方案。本节首先阐述了在脉冲体制下,利用相位补偿方法消除前向运动误差影响的步骤流程,接着分析了适用于 FMCW SAR 的处理方法。

3.1 脉冲体制 SAR 前向运动误差的影响及补偿

图 3(a)表示了载机前向速度随方位时间的变化,在 $[t_1, t_2]$ 时间段内,载机速度是近似匀速的。在成像处理过程中,可以沿方位向划分多个类似于 $[t_1, t_2]$ 的时间段,在这些时间段内载机近似以恒定的速度 V_1 飞行。有关系式 $V_1 = \bar{V} + \Delta v$ 成立,其中 \bar{V} 为成像的整个时间段里载机的平均速度, Δv 在 $[t_1, t_2]$ 内是一个恒定值。

图 3(b)中给出了 $[t_1, t_2]$ 时间段内雷达回波采集示意图,在仅考虑前向速度误差的情况下,可以认为载机沿直线以非恒定速度飞行。假定此时载机实际航速为 V_1 ,理想航速为 \bar{V} 。图中散射点 x_1 为 $[t_1, t_2]$ 中任一散射点。在完成距离向压缩及距离徙动校正之后,仅需分析散射点的相位历程即可分析运动误差对成像的影响。具体地,结合式(8)中方位调制项, x_1 在 $[t_1, t_2]$ 内的相位历程为:

$$\tilde{\varphi}_1(t_m) = -\frac{4\pi}{\lambda} R_1(t_m) = -\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(V_1 t_m - x_1)^2 + R_B^2}, \quad t_m \in [t_1, t_2] \quad (9)$$

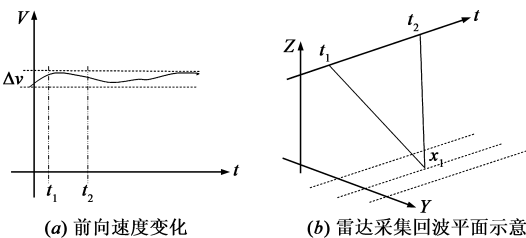


图3 前向运动补偿速度及回波采集模型

理想航速情况下, x_1 在 $[t_1, t_2]$ 内的相位历程为:

$$\varphi_1(t_m) = -\frac{4\pi}{\lambda} R_1(t_m) = -\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(\bar{V} t_m - x_1)^2 + R_B^2}, \quad t_m \in [t_1, t_2] \quad (10)$$

对应的相位差为:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_1(t_m) &= -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2R_B} [(V_1 t_m - x_1)^2 - (\bar{V} t_m - x_1)^2] \\ &= -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2R_B} [V_1^2 t_m^2 - \bar{V}^2 t_m^2 - 2(V_1 - \bar{V}) t_m \cdot x_1] \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)表明,对于 x_1 而言,前向运动误差一方面引入二次相位误差 $-\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2R_B} [V_1^2 t_m^2 - \bar{V}^2 t_m^2]$,它可以通过多普勒调频率或方位向速度进行估计;同时又引入一次相位误差 $\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2R_B} [2(V_1 - \bar{V}) t_m \cdot x_1]$,使得 x_1 沿方位向定位位置发生偏移,需要在成像处理中予以消除。若以 $[t_1, t_2]$ 中点作为 $[t_1, t_2]$ 时段内慢时间积分的原点,则 x_1 可以表示为:

$$x_1 = \bar{V} t'_m \quad (12)$$

t'_m 表示新的慢时间。则式(11)可以表示为:

$$\Delta\varphi_1(t_m) = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2R_B} [V_1^2 t_m^2 - \bar{V}^2 t_m^2 - 2(V_1 - \bar{V}) t_m \cdot \bar{V} t'_m] \quad (13)$$

3.2 FMCW SAR 前向运动误差影响及补偿

类似于脉冲 SAR 前向运动误差的分析方法,对于 FMCW SAR,结合式(13),可以得到在 $[t_1, t_2]$ 时段内,前向速度误差引入的相位误差为:

$$\Delta\varphi(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2R_B} [V_1^2 t^2 - \bar{V}^2 t^2 - 2(V_1 - \bar{V}) t \cdot \bar{V} t'] \quad (14)$$

t' 为新的时间变量,但在处理中可以用 t'_m 代替,这是由于用慢时间表征散射点在方位向的位置已足够精确。为便于分析前向运动误差对成像过程的影响,应将式(14)分解为慢时间 t_m 和快时间 \hat{t} 的表达式,具体为:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(\hat{t}, t_m) &= -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2R_B} [V_1^2 t_m^2 + V_1^2 \hat{t}^2 + 2V_1^2 t_m \hat{t} \\ &\quad - \bar{V}^2 t_m^2 - \bar{V}^2 \hat{t}^2 - 2\bar{V}^2 t_m \hat{t} - 2(V_1 - \bar{V}) t_m \\ &\quad \cdot \bar{V} t'_m - 2(V_1 - \bar{V}) \hat{t} \cdot \bar{V} t'_m] \\ &\approx -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2R_B} [V_1^2 t_m^2 - \bar{V}^2 t_m^2 - 2(V_1 - \bar{V}) t_m \\ &\quad \cdot \bar{V} t'_m + 2V_1^2 t_m \hat{t} - 2\bar{V}^2 t_m \hat{t}] \end{aligned} \quad (15)$$

$\Delta\varphi(\hat{t}, t_m)$ 在误差产生过程上可分为由脉间运动引入的和脉内运动引入两种,分别为:

$$\Delta\varphi(t_m) = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2R_B} [V_1^2 t_m^2 - \bar{V}^2 t_m^2 - 2(V_1 - \bar{V}) t_m \cdot \bar{V} t'_m]$$

$$\Delta\varphi(\hat{t}) = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2R_B} [2V_1^2 t_m \hat{t} - 2\bar{V}^2 t_m \hat{t}] \quad (16)$$

对于脉间运动对应的相位误差 $\Delta\varphi(t_m)$, 可以按照 3.1 节阐述的方法进行补偿. 脉内运动对应的相位误差 $\Delta\varphi(\hat{t})$ 是 FMCW SAR 特有的, 其对成像的影响主要体现在引入新的距离徙动残余, 即:

$$\Delta r_{cm1}(t_m, R_B) = \frac{c}{2k} \frac{2}{\lambda R_B} [V_1^2 - \bar{V}^2] t_m \quad (17)$$

当其误差较大时, 将影响成像结果, 应予以消除.

表 1 FMCW SAR 部分工作参数

雷达工作波段	Ku
距离调频率	1.2×10^{12}
场景中心距离	1000m
飞行速度	30m/s

依据表 1 中雷达参数, 以中心斜距处为例分析脉间/脉内引入相位误差的幅值大小, 得到如图 4 所示结果:

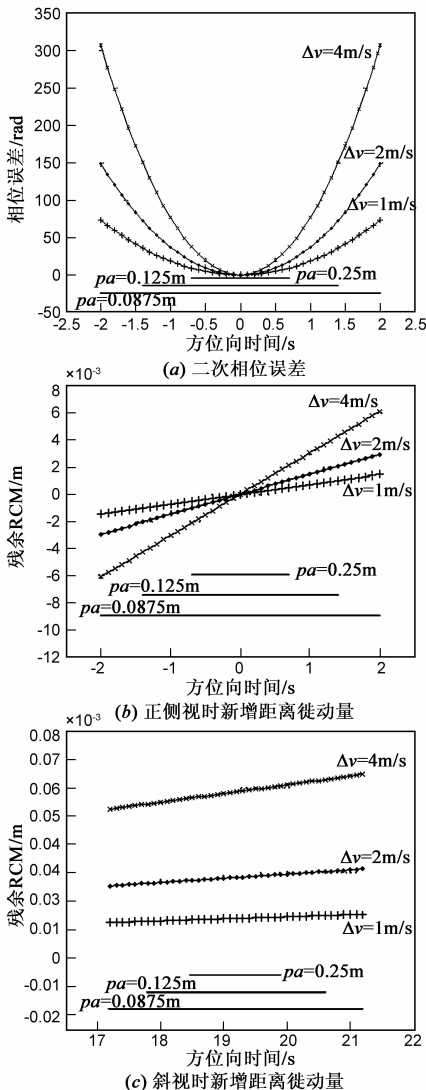


图4 前向运动误差引入的误差大小分析

图 4(a) 给出了不同速度误差情况下 $\Delta\varphi(t_m)$ 中二次相位误差随方位慢时间的变化趋势, 图中黑色粗线表明了不同方位向分辨率对应的合成孔径时间. 由图示结果可知, 前向运动误差越大, 引入的误差相位越大; 方位向分辨率越高, 对应的误差相位的最大值越大. 从误差相位的幅值上看, 已大于 $\pi/4$ 的可忽略容限^[7,8], 因而必须进行补偿. 图 4(b) 给出了不同速度误差情况下 $\Delta\varphi(\hat{t})$ 对应的新增距离徙动量的大小, 同样的, 速度误差越大, 合成孔径时间越长, 对应的误差值越大. 图 4(c) 给出了斜视角为 30° 情况下, 新增距离徙动量随方位时间的变化趋势. 图示结果表明, 新增距离徙动量的数值会随斜视角的增加而增大.

$\Delta\varphi(\hat{t})$ 对成像的影响较小, 但仍有必要分析相应的补偿方法. $\Delta\varphi(\hat{t})$ 的精确补偿要比 $\Delta\varphi(t_m)$ 复杂的多, 这是因为其数值上表现为二维空变矩阵, 因此不能对场景中每一距离线作相应的精确补偿. 近似的处理为, 以场景中心线处对应的相位误差对整个场景进行运动补偿, 具体为:

$$\Delta\varphi_c(\hat{t}) = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2R_c} [2V_1^2 t_m \hat{t} - 2\bar{V}^2 t_m \hat{t}] \quad (18)$$

这一近似处理产生的误差为:

$$\Delta\varphi_e(\hat{t}) = |\Delta\varphi(t) - \Delta\varphi'(\hat{t})| \quad (19)$$

$\Delta\varphi_e(\hat{t})$ 对 FMCW SAR 成像的影响为产生距离徙动校正误差, 但通常远小于距离分辨单元, 可以忽略.

4 沿 LOS 方向的运动补偿方法

本小节分析适用于 FMCW SAR 的沿 LOS 方向的运动补偿方法, 此处可不考虑前向运动误差的影响, 忽略微小量 $\exp(j \frac{4\pi k}{c} \xi_{t_m} \cdot \hat{t}^2)$ 及 $\exp(j \frac{4\pi k \Delta r^2(t_m, R_B)}{c^2})$, 式(8) 可以表示为:

$$s_1(\hat{t}, t_m) = w_r[\hat{t} - \frac{2R(t)}{c}] w_a[t_m] \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_0(t, R_B)) \cdot \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r(t_m, R_B)) \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \xi_{t_m} \cdot \hat{t}) \cdot \exp(-j \frac{4\pi k}{c} \hat{t} \cdot R_0(t, R_B)) \cdot \exp(j \frac{4\pi k}{c} \hat{t} \cdot \Delta r(t_m, R_B)) \cdot \exp(j \frac{4\pi k R_0^2(t_m, R_B)}{c^2}) \cdot \exp(j \frac{8\pi k R_0(t_m, R_B)}{c^2} \cdot \Delta r(t_m, R_B)) \quad (20)$$

式中 $R_0(t, R_B) = \sqrt{(Vt - X_n)^2 + R_B^2}$, $R_0(t_m, R_B) = \sqrt{(Vt_m - X_n)^2 + R_B^2}$.

4.1 脉内连续运动的影响

对式(20)进行近似处理, 可以得到^[9]:

$$s_1(\hat{t}, t_m) \approx \{ w_r[\hat{t}] w_a[t_m] \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_1(t, R_B)) \cdot \exp(-j \frac{4\pi k}{c} \hat{t} \cdot R_1(t, R_B)) \cdot \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r(t_m, R_B)) \cdot \exp(j \frac{4\pi k}{c} \hat{t} \Delta r(t_m, R_B)) \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \xi_m^c \cdot \hat{t}) \} \otimes \exp(-j \pi k \hat{t}^2) \quad (21)$$

式(21)中大括号外的卷积项表示因 Dechirp 接收方式引入的包络斜置以及 RVP 项,在成像处理中将被消除.式(21)中因 LOS 方向斜距误差引入的误差项为:

$$H_{\text{los}} = \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r(t_m, R_B)) \exp(j \frac{4\pi k}{c} \hat{t} \Delta r(t_m, R_B)) \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \xi_m^c \cdot \hat{t}) \quad (22)$$

式中前两项是由 FMCW SAR 脉间运动引入的,其中最后一项是由 FMCWSAR 脉内运动引入的,利用传统的脉冲体制 SAR 的运动补偿技术仅可以将式(22)中的前两项补偿,因而无法适用于 FMCW SAR.具体地, $\exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \xi_m^c \cdot \hat{t})$ 的完整表达为:

$$H_\xi = \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \xi_m^c \cdot \hat{t}) = \exp\{j \frac{4\pi}{\lambda} [V_y(t_m) \sin\beta + V_z(t_m) \cos\beta] \cdot \hat{t}\} \quad (23)$$

H_ξ 是快时间的一次项函数,对成像的影响表现为引入距离徙动误差,结合 FMCW SAR 的成像原理^[1]式(23)引入的距离徙动量为:

$$\Delta \text{rcm}_2 = \frac{c}{2k} \cdot \frac{2}{\lambda} [V_y(t_m) \sin\beta + V_z(t_m) \cos\beta] \quad (24)$$

式中, c 表示光速, k 表示距离向信号的调频率.观察式(23), $V_y(t_m)$ 及 $V_z(t_m)$ 是沿方位时域的空变量, β 是沿距离向的空变量.因而式(24)是一个二维空变量.这对运动补偿带来了挑战.所幸的是,可以近似地用场景中心线处对应的新增距离徙动量 $\Delta \text{Rcm}(t_m, R_c)$ 对整个场景进行补偿.

$$\Delta \text{Rcm}(t_m, R_c) = \frac{c}{2k} \cdot \frac{2}{\lambda} [V_y(t_m) \sin\beta_c + V_z(t_m) \cos\beta_c] \quad (25)$$

β_c 表示场景中心线处对应的俯视角.

运动补偿处理往往需要同成像处理相结合,对于 LOS 方向运动补偿,可结合文献[4]提出的两步补偿法.但对于不同的成像算法,LOS 方向补偿因子有所不同.

4.2 基于 RD 成像算法的 LOS 方向运动补偿方法

由文献[7]得知, RD 算法首先进行 Deskew 处理消除了式(21)中大括号外的卷积项,此时的信号形式为:

$$s_2(\hat{t}, t_m) = w_r[\hat{t}] w_a[t_m] \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_0(t, R_B))$$

$$\cdot \exp(-j \frac{4\pi k}{c} \hat{t} \cdot R_0(t, R_B)) \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r(t_m, R_B)) \cdot \exp(j \frac{4\pi k}{c} \hat{t} \Delta r(t_m, R_B)) \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \xi_m^c \cdot \hat{t}) \quad (26)$$

结合文献[4]提出的二阶补偿处理方法,可以得到一阶补偿因子为:

$$H_{\text{mc1}} = \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_c(t_m, R_c)) \cdot \exp(-j \frac{4\pi k}{c} \hat{t} \Delta r_c(t_m, R_c)) \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} \xi_m^c \cdot \hat{t}) \quad (27)$$

式中, $\Delta r_c(t_m, R_c)$ 表示场景中心处 R_c 对应的 LOS 方向斜距误差,称为距离非空变误差. ξ_m^c 表示场景中心处对应的脉内运动量,具体为 $\xi_m^c = V_y(t_m) \sin\beta_c + V_z(t_m) \cos\beta_c$.待完成一阶补偿后,回波形式变为:

$$s'_2(\hat{t}, t_m) = w_r[\hat{t}] w_a[t_m] \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_0(t, R_B)) \cdot \exp(-j \frac{4\pi k}{c} \hat{t} \cdot R_0(t, R_B)) \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_v(t_m, R_B)) \quad (28)$$

式中 $\Delta r_v(t_m, R_B)$ 表示不同距离线 R_B 处斜距误差与场景中心处斜距误差的差值,称为距离空变误差,具体为 $\Delta r_v(t_m, R_B) = \Delta r(t_m, R_B) - \Delta r_c(t_m, R_c)$.利用高波段窄带系统近似条件^[7,8],待完成 FMCW SAR 精确的距离徙动校正后(消除了载机脉内运动的影响),变回至方位时域,回波形式为:

$$s''_2(\hat{t}, t_m) = w_r[\hat{t}] w_a[t_m] \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_0(t_m, R_B)) \cdot \exp(-j \frac{4\pi k}{c} \hat{t} \cdot R_B) \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_v(t_m, R_B)) \quad (29)$$

相应地可以得到二阶补偿因子为:

$$H_{\text{mc2}} = \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_v(t_m, R_B)) \quad (30)$$

待完成二阶补偿后,通过方位向脉压,即可得到精确的成二维成像结果^[10].

4.3 基于 FS 算法的 LOS 方向运动补偿方法

FS 算法同 RD 算法的处理流程不同. FS 算法利用式(21)中大括号外的卷积项实现了频率尺度变标,因而不能首先进行 Deskew 处理.针对式(20),得到因 LOS 方向斜距误差引入的误差项包括:

$$H_{\text{error}} = \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r(t_m, R_B)) \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \xi_m^c \cdot \hat{t}) \cdot \exp(j \frac{4\pi k}{c} \hat{t} \cdot \Delta r(t_m, R_B)) \exp(j \frac{8\pi k R_0(t_m, R_B)}{c^2} \cdot \Delta r(t_m, R_B)) \exp(j \frac{4\pi k \Delta r^2(t_m, R_B)}{c^2}) \quad (31)$$

类似与 3.2 节,设定一阶补偿因子为:

$$H_{\text{mc1}} = \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_c(t_m, R_B)) \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \xi_m^c \cdot \hat{t})$$

$$\begin{aligned} & \cdot \exp(j \frac{4\pi k \hat{t} \cdot \Delta r_c(t_m, R_B)}{c}) \exp(j \frac{8\pi k R_0(t_m, R_B)}{c^2}) \\ & \cdot \Delta r_c(t_m, R_B) \exp(j \frac{4\pi k \Delta r_c^2(t_m, R_B)}{c^2}) \end{aligned} \quad (32)$$

一阶补偿后, 可以认为包络误差已精确校正, 此时雷达回波形式可以表示为:

$$\begin{aligned} s_3(\hat{t}, t_m) = & w_r[\hat{t} - \frac{2R(t)}{c}] w_a[t_m] \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_0(t, R_B)) \\ & \cdot \exp(-j \frac{4\pi k \hat{t} \cdot R_0(t, R_B)}{c}) \\ & \cdot \exp(j \frac{4\pi k R_0^2(t_m, R_B)}{c^2}) \\ & \cdot \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_v(t_m, R_B)) \\ & \cdot \exp(j \frac{8\pi k R_0(t_m, R_B)}{c^2} \cdot \Delta r_v(t_m, R_B)) \\ & \cdot \exp(j \frac{4\pi k (\Delta r^2(t_m, R_B) - \Delta r_c^2(t_m, R_B))}{c^2}) \end{aligned} \quad (33)$$

相比于理想 FMCW SAR 成像, 式(33)中因斜距误差引入的相位误差残余可以罗列为:

$$\begin{aligned} H_r(t_m) = & \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_v(t_m, R_B)) \\ & \cdot \exp(j \frac{8\pi k R_0(t_m, R_B)}{c^2} \cdot \Delta r_v(t_m, R_B)) \\ & \cdot \exp(j \frac{4\pi k (\Delta r^2(t_m, R_B) - \Delta r_c^2(t_m, R_B))}{c^2}) \end{aligned} \quad (34)$$

结合式(33)和(34), 可以将式(33)简化为(化简过程类似式(21)):

$$\begin{aligned} s_3'(\hat{t}, t_m) = & \{ w_r[\hat{t}] w_a[t_m] \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_0(t, R_B)) \\ & \cdot \exp(-j \frac{4\pi k \hat{t} \cdot R_0(t, R_B)}{c}) \cdot H_r(t_m) \} \otimes \exp(-j\pi k \hat{t}^2) \end{aligned} \quad (35)$$

对于式(35)进行方位向傅里叶变换, 并进行频率尺度变换, $H_r(t_m)$ 是关于斜距误差的函数, 不具有显示表达, 可利用 $\Omega(f_a) = F_{t_m \rightarrow f_a} \{ H_r(t_m) \}$ 表示 $H_r(t_m)$ 的傅里叶变换结果.

令 $G\{\hat{t}, f_a\}$ 表示理想 FMCW SAR 的距离时域-方位向多普勒频谱, 则对式(35)进行方位向傅里叶变换的结果为:

$$s_3''(\hat{t}, f_a) = \{ w_r[\hat{t}] G(\hat{t}, f_a) \otimes \Omega(f_a) \} \otimes \exp(-j\pi k \hat{t}^2) \quad (36)$$

对式(36)进行频率尺度变换, 得到:

$$\begin{aligned} s_3'''(\hat{t}, f_a) = & \{ w_r[\beta \hat{t}] \cdot [G(\beta \hat{t}, f_a) \exp(j\pi(\beta - \beta^2) k \hat{t}^2)] \\ & \cdot \otimes \Omega(f_a) \} \otimes \exp(-j\pi \beta k \hat{t}^2) \end{aligned} \quad (37)$$

消除 RVP 项后并变换至距离向时域, 得到:

$$s_3'''(\hat{t}, t_m) = w_r[\beta \hat{t}] \cdot [G(\beta \hat{t}, f_a) \exp(j\pi(\beta - \beta^2) k \hat{t}^2)] \otimes \Omega(f_a) \quad (38)$$

逆频率尺度变换后, 得到:

$$s_4(\hat{t}, t_m) = w_r[\beta \hat{t}] \cdot G(\beta \hat{t}, f_a) \otimes \Omega(f_a) \quad (39)$$

利用高波段窄波束近似条件, 待二次距离压缩项及距离徙动校正后, 变换至距离压缩域-方位时域, 可以得到:

$$\begin{aligned} s_4'(\hat{t}, t_m) = & \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_0(t_m, R_B)) \\ & \cdot \exp(-j \frac{4\pi k \hat{t} \cdot R_B}{c}) \cdot H_r(t_m) \end{aligned} \quad (40)$$

此时可以得到二阶补偿因子:

$$\begin{aligned} H_{mc2} = & \text{conj} \{ H_r(t_m) \} \\ = & \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_v(t_m, R_B)) \\ & \cdot \exp(-j \frac{8\pi k R(t)}{c^2} \cdot \Delta r_v(t_m, R_B)) \\ & \cdot \exp(-j \frac{4\pi k (\Delta r^2(t_m, R_B) - \Delta r_c^2(t_m, R_c))}{c^2}) \end{aligned} \quad (41)$$

对比式(27)与式(32), 式(30)与式(41), 可知将运动补偿处理与不同的成像算法结合过程中, 运补补偿因子有所不同.

5 完整的运动补偿处理流程

本文第三节, 第四节分别分析了前向运动误差及 LOS 方向运动误差的校正方法, 在此基础上可以得到高波段 FMCW SAR 完整的运动补偿流程:

图 5 给出了高波段 FMCW SAR 运动补偿处理流程, 适用于 RD 及 FS 成像算法, 图中运动参数获取部分可以通过 GPS 等高精度测量设备获取, 也可通过对回波数据的处理估计得到; 距离向进行徙动校正时可采用前向平均速度进行处理或者进行方位向子孔径划分并沿子孔径进行距离徙动校正. 对于高波段雷达系统, 采用前向平均速度进行 RCMC 通常满足成像精度要求^[5,11].

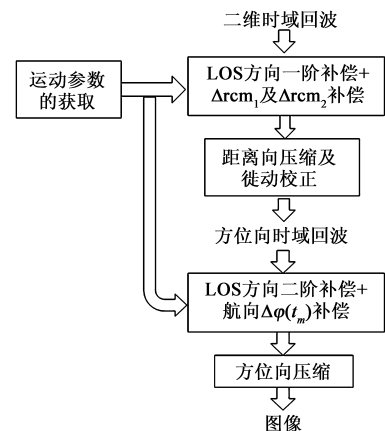


图5 FMCW SAR运动补偿处理流程

基于图 5 处理流程,我们对实测 FMCW SAR 数据进行二维成像及运动补偿,得到如下 SAR 图像。

图 6 显示了实测 FMCW SAR 数据的二维成像结果,该图像空间分辨率为 $0.25\text{m} \times 0.25\text{m}$,场景大小 $300\text{m} \times 400\text{m}$ 。图像对应区域为某一收割后的农田。由图可见,田野中道路、河流、田垄、稻茬等聚焦良好,特征清晰。表明了本文所提处理流程的正确性。

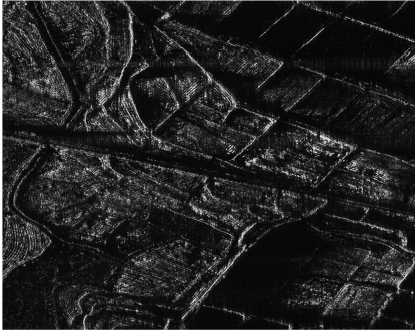


图6 Ku波段实测数据的成像结果

6 结论

本文以实现 FMCW SAR 高分辨成像处理为出发点,分析了适用于 FMCW SAR 的运动补偿处理方案。首先建立了非理想情况下 FMCW SAR 的成像几何及信号模型,并以此为基础分析了 FMCW SAR 同脉冲体制 SAR 在运动补偿处理中的不同点;提出了完整的三维误差补偿流程,分别从沿航向与 LOS 方向两个方面详细完整地阐述了 FMCW SAR 运动补偿处理流程;实测 FMCW SAR 数据验证了本文所提方法的正确性。

参考文献

- [1] Adriano META, Peter Hoogeboom, Leo P L. Signal processing for FMCW SAR [J]. IEEE Trans on GRS, 2007, 45(11): 3519 - 3532.
- [2] Robert Wang, Otmar Loffeld, Holger Nies, et al. Focus FMCW SAR data using the wave number domain algorithm [J]. IEEE Trans on GRS, 2010, 48(4): 2109 - 2118.
- [3] DeWit J J M, Meta A, P Hoogeboom. Modified range-doppler processing for FMCW synthetic aperture radar [J]. IEEE GRS Letters, 2006, 3(1): 83 - 87.
- [4] FORNARO G Trajectory Deviations in Airborne SAR: Analysis and Compensation [J]. IEEE Trans on AES, 1999, 35(3): 997 - 1009.

- [5] 黄源宝, 保铮, 周峰. 一种新的机载条带式 SAR 沿航向运动补偿方法 [J]. 电子学报, 2005, 33(3): 459 - 462.
HUANG Yuan-bao, BAO Zheng, ZHOU feng. A novel method for along-track motion compensation of the airborne strip-map SAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 459 - 462. (in Chinese)
- [6] 彭岁阳, 张军, 沈振康. 非匀速弹道 SAR 成像方法研究 [J]. 宇航学报, 2011, 32(12): 2550 - 2559.
PENG Sui-yang, ZHANG Jun, SHEN Zhen-kang. The SAR imaging method of the non-uniform straight line trajectory [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(12): 2550 - 2559. (in Chinese)
- [7] 保铮, 刑孟道, 王彤. 雷达成像技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 24 - 30.
- [8] 安道祥. 高分辨率 SAR 成像处理技术研究 [D]. 湖南长沙: 国防科技大学, 2011.
An Daoxiang. Study on the imaging techniques for high resolution SAR systems [D]. Changsha, Hunan: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [9] Josef Mittermayer, Alberto Moreira. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm [J]. IEEE Trans on GRS, 1999, 37(5): 2198 - 2214
- [10] Evan C Zaugg, David G Long. Theory and application of motion compensation for LFM-CW SAR [J]. IEEE Trans on GRS, 2008, 46(10): 2990 - 2998.
- [11] 周峰, 邢孟道, 保铮. 一种无人机机载 SAR 运动补偿的方法 [J]. 电子学报, 2006, 34(6): 1002 - 1007.
ZHOU feng, XING Meng-dao, Bao Zheng. A method of motion compensation for unmanned aerial vehicles borne SAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 1002 - 1007. (in Chinese)

作者简介



贾高伟 男, 1989 年出生, 博士研究生, 研究方向为高分辨 SAR 成像, 运动补偿算法与实现. E-mail: jiagaoweinudt@gmail.com

常文革 男, 1965 年出生, 教授, 博士生导师, 研究方向包括超宽带雷达成像与处理, 实时信号处理, 被动干涉 SAR 等. E-mail: changwenge@nudt.edu.cn