

调频连续波 SAR 实时成像算法研究

贾高伟* 常文革

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 调频连续波(Frequency Modulation Continuous Wave, FMCW)体制与合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的结合,推动了小型化、低功耗、低成本、高分辨率成像雷达的快速发展。该文建立了 FMCW SAR 的信号模型,统一了 FMCW SAR 频域算法的理论表达;结合运动补偿处理,以减小系统计算量为出发点,提出了一种简化的实时成像流程,并在理论上对简化过程引入的相位误差做出细致的理论与量化分析。仿真实验验证了该文所提简化流程的适用性。

关键词: 合成孔径雷达; 调频连续波; 实时成像; 距离多普勒; 频率尺度变换算法

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)10-2453-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01004

Study on the Real Time Imaging Algorithm for Frequency Modulated Continuous Wave Synthetic Aperture Radar

Jia Gao-wei Chang Wen-ge

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

Abstract: The combination of Frequency Modulation Continuous Wave (FMCW) and Synthetic Aperture Radar (SAR) leads to the rapid development of a compact, low power consumption, cheap and high resolution imaging sensor. A corrected signal model of FMCW SAR is built in this paper which forms the basis for the following study. The generalized expression of FMCW SAR algorithms in frequency domain is derived. For the sake of reduce the computation, a simplified imaging flow with motion compensation operation is proposed and the errors introduced by the simplification is analyzed in detail. Finally, the simulated FMCW SAR data verify the feasibility of proposed method.

Key words: SAR; Frequency Modulation Continuous Wave (FMCW); Real-time imaging; Range Doppler; Frequency scaling

1 引言

调频连续波合成孔径雷达(FMCW SAR)具有结构简单、功耗小、体积小等特点^[1],且获取与开发的成本较低;近年来,FMCW SAR 的出现,有效促进了小型化、低功耗、低成本、高精度成像传感器的发展与应用。

FMCW SAR 的成像过程相比于传统脉冲体制 SAR 有所不同。文献[1-4]等分别介绍了适用于 FMCW SAR 的不同的成像算法,但这些均是理想情况下的成像算法,没有考虑运动补偿^[5,6]及算法的运算效率。本文以 FMCW SAR 实时成像为出发点,分析了 FMCW SAR 信号模型与频谱,统一了频域成像算法的理论推导,并考虑存在运动误差的情况

下,对比分析各成像算法的精度与成像处理的时效性,以得出更具实际指导意义的算法处理流程。

本文的研究内容安排如下:第 2 节分析了 FMCW SAR 完整的时域回波及频谱,统一了频域成像算法的理论推导;第 3 节分析了脉冲体制 SAR 同连续波体制 SAR 的不同点,阐述了适用于 FMCW SAR 的不同成像算法;第 4 节深入分析算法的简化流程以及相应的可忽略条件;第 5 节给出了相应的结论。

2 SAR 回波信号模型

条带 FMCW SAR 的成像几何如图 1 所示。

图 1 中,载体沿与 X 轴平行的直线轨迹以速度 v 匀速飞行,飞行高度为 H , $T_n(x_n, y_n, 0)$ 为成像场景中任意目标。 $R(t)$ 表示雷达相位中心(APC)同目标 T_n 之间的瞬时斜距, t 为全时间。根据图 1 所示的几何关系,可求得瞬时斜距 $R(t)$ 为

2012-08-06 收到, 2013-05-24 改回

国家自然科学基金(61072116)资助课题

*通信作者: 贾高伟 jiagaoweimudt@gmail.com

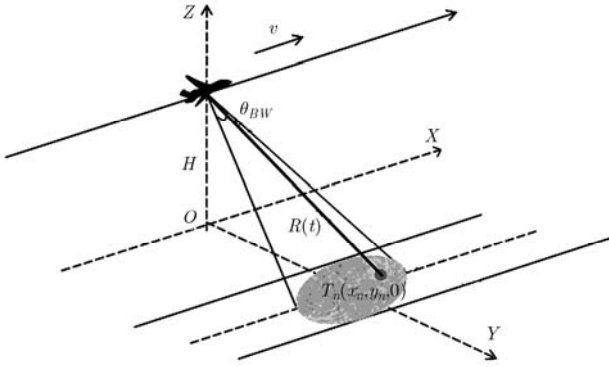


图1 SAR 成像几何示意图

$$R(t) = \sqrt{(x_n - vt)^2 + y_n^2 + H^2} = \sqrt{(x_n - vt)^2 + R_B^2} \quad (1)$$

其中 R_B 表示点目标 T_n 的零多普勒斜距, 也称为最短斜距。为简化分析过程, 可以认定 $x_n = 0$, 则式(1)可以表示为

$$R(t) = \sqrt{v^2 t^2 + R_B^2} \quad (2)$$

设雷达发射的线性调频信号(LFM)为

$$s(\hat{t}, t) = w_r[\hat{t}] \exp(j2\pi f_c t + j\pi k \hat{t}^2) \quad (3)$$

式中 \hat{t} 表示距离向快时间; $w_r[\hat{t}] = \text{rect}\left[\frac{\hat{t} + T_p/2}{T_p}\right]$ 表

示距离向窗函数, 即 \hat{t} 的取值范围为 $[0, T_p]$ 。

由式(3)可知斜距为 $R(t)$ 的点目标对应的回波信号为

$$s_r(\hat{t}, t) = w_r[\hat{t} - \tau] \exp(j2\pi f_c(t - \tau) + j\pi k(\hat{t} - \tau)^2) \quad (4)$$

式(4)中 $\tau = 2R(t)/c$, c 为光速。将回波信号同发射信号进行混频, 可以得到差频信号为

$$s(\hat{t}) = w_r[\hat{t}] w_r[\hat{t} - \tau] \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R(t)\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi k}{c} \hat{t} \cdot R(t)\right) \exp\left(j\frac{4\pi k}{c^2} R^2(t)\right) \quad (5)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} w_a[t_m] \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R(t)\right) \exp\left(-j\frac{4\pi k}{c} \hat{t} \cdot R(t)\right) \exp(-j2\pi f_a t_m) dt_m \\ = \int_{-T_{\text{sar}}/2}^{T_{\text{sar}}/2} \exp\left(-j\left(\frac{4\pi}{\lambda} + \frac{4\pi k}{c} \hat{t}\right) \sqrt{v^2(t_m + \hat{t})^2 + R_B^2}\right) \exp(-j2\pi f_a t_m) dt_m \quad (10)$$

定义中间变量 $t' = t_m + \hat{t}$, 对式(10)中相关量进行替换, 得到

$$\int_{-T_{\text{sar}}/2+\hat{t}}^{T_{\text{sar}}/2+\hat{t}} \exp\left(-j\left(\frac{4\pi}{\lambda} + \frac{4\pi k}{c} \hat{t}\right) \sqrt{v^2 t'^2 + R_B^2}\right) \exp(-j2\pi f_a t') \exp(j2\pi f_a \hat{t}) dt' \\ = w[f_a] \exp(j2\pi f_a \hat{t}) \exp\left(-j\frac{4\pi R_0}{\lambda} \sqrt{\left(1 + \frac{\lambda k}{c} \hat{t}\right)^2 - \frac{f_a^2 \lambda^2}{4v^2}}\right) \quad (11)$$

式中 $w[f_a]$ 表示多普勒频率的取值范围, 具体为 $w[f_a]: -\frac{2v}{\lambda} \left(1 + \frac{\lambda k}{c} \hat{t}\right) \sin \frac{\theta_{BW}}{2} \leq f_a \leq \frac{2v}{\lambda} \left(1 + \frac{\lambda k}{c} \hat{t}\right) \sin \frac{\theta_{BW}}{2}$ 。

忽略回波信号同发射信号在包络上的不同, 考虑 SAR 方位窗函数的影响, 可以得到 Dechirp 接收体制下 SAR 时域回波为

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

式中 t_m 表示方位向慢时间, $w_a[t_m] = \text{rect}[t_m / T_{\text{sar}}]$ 表示方位向的矩形窗函数(忽略天线波束形状的影响), T_{sar} 为点 T_n 对应的合成孔径时间。观察式(6), 距离向窗函数 $w_r[\hat{t} - \tau]$ 同 τ 有关, 即与目标斜距有关, 将使得回波包络出现斜置的情况; 式(6)中最后一项常被称之为剩余视频相位(RVP)项。它们均是由 Dechirp 接收方式引入的, 在成像过程中应予以消除。

对于式(2), 可以重写为

$$R(\hat{t}, t_m) = \sqrt{v^2(\hat{t} + t_m)^2 + R_B^2} \quad (7)$$

对式(7)在 $\hat{t} = 0$ 处进行泰勒展开, 可以得到

$$R(\hat{t}, t_m) = \sqrt{v^2(\hat{t} + t_m)^2 + R_B^2} \\ \approx \sqrt{v^2 t_m^2 + R_B^2} + \frac{v t_m}{\sqrt{v^2 t_m^2 + R_B^2}} v \hat{t} \\ = R(t_m) + \sin \theta_m \cdot v \hat{t} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6), 并经近似处理^[7], 可以得到

$$s(\hat{t}, t_m) = \left\{ w_r[\hat{t}] w_a[t_m] \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R(t)\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi k}{c} \hat{t} \cdot R(t)\right) \right\} \otimes \exp(-j\pi k \hat{t}^2) \quad (9)$$

对式(9)进行方位向傅里叶变换, 可以得到 SAR 回波的多普勒频谱, 观察式(9), 只有大括号内的因式同慢时间有关, 因而涉及到方位向傅里叶变换的因式可以单独表示为

将式(11)代入式(9), 得到了点目标完整的距离时域-方位多普勒频谱为

$$s(\hat{t}, f_a) = \left\{ w_r[\hat{t}]w[f_a] \exp(j2\pi f_a \hat{t}) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi R_B}{\lambda} \sqrt{\left(1 + \frac{\lambda k}{c} \hat{t}\right)^2 - \frac{f_a^2 \lambda^2}{4v^2}}\right) \right\} \otimes \exp(-j\pi k \hat{t}^2) \quad (12)$$

式(12)中, $\exp(j2\pi f_a \hat{t})$ 表示脉内连续运动引入的多普勒频率项, $\exp\left(-j \frac{4\pi R_B}{\lambda} \sqrt{\left(1 + \frac{\lambda k}{c} \hat{t}\right)^2 - \frac{f_a^2 \lambda^2}{4v^2}}\right)$ 表示雷达回波的 2 维耦合项, 大括号外的卷积项缘于 Dechirp 接收体制引入的包络斜置与 RVP 项。

至此, 我们得到了 Dechirp 接收体制下 FMCW SAR 回波的 2 维时域表达式和距离时域-方位多普勒域表达式。

3 FMCW SAR 的成像处理

3.1 FMCW SAR 同脉冲体制 SAR 在成像过程中的差异

由第 2 节分析得知, FMCW SAR 同脉冲体制 SAR 在信号频谱上的区别在于多了一项因脉冲内连续运动引入的多普勒频率项。为分析其对成像的影响, 可忽略式(12)大括号外的因式, 对

$$\exp\left(-j \frac{4\pi R_B}{\lambda} \sqrt{\left(1 + \frac{\lambda k}{c} \hat{t}\right)^2 - \frac{f_a^2 \lambda^2}{4v^2}}\right)$$

在 $\hat{t} = 0$ 处进行一阶泰勒展开。得到

$$s_1(\hat{t}, f_a) = w_r[\hat{t}]w[f_a] \exp\left(-\frac{4\pi R_B}{\lambda} \beta\right) \cdot \exp(j2\pi f_a \hat{t}) \exp\left(-j \frac{4\pi R_B k}{c\beta} \hat{t}\right) \quad (13)$$

对式(13)进行距离向傅里叶变换, 得到距离向脉冲压缩后的信号形式为

$$s_1(f_e, f_a) = w[f_a] \exp\left(-j \frac{4\pi R_B}{\lambda} \beta\right) \exp\left(j2\pi f_a \frac{T_p}{2}\right) \cdot T_p \text{sinc}\left[\pi T_p \left(f_e - f_a + \frac{2k}{c} \frac{R_B}{\beta}\right)\right] \quad (14)$$

式中 $\exp\left(-j \frac{4\pi R_B}{\lambda} \beta\right)$ 为方位向调制项, $\frac{R_B}{\beta}$ 表示 R_B

处的距离徙动。观察式(14)最后 $\text{sinc}[\cdot]$ 项可知: 多普勒频率项使得距离向脉冲压缩结果在理想距离徙动(RCM)的基础上新增了一个偏移量。偏移量的大小为

$$\Delta \text{RCM} = -\left(c/(2k)\right) f_a \quad (15)$$

3.2 改进的距离徙动算法(RMA)

对于式(12), 首先消除大括号外的卷积项, 这一操作通常称为 Deskew 处理^[7]。

Deskew 之后的信号形式变为

$$s_3(\hat{t}, f_a) = w_r[\hat{t}]w[f_a] \exp(j2\pi f_a \hat{t}) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi R_B}{\lambda} \sqrt{\left(1 + \frac{\lambda k}{c} \hat{t}\right)^2 - \frac{f_a^2 \lambda^2}{4v^2}}\right) \quad (16)$$

此时选择某固定斜距作为参考斜距, 构造距离时域-方位多普勒域的匹配函数为

$$H_{mf} = \exp(-j2\pi f_a \hat{t}) \cdot \exp\left(j \frac{4\pi R_{\text{ref}}}{\lambda} \sqrt{\left(1 + \frac{\lambda k}{c} \hat{t}\right)^2 - \frac{f_a^2 \lambda^2}{4v^2}}\right) \quad (17)$$

其中 R_{ref} 为参考斜距。将式(16)同式(17)相乘, 得到匹配滤波后的回波频谱, 通常称这一过程为一致聚焦处理。由此得到的一致聚焦残余为

$$s_4(\hat{t}, f_a) = w_r[\hat{t}]w[f_a] \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi(R_B - R_{\text{ref}})}{\lambda} \sqrt{\left(1 + \frac{\lambda k}{c} \hat{t}\right)^2 - \frac{f_a^2 \lambda^2}{4v^2}}\right) \quad (18)$$

定义 Stolt 插值的变量替换为

$$\frac{\lambda k \hat{t}}{c} + 1 = \sqrt{\left(1 + \frac{\lambda k}{c} \hat{t}\right)^2 - \frac{f_a^2 \lambda^2}{4v^2}} \quad (19)$$

式中 i 为 Stolt 插值过程中的新的变量。Stolt 插值后, 距离向作傅里叶变换, 方位向作逆傅里叶变换, 即可得到聚焦的 SAR 图像。在 RMA 成像处理中, 连续波体制 SAR 与脉冲体制 SAR 的区别在于一致匹配函数的不同。具体地, 在脉冲体制下, 忽略了式(17)中的第 1 个指数项。

3.3 改进的距离多普勒(RD)算法与频率尺度变换(FS)算法

对式(12)中大括号内第 2 个指数项因子在 $\hat{t} = 0$ 处进行泰勒展开, 可以得到

$$-\frac{4\pi R_B}{\lambda} \sqrt{\left(1 + \frac{\lambda k}{c} \hat{t}\right)^2 - \frac{f_a^2 \lambda^2}{4v^2}} = -\frac{4\pi R_B}{\lambda} \beta - \frac{4\pi R_B k}{c\beta} \hat{t} + \text{src}(f_a, \hat{t}) + O(\hat{t}^4) \quad (20)$$

式中 $\beta = \sqrt{1 - \frac{f_a^2 \lambda^2}{4v^2}}$ 。将式(13)代入式(12), 得到

$$s_5(\hat{t}, f_a) = \left\{ w_r[\hat{t}]w[f_a] \exp(j2\pi f_a \hat{t}) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi R_B}{\lambda} \beta\right) \exp\left(-j \frac{4\pi R_B k}{c\beta} \hat{t}\right) \cdot \exp(\text{src}(f_a, \hat{t})) \exp(O(\hat{t}^4)) \right\} \otimes \exp(-j\pi k \hat{t}^2) \quad (21)$$

式(21)中, $\exp(j2\pi f_a \hat{t})$ 为多普勒频率项; $\exp[-(j4\pi R_B / \lambda)\beta]$ 表示方位向调制; $\exp[-j4\pi R_B k / (c\beta) \cdot \hat{t}]$ 代表 R_B 处理理想情况下的距离徙动; $\exp(\text{src}(f_a, \hat{t}))$ 表示二次距离压缩项; $\exp(O(\hat{t})^4)$ 表示高次项, 通常对雷达成像影响较小。

FS 算法相比于 RD 算法具有更高的成像精度, 这是由于 FS 算法考虑了距离-方位耦合的一阶项和二阶项, 即距离徙动项 $\exp\left[-\frac{j4\pi R_B k}{c\beta} \cdot \hat{t}\right]$ 和二次距离压缩项 $\exp(\text{src}(f_a, \hat{t}))$ 。而 RD 算法仅考虑了距离-方位耦合的一阶项, 即距离徙动项 $\exp\left[-\frac{j4\pi R_B k}{c\beta} \cdot \hat{t}\right]$ 。改进的 FS 算法和 RD 算法需要在距离时域-方位多普勒域完成多普勒频率项的补偿, 待补偿完成后, 处理流程即退化为脉冲体制 SAR。

4 FMCW SAR 成像算法的选择

在适用于 FMCW SAR 的诸多成像算法中, 改进的 RMA 算法^[8]和时域相关算法计算量很大, 同时难以结合运动补偿处理。改进的 RD 算法和改进的 FS 算法是频域算法, 易于同运动补偿算法相结合, 因而成为 FMCW SAR 实时成像处理的优选。

在实时成像过程中, 运动补偿处理是必要步骤。图 2(a)以 RD 算法为例, 给出了包含运动补偿处理的 FMCW SAR 成像流程, 图 2(b)给出了简化后的处理流程。

对比图 2(a)和图 2(b), 简化的改进 RD 算法忽略了 Deskew 处理、并将二阶补偿放在距离徙动校正及多普勒频率项校正之前进行, 此时的距离徙动校正(RCMC)及多普勒频率项的校正可以通过硬件器件的地址移位或者频域因子补偿来完成。这些近似处理引入的新的误差在表现形式上同传统脉冲体制 SAR 有所不同, 有必要详细分析。

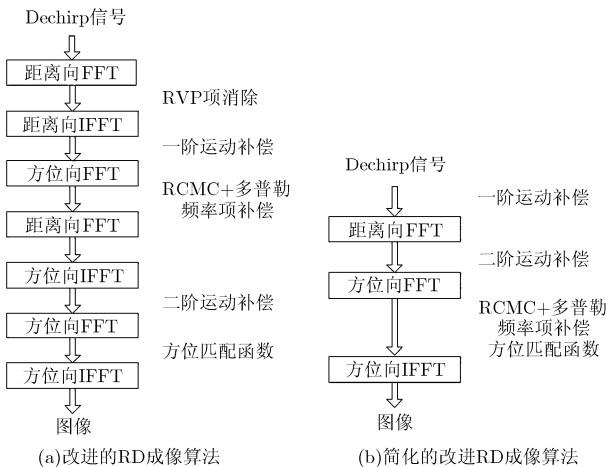


图 2 基于 RD/FS 算法的 LOS 方向运动补偿处理流程

4.1 Deskew 处理过程的忽略

Deskew 处理的目的在于消除因 Dechirp 接收方式造成的包括斜置与 RVP 项。对于式(6), 直接进行距离向傅里叶变换即得到距离向脉冲压缩结果, 可以表示为

$$s(f_c, t_m) = w_a[t_m] \cdot T_p \cdot \text{sinc}\left[\pi T_p \left(f_c + \frac{2k}{c} \cdot R(t)\right)\right] \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t)\right] \exp\left[-j \frac{4\pi k}{c^2} R^2(t)\right] \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} R(t)\right] \quad (22)$$

式中最后两个指数项即为 Dechirp 处理引入的相位误差, 对于式(22), 可以认为 $f_c = (-2k/c)R(t)$ 。由此可以得知因 Dechirp 接收方式引入的相位误差为

$$H_d = \exp\left[-j \frac{4\pi k}{c^2} R^2(t)\right] \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} R(t)\right] = \exp\left[j \frac{4\pi k}{c^2} R^2(t)\right] \approx \exp\left[j \frac{4\pi k}{c^2} R^2(t_m)\right] \quad (23)$$

式(23)中最后的近似缘于脉冲内连续运动对 H_d 的影响微小, 可以忽略(将式(8)代入式(22)即可得证)。 H_d 对距离向脉冲压缩并不产生影响, 但对于方位向处理将带来相位误差。对于 FMCW SAR, 距离徙动量在方位多普勒域可以用图 3 所示的示意图描述。

图 3 给出了正侧视情况下 FMCW SAR 的距离徙动曲线, 如图中圆点线所示, 长划线表示脉冲体制下的距离徙动曲线, 其中实线表示多普勒频率项引入的线性偏移。对于脉冲体制 SAR, 其对应的距离徙动最大值为

$$\Delta \text{RCM}_{\max} = R_B \left[\sec\left(\frac{\theta_{BW}}{2}\right) - 1 \right] \quad (24)$$

FMCW SAR 对应的最大距离徙动值为

$$\Delta \text{RCM}'_{\max} = R_B \left[\sec\left(\frac{\theta_{BW}}{2}\right) - 1 \right] + \frac{c}{2k} \cdot \frac{B_a}{2} \quad (25)$$

式中 B_a 表示 FMCW SAR 的方位向多普勒带宽。

对于 SAR 而言, 常数相位对方位向成像没有影响, Dechirp 处理引入的相位变化量为

$$\Delta h_d = \exp\left[j \frac{4\pi k}{c^2} \left[\left(R_B + \Delta \text{RCM}'_{\max} \right)^2 - R_B^2 \right] \right] \quad (26)$$

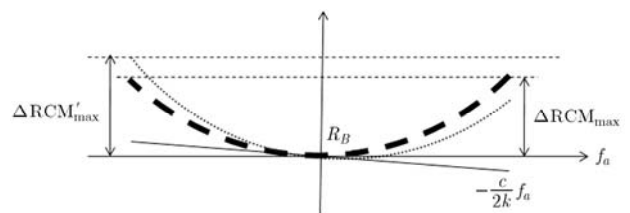


图 3 正侧视情况下 FMCW SAR 的距离徙动示意图

若 RVP 项引入的相位变化量对成像的影响可以忽略, 则要求 $\Delta h_i < \exp(j\pi/4)$ 。由此对应的可忽略条件为

$$\frac{4\pi k}{c^2} \left[(R_B + \Delta RCM'_{\max})^2 - R_B^2 \right] < \frac{\pi}{4} \quad (27)$$

设 FMCW 方位向分辨率为 ρ_a , 则 $\theta_{BW} \approx \lambda/2/\rho_a$, $B_a = v/\rho_a$, 代入式(26), 可得一个包含方位向分辨率、最短斜距、距离向调频率和载机速度的综合式:

$$\left(R_B + \frac{\lambda^2 R_B}{32\rho_a^2} + \frac{cv}{2k\rho_a} \right)^2 - R_B^2 < \frac{c^2}{16k} \quad (28)$$

当 FMCW SAR 的作用距离及载机航速确定后, 可以通过式(28)计算满足忽略 RVP 项条件。

4.2 二次补偿在 RCMC 及多普勒频率校正之前完成

若将 LOS 方向的二次补偿放在 RCMC 及多普勒频率校正之前完成, 将引入相位误差。设 $\Delta r_v(R_B)$ 表示最短斜距 R_B 处对应的二次斜距误差。则二次补偿放在 RCMC 及多普勒频率校正之前的条件为

$$\left| \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_v(R_B) - \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_v(R(f_e, R_B)) \right| < \frac{\pi}{4} \quad (29)$$

式中 $R(f_e, R_B)$ 是距离徙动在方位时域中表示。二次相位补偿是在距离脉冲压缩-方位时域进行处理的, 因而此处的分析应当在方位时域进行。将式(8)代入式(6), 进行距离向傅里叶变换, 略去微小项, 可得到距离徙动量为

$$R(f_e, R_B) \approx \sqrt{v^2 t_m^2 + R_B^2} + \frac{cv^2}{k\lambda R_B} t_m \quad (30)$$

式(30)表明, 连续波体制下方位时域的距离徙动可以看作是在脉冲体制下距离徙动的基础上增加了一个同慢时间近似线性相关的偏移量。

类似于图 3, 距离徙动在方位时域的变化可以用图 4 所示的示意图描述。

图 4 中圆点线表示脉冲体制下距离徙动随方位时间的变化曲线, 分段线表示连续波体制下距离徙动随方位时间的变化曲线。实线表示脉内连续运动引入的线性偏移。图 3 和图 4 分别表示了距离徙动量在方位多普勒域和方位时域的变化曲线, 结合方

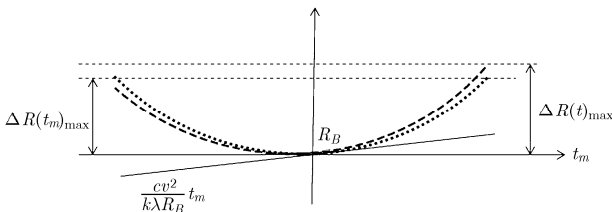


图 4 正侧视情况下 FMCW SAR 的距离徙动随方位时域变化示意图

向信号的时频对应性, 有等式(31)和式(32)成立。

$$\Delta R(t_m)_{\max} = \Delta RCM_{\max} = R_B \left[\sec\left(\frac{\theta_{BW}}{2}\right) - 1 \right] \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \Delta R(t)_{\max} &= \Delta RCM'_{\max} \\ &= R_B \left[\sec\left(\frac{\theta_{BW}}{2}\right) - 1 \right] + \frac{c}{2k} \cdot \frac{B_a}{2} \end{aligned} \quad (32)$$

式(31), 式(32)表明了方位向的傅里叶变换不改变距离徙动的最大值, 结合式(29), 得知二次补偿放在 RCMC 及多普勒频率校正前引入的相位误差的可忽略条件为

$$\left| \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_v(R_B) - \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_v(R_B + \Delta R(t)_{\max}) \right| < \frac{\pi}{4} \quad (33)$$

式(33)是一个涉及到 LOS 方向运动误差大小、最短斜距、距离向调频率和多普勒带宽的综合表达式, 也可以做类似与式(28)的处理, 将方位向分辨率替换至其中。针对具体的 FMCW SAR 运动状态, 若式(33)式成立, 则可以采取图 2(b)所示简化处理流程。这将大大减小 FMCW SAR 实时成像处理的计算量。

5 FMCW SAR 成像结果分析

结合上文内容, 本节将仿真 FMCW SAR 回波数据并进行成像处理。首先设定 FMCW SAR 的系统参数如表 1 所示。

表 1 FMCW SAR 雷达参数

载频波段	Ku
信号带宽	600 MHz
中心斜距	1000 m
脉冲周期	0.5 ms
载机速度	30 m/s
测绘带宽	200 m

设定 Y 向运动误差为幅度 4 m, 周期为 6 s 的正弦波, Z 向运动误差为幅度 5 m, 周期 6 s 的余弦波, 依照图 2(b)的处理流程, 可以得到图 5 所示的成像结果。

图 5 给出了简化 RD 算法的成像结果, 得到了分辨率为 $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$ 的多点目标成像结果, 观察图 5(d)和图 5(g)中方位向剖面图可知, 测绘带边缘处点目标方位向成像结果中第 1 旁瓣略有不对称, 这主要是距离徙动残余影响的结果, 其对成像质量的影响很小, 可以不予考虑。

结合本小节的仿真结果, 可知在适当的分辨率

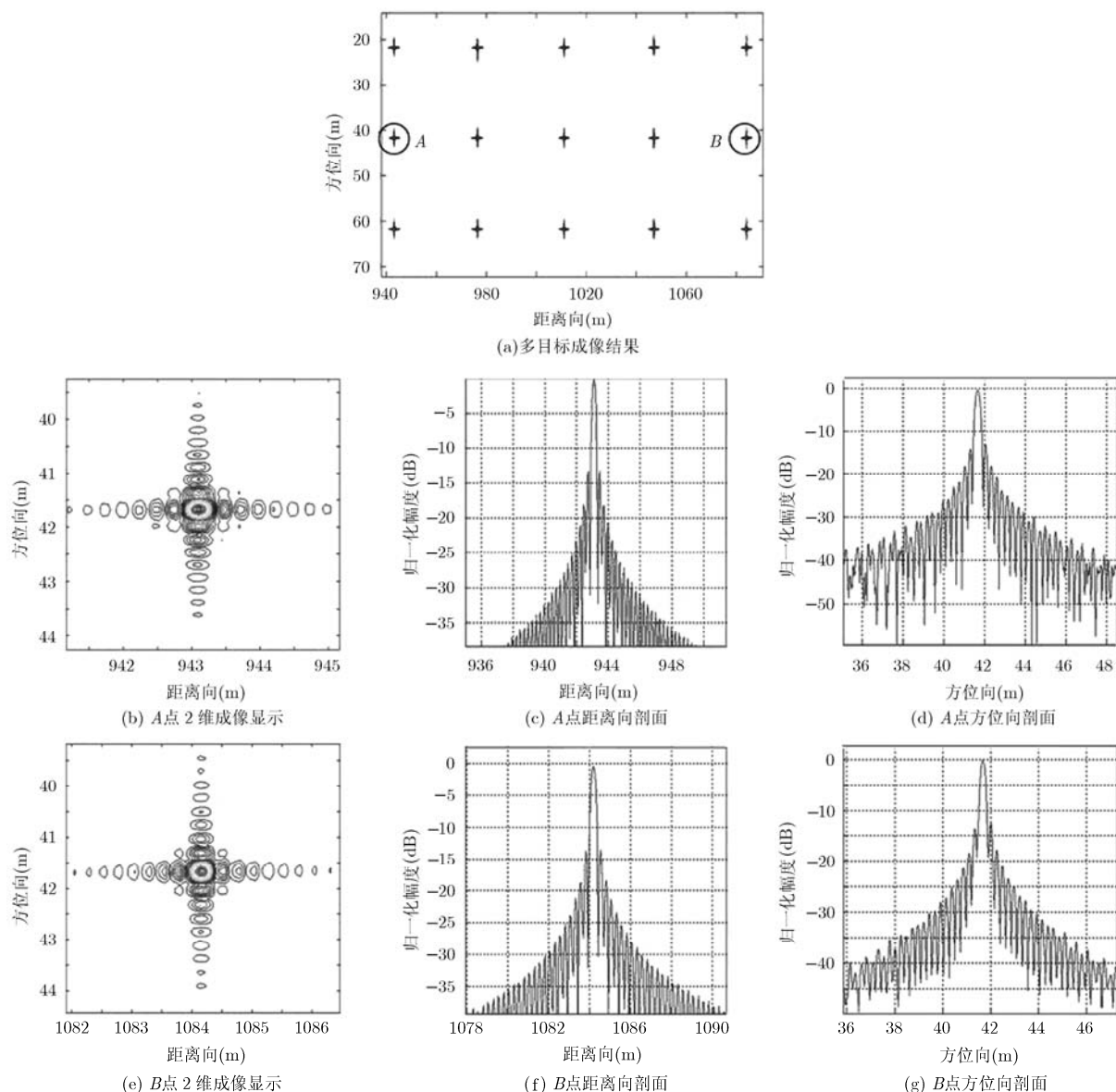


图5 简化RD算法成像结果

及成像场景下, 简化RD算法可以以最小的计算量得到精确的成像结果, 有利于FMCW SAR的实时成像处理。

6 结论

本文从小型化、低功耗、低成本、高分辨率雷达成像系统的应用需求出发, 深入分析了FMCW SAR的结构特点以及信号模型, 给出了FMCW SAR的信号时域模型及对应的频谱分析, 统一了FMCW SAR频域处理算法推导过程; 文中结合运动补偿处理, 以减小系统计算量为目的, 提出了简化的适合FMCW SAR的RD处理流程, 并对简化过程引入的相位误差做出细致的定量分析。得到了具有更具实际指导意义的适用于FMCW SAR实时

成像的处理流程。

参考文献

- [1] Ribalta A. Time-domain reconstruction algorithms for FMCW-SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(3): 396-400.
- [2] Wang R, Loffeld O, Nies H, et al. Focus FMCW SAR data using the wavenumber domain algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2109-2118.
- [3] Meta A, Hoogeboom P, and Leo P L. Signal processing for FMCW SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3519-3532.
- [4] DeWit J J M, Meta A, and Hoogeboom P. Modified range-Doppler processing for FMCW synthetic aperture

- radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(1): 83-87.
- [5] Fornaro G. Trajectory deviations in airborne SAR: analysis and compensation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 997-1009.
- [6] Jia Gao-wei, Chang Wen-ge, Li Xiang-yang, *et al.*. A brief analysis of the motion compensation for FMCW SAR[C]. The Fifth International Conference on Advances in Satellite and Space Communications, Venice, 2013: 51-56.
- [7] Mittermayer J and Moreira A. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198-2214.
- [8] 肖忠源, 徐华平, 李春升. 弹载斜视 SAR 成像的改进波数域算法[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(6): 1453-1458.
- Xiao Zhong-yuan, Xu Hua-ping, and Li Chun-sheng. A modified wave-number domain algorithm for missile-borne squinted SAR data processing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1453-1458.
- 贾高伟: 男, 1989 年生, 博士生, 研究方向为高分辨 SAR 成像、运动补偿算法与实现.
- 常文革: 男, 1965 年生, 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.