

调频连续波 SAR 信号分析与成像研究

梁毅 王虹现 邢孟道 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘要: 针对调频连续波 SAR 与脉冲式 SAR 工作体制的不同, 从而带来不同的回波表现形式, 该文对调频连续波 SAR 回波信号进行了建模, 分析了信号的特征, 揭示了平台的连续运动在距离向产生一个多普勒频移的特性, 将去斜接收体制固有的残余视频相位分离成卷积的形式, 并在频域完成补偿, 给出了适宜于连续波 SAR 成像处理的改进频率变标算法, 相对于原有的频率变标算法, 几乎没有增加额外的运算量。最后通过点目标仿真验证了该文分析的正确性和所提算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 调频连续波(FMCW); 频率变标算法; 残余视频相位

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)05-1017-05

The Analysis of FMCW SAR Signal and Image Study

Liang Yi Wang Hong-xian Xing Meng-dao Bao Zheng

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

Abstract: Based on the difference of work mechanism between Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Synthetic Aperture Radar (SAR) and Pulse Synthetic Aperture Radar, which leads to different form of received signal, this paper establishes the model of FMCW SAR echo, analyzes its characteristics, and reveals the Doppler frequency shift effect in range direction induced by the continuous motion while radar transmitting and receiving signal. The Residual Video Phase (RVP), inherent to Dechirp-on-receive system, is represented in the form of convolution and compensated for in the frequency domain. Also Modified Frequency Scaling Algorithm is presented. Compared to the conventional method, it almost adds no additional computation load. Finally, point target simulation validates the correctness and the effectiveness of the presented method.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW); FSA; Residual Video Phase (RVP)

1 引言

调频连续波(FMCW)技术与合成孔径雷达(SAR)技术的结合, 促使了重量轻、成本低、功耗低的高分辨成像雷达的诞生^[1], 使其易于安装在小型无人机上, 甚至于航模飞机。由于接收端采用了 Dechirp 接收体制, 回波信号与参考信号进行混频, 产生了较小的差频带宽, 从而降低对视频接收通道、后端 A/D 采集设备和信号处理速度的要求。常规的合成孔径雷达以脉冲方式工作, 发射峰值功率较高, 作用距离较远, 而带来的问题就是整个系统对发射系统, 馈线系统要求较高, 系统重量、功耗、成本较高, 对适装平台的要求也较高。调频连续波合成孔径雷达顾名思义, 它在一个脉冲重复间隔内连续发射信号, 这样就不需要很高的峰值功率, 用较低功率的固态放大器就可以满足要求, 较低的发射功率也使其具有隐蔽性好的特点, 而低成本的特点也决定了其在民用市场具有用武之地, 总之调频连续波 SAR 有着诸多的优

点, 对其研究也将越来越深入、广泛。

与传统的脉冲式 SAR 不同, 调频连续波 SAR 有其特殊性。脉冲式 SAR 基于“stop-and-go”模型近似, 即认为雷达是“一步一停”的工作方式, 这是由于发射信号的脉冲宽度很小, 发射过程中目标与雷达平台的相对距离近似没有发生变化, 而调频连续波 SAR 是雷达一直在发射脉冲, 采用收、发天线分离的体制, 较长的扫频时间决定了在发射信号的过程中目标与雷达平台之间的距离是变化的, 雷达平台的连续运动带来的影响是在距离向产生多普勒频移^[2], 这个多普勒频移会使目标的回波包络产生移动, 影响图像的聚焦, 应该予以补偿。

本文对 Dechirp 接收体制的调频连续波信号进行了建模, 由于采用了去斜接收方式, 就不可避免地存在残余视频相位(RVP), 文献[3]中提到 RVP 项可以忽略或可以被消除, 但没有给出详细的说明, 本文通过对回波差频信号的分析, 将 RVP 项分离成一个卷积的形式, 最后在频域完成补偿。下面将从信号模型出发, 给出调频连续波 SAR 回波信号的表现形式, 通过数学公式推导, 将回波信号表示成“包络去斜”处理项和“包络置斜”处理项的卷积形式。针对调频连

2007-04-16 收到, 2007-11-27 改回

国家自然科学基金(60502044)和教育部重点项目(20051009)资助课题

续波 SAR 回波信号的特点, 在频率变标时引入一个距离快时间的一次项即可完成多普勒频移的校正, 与传统的频率变标算法相比几乎没有增加额外的运算量。最后通过点目标仿真验证了本模型的正确性。

2 调频连续波(FMCW)信号描述

调频连续波雷达发射、接收信号频率关系如图 1 所示。图 1 为差频信号, 从图中可知, 发射频率随时间按线性锯齿变化, 目标回波为发射波形的复制波, 双程回波延迟 $\tau = 2R/c$, 其中 R 为目标距离, c 为光速, Δf 为扫频带宽, PRI 为重复周期, 即扫频时间。

对于静态目标, 接收信号和发射信号的瞬时频差为一个与距离成正比的单频信号, 差频信号含有距离信息。

$$f_b = \frac{\Delta f}{\text{PRI}} \frac{2R}{c} \quad (1)$$

当目标相对于雷达有径向运动速度时, 其接收信号频率将沿频率轴上移或下移, 此时差频信号含有距离信息和速度信息。

需要说明的是, 为实现对雷达信号的数字处理, 对调频连续波雷达的数据采样的起始与终止是以发射信号扫频周期为周期的, 为避免在起始段信号频率的跳跃变化, 信号的采样延迟了一段时间, 延迟时间的长短取决于目标回波的最大延时^[4]。

3 调频连续波 SAR 信号模型分析

如图 2 所示 SAR 成像几何关系, 雷达工作在正侧视条带式模式, 载机飞行高度为 h , 平台运动速度为 v , 天线方向波束宽度为 β , 场景中心线至航线的垂直距离 $R_s = \sqrt{h^2 + y^2}$ 。

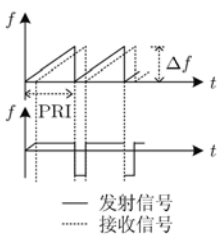


图 1 FMCW 系统中发射/接收信号频率变化图

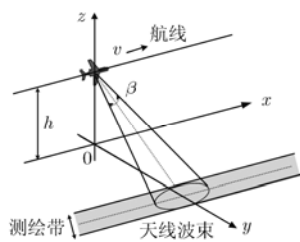


图 2 SAR 成像几何关系

假设雷达发射调频连续波信号, 在接收端经解线频调处理后的差频输出可以表示为^[5]

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{Arect} \left[\frac{\hat{t} - 2R'(\hat{t}, t_m)/c}{T_p} \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R'(\hat{t}, t_m) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} \gamma (R'(\hat{t}, t_m) - R_{\text{ref}}) \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right] \cdot \exp \left[j \frac{4\pi\gamma}{c^2} (R'(\hat{t}, t_m) - R_{\text{ref}})^2 \right] \quad (2)$$

其中 \hat{t} 为距离快时间, t_m 为方位慢时间, γ 为距离向调频率,

T_p 为脉冲宽度, $R'(\hat{t}, t_m)$ 为目标相距雷达的瞬时斜距(对于调频连续波 SAR, 其瞬时斜距是一个与快时间有关的量), R_{ref} 为参考距离。在连续波 SAR 中, T_p 等于脉冲重复间隔 (PRI)。式(2)中第 1 个指数项为方位向的相位历程, 第 2 个指数项为距离向信号, 第 3 个指数项为 RVP 项(残余视频相位), 会对方位向的聚焦造成影响。方位慢时间 t_m 的取值范围为 $-T_a/2 \leq t_m \leq T_a/2$, T_a 为合成孔径的时间。以下的分析中忽略幅度的影响, 而只考虑相位信息, 场景中心点的瞬时斜距

$$R'(\hat{t}, t_m) = \sqrt{R_B^2 + v^2(\hat{t} + t_m)^2} \quad (3)$$

其中 R_B 为雷达波束中心线扫过目标时的最近斜距, 与脉冲式 SAR(瞬时斜距忽略距离快时间的影响)不同, 调频连续波 SAR 瞬时斜距的计算要考虑距离快时间的影响, $R'(\hat{t}, t_m)$ 在 $\hat{t} = 0$ 处的泰勒展开近似为

$$R'(\hat{t}, t_m) \approx \sqrt{R_B^2 + v^2 t_m^2} + \frac{v^2 t_m}{\sqrt{R_B^2 + v^2 t_m^2}} \hat{t} \quad (4)$$

令 $R(t_m) = \sqrt{R_B^2 + v^2 t_m^2}$, 则 $R' \approx R + (v^2 t_m / R) \hat{t}$, 由雷达平台的连续运动引入的多普勒频移(距离向)

$$f_d = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR'(\hat{t}, t_m)}{d\hat{t}} = -\frac{2}{\lambda} \frac{v^2 t_m}{\sqrt{R_B^2 + v^2 t_m^2}} = \frac{2}{\lambda} v \sin \theta = f_a \quad (5)$$

此时, $R'(\hat{t}, t_m) \approx R(t_m) - f_a \hat{t} \lambda / 2$, 其中 f_a 为方位向的多普勒频率, 这是由雷达平台在发射和接收脉冲的过程中存在连续运动引入的, 对于脉冲式 SAR, 由于脉冲宽度很小, 采用的是传统的基于“stop-and-go”的模型近似, 瞬时斜距与距离快时间没有关系, 不会有这个多普勒频移。多普勒频移的存在将会产生回波包络时移, 影响图像的聚焦, 一般需要补偿多普勒频移项。

当线性调频信号脉冲宽度较宽时, γ 相对较小, 由快时间引入的距离变化是很小的, 式(2)中的数值 $(4\pi\gamma/c^2) \cdot (R'(\hat{t}, t_m) - R_{\text{ref}})^2$ 可以近似用 $(4\pi\gamma/c^2)(R - R_{\text{ref}})^2$ 代替。另外, 尽管雷达平台在发射信号和接收信号的过程中是运动的, 在实际系统参数下, 对一个扫频周期, 由距离变化引起的频率变化是可以忽略的^[2], 此时式(2)变为

$$s(\hat{t}, t_m; R_B) = \text{Arect} \left[\frac{\hat{t} - 2R/c}{T_p} \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{v^2 t_m}{R} \hat{t} \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} \gamma (R - R_{\text{ref}}) \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right] \cdot \exp \left[j \frac{4\pi\gamma}{c^2} (R - R_{\text{ref}})^2 \right] \quad (6)$$

其中第 2 个指数项为由雷达平台连续运动引入的, 即由速度引入的多普勒频移对应的相位项。暂不考虑包络的影响, 将式(6)变到距离频率域, 即作 $\hat{t} \rightarrow f_r$ 的傅里叶变换, 得

$$s(f_r, t_m; R_B) = A \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R \right] \exp \left[-j \frac{4\pi\gamma}{c^2} (R - R_{\text{ref}})^2 \right] \cdot \exp \left[-j \frac{8\pi v^2 t_m}{\lambda c} \right] \exp \left[-j \frac{4\pi R}{c} f_r \right] T_p \cdot \text{sinc} \left[\pi T_p \left(f_r + \frac{2\gamma}{c} (R - R_{\text{ref}}) + \frac{2v^2 t_m}{\lambda R} \right) \right] \quad (7)$$

为了后续的推导, 引进4个额外的指数项

$$s(f_r, t_m; R_B) = A \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R\right] \exp\left[-j\frac{4\pi\gamma}{c^2}(R - R_{\text{ref}})^2\right] \cdot \exp\left[-j\frac{8\pi v^2 t_m}{\lambda c}\right] \exp\left[-j\frac{4\pi R}{c}f_r\right] \exp\left[j\frac{4\pi R_{\text{ref}}}{c}f_r\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi R_{\text{ref}}}{c}f_r\right] \exp\left[j\frac{\pi}{\gamma}f_r^2\right] \exp\left[-j\frac{\pi}{\gamma}f_r^2\right] T_p \cdot \text{sinc}\left[\pi T_p\left(f_r + \frac{2\gamma}{c}(R - R_{\text{ref}}) + \frac{2v^2 t_m}{\lambda R}\right)\right] \quad (8)$$

作变量代换, 令 $F = f_r + (2\gamma/c)(R - R_{\text{ref}}) + [2v^2 t_m/(\lambda R)]$, 将式(8)变换到距离时间域, 即作 $f_r \rightarrow \hat{t}$ 的逆傅里叶变换, 得

$$s(\hat{t}, t_m; R_B) = A \left\{ \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R\right] \exp\left[-j\frac{4\pi\gamma}{c}(R - R_{\text{ref}})\hat{t}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi v^2 t_m}{\lambda R}\hat{t}\right] \exp\left[j\frac{8\pi\gamma}{c^2}R_{\text{ref}}(R - R_{\text{ref}})\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi v^4 t_m^2}{\gamma\lambda^2 R^2}\right] \exp\left[-j\frac{8\pi v^2 t_m(R - R_{\text{ref}})}{\lambda c R}\right] T_p \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \text{sinc}[\pi T_p F] \exp\left[-j\frac{\pi}{\gamma}F^2\right] \exp\left[j2\pi F\right] \cdot \left[\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} + \frac{2v^2 t_m}{\gamma\lambda R}\right] dF \right\} \otimes \exp\left[-j\pi\gamma\hat{t}^2\right] \quad (9)$$

上式中对积分有贡献的积分范围为 $-1/T_p < F < 1/T_p$, 并且 $\exp[-(j\pi/\gamma)T_p^2] \approx 1$, 这是由于 γT_p^2 为 SAR 距离维的时宽、带宽积, 一般为 10^5 的量级, 所以上式近似成立。此时式(9)变为

$$s(\hat{t}, t_m; R_B) = A \left\{ \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R\right] \exp\left[-j\frac{4\pi\gamma}{c}(R - R_{\text{ref}})\hat{t}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi v^2 t_m}{\lambda R}\hat{t}\right] \exp\left[j\frac{8\pi\gamma}{c^2}R_{\text{ref}}(R - R_{\text{ref}})\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi v^4 t_m^2}{\gamma\lambda^2 R^2}\right] \exp\left[-j\frac{8\pi v^2 t_m(R - R_{\text{ref}})}{\lambda c R}\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - 2R_{\text{ref}}/c + 2v^2 t_m/(\gamma\lambda R)}{T_p}\right] \right\} \otimes \exp\left[-j\pi\gamma\hat{t}^2\right] \quad (10)$$

另外在实际系统中, 由于 $\gamma\lambda^2 R^2 \gg 4\pi v^4 t_m^2$, $\lambda c R \gg 8\pi v^2 t_m(R - R_{\text{ref}})$, 有

$$\exp\left[-j\frac{4\pi v^4 t_m^2}{\gamma\lambda^2 R^2}\right] \approx 1, \quad \exp\left[-j\frac{8\pi v^2 t_m(R - R_{\text{ref}})}{\lambda c R}\right] \approx 1 \quad (11)$$

式(10)可以进一步化简为

$$s(\hat{t}, t_m; R_B) = A \left\{ \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R\right] \exp\left[-j\frac{4\pi\gamma}{c}(R - R_{\text{ref}})\hat{t}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi v^2 t_m}{\lambda R}\hat{t}\right] \exp\left[j\frac{8\pi\gamma}{c^2}R_{\text{ref}}(R - R_{\text{ref}})\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - 2R_{\text{ref}}/c + 2v^2 t_m/(\gamma\lambda R)}{T_p}\right] \right\} \otimes \exp\left[-j\pi\gamma\hat{t}^2\right] \quad (12)$$

此时对于卷积符号前的部分, 不同场景处的目标, 包络中心位置相同, 只是存在一个由于平台在发射和接收信号过程中连续运动引入的多普勒频移项对应的位移, 卷积符号后的部

分相当于“包络置斜”项, 残余视频相位的校正就是消除掉这个“包络置斜”项。由于距离 Dechirp 像是在距离频域, 式(12)中距离快时间的一次项系数反映目标的位置, 均以参考距离为基准, 可以看出, 由于距离、方位的耦合, 距离徙动是一个随方位时间变化的量, 需要在距离多普勒域完成校正。以上公式推导将 RVP 项的影响转化为一个卷积的形式, 这样对齐校正也就变得容易。

对于式(12), 利用驻相原理, 变到方位多普勒域, 得

$$s(\hat{t}, f_a; R_B) = A \left\{ \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - 2R_{\text{ref}}/c + 2v^2 t_m/(\gamma\lambda R)}{T_p}\right] \cdot \exp\left[j\frac{4\pi\gamma}{c}R_{\text{ref}}\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \exp\left[j2\pi f_a \hat{t}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi R_B}{\lambda} \sqrt{\left[1 + \frac{\gamma\lambda}{c}\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right]^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2}\right] \right\} \otimes \exp\left[-j\pi\gamma\hat{t}^2\right] \quad (13)$$

需要说明的是, 式(12)的变换中忽略了高次相位对驻相点的影响。由于高次相位总是缓变的, 对驻相点不敏感, 具体操作时高次相位不参加驻相点的计算, 只是将求出的驻相点直接代入高次相位的表达式。

忽略包络的影响, 对上式根号下的项在 $\hat{t} = 2R_{\text{ref}}/c$ 附近作泰勒级数展开, 近似到三次项, 得

$$s(\hat{t}, f_a; R_B) = A \left\{ \exp\left[-j\frac{4\pi R_B \beta(f_a)}{\lambda}\right] \exp\left(j2\pi f_a \hat{t}\right) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi\gamma}{c}\left(\frac{R_B}{\beta(f_a)} - R_{\text{ref}}\right)\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \cdot \text{src}\left[\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}, f_a; R_B\right] \right\} \otimes \exp\left[-j\pi\gamma\hat{t}^2\right] \quad (14)$$

其中第1个指数项为方位向相位历程, 决定方位向的聚焦, 第2个指数项为多普勒频移项对应的相位, 由于是距离快时间的一次项, 将会造成目标回波包络的移动, 进而影响聚焦效果, 第3个指数项是距离向调制信号, $\beta(f_a)$ 为尺度因子, 从上式可以看出, 距离单元徙动与 $\beta(f_a)$ 有关, 即距离单元徙动是多普勒频率 f_a 的函数, 相当于距离、方位之间存在耦合, f_a 的取值范围为 $-\text{PRF}/2 + f_{\text{dc}} \leq f_a \leq \text{PRF}/2 + f_{\text{dc}}$, 其中 f_{dc} 为多普勒中心频率。src($\hat{t} - 2R_{\text{ref}}/c, f_a; R_B$) 为二次距离压缩项, 其表达式为

$$\text{src}\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}, f_a; R_B\right) = \exp\left[-j\frac{2\pi R_B \gamma^2 \lambda (\beta^2 - 1)}{c^2 \beta^3}\right] \cdot \left[\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right]^2 + j\frac{2\pi R_B \gamma^3 \lambda^2 (\beta^2 - 1)}{c^3 \beta^5} \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)^3 \quad (15)$$

尺度因子 $\beta(f_a) = \sqrt{1 - \frac{f_a^2 \lambda^2}{4v^2}}$ 。

4 调频连续波 SAR 成像处理算法

分析式(14), 由 $\exp(j2\pi f_a \hat{t})$ 引起的位移可以统一补偿, 暂不考虑其对位移的影响, 上式中距离徙动差为

$$\Delta R_{\text{RCM}} = \frac{R_B}{\beta(f_a)} - R_{\text{ref}} - R_B \quad (16)$$

即以参考距离为基准的距离徙动差, 此时距离徙动差不仅与最近斜距 R_B 有关, 还和多普勒频率 f_a 有关, 变标处理就是要对不同 f_a 的距离徙动差的尺度因子归一化^[5]。主要分3步进行:

第1步 对距离快时间进行因子为 $\beta(f_a)$ 的尺度变换, 此时距离徙动差变为

$$\Delta R_{\text{RCM}} = R_B - \beta(f_a)R_{\text{ref}} - R_B = \beta(f_a)R_{\text{ref}} \quad (17)$$

距离徙动差的尺度因子 $1/\beta(f_a)$ 被归一化后, 等效参考距离变成 $\beta(f_a)R_{\text{ref}}$, 此时距离徙动差只是多普勒频率 f_a 的函数, 不同距离的目标距离徙动差相同。

第2步 进行残余视频相位的校正, 即对式(14)解卷积, 消除掉式中的“包络置斜”处理项。

第3步 逆频率变标, 经过第1步处理虽然完成了频率变标, 但引入了一个二次相位, 逆频率变标即是消除这个二次相位误差。

4.1 成像处理步骤——改进的频率变标算法^[6]

(1)多普勒频移校正及距离徙动空变性的校正(频率变标)

在距离时域、方位频域乘以相位函数 $H_{\text{FS}}(\hat{t}, f_a)$, 即可消除多普勒频移项和完成频率变标。

$$H_{\text{FS}}(\hat{t}, f_a) = \exp\left[-j2\pi f_a \hat{t} + j\pi\gamma \hat{t}^2(1 - \beta(f_a))\right] \quad (18)$$

其中第1项为校正多普勒频移的相位项, 在脉冲式 SAR 中没有这一项, 第2项为通常的频率变标相位项。

(2)残余视频相位的校正 经过第1步处理后的信号变换到距离频率域, 乘以相位函数 $H_{\text{RVP}}(f_r, f_a)$ 完成残余视频相位的校正。

$$H_{\text{RVP}}(f_r, f_a) = \exp\left[-j\frac{\pi f_r^2}{\gamma\beta(f_a)}\right] \quad (19)$$

(3)逆频率变标 在距离时域、方位频域乘以参考函数 $H_{\text{IFS}}(\hat{t}, f_a)$ 完成逆频率变标。

$$H_{\text{IFS}}(\hat{t}, f_a) = \exp\left[j\pi\gamma \hat{t}^2(\beta(f_a)^2 - \beta(f_a))\right] \quad (20)$$

(4)二次距离压缩 进行二次距离压缩的参考函数为

$$\begin{aligned} H_{\text{SRC}}(\hat{t}, f_a; R_B) &= \text{sinc}\left(\beta\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}, f_a; R_B\right)^* \\ &= \exp\left[+j\frac{2\pi R_B \gamma^2 \lambda (\beta^2 - 1)}{c^2 \beta^3} \left(\beta\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)^2\right. \\ &\quad \left.- j\frac{2\pi R_B \gamma^3 \lambda^2 (\beta^2 - 1)}{c^3 \beta^5} \left(\beta\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)^3\right] \quad (21) \end{aligned}$$

二次距离压缩的参考函数是随距离空变的, 为简化计算, 当 SAR 正侧视工作时, 可以用场景中心斜距 R_s 代替式中的 R_B , 相当于对场景中心的点完全聚焦^[5]。

(5)距离徙动校正 距离徙动校正相位函数为

$$H_{\text{BV}}(\hat{t}, f_a) = \exp\left[j\frac{4\pi\gamma}{c} R_{\text{ref}} \left(\frac{1}{\beta} - 1\right) \left(\beta\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \quad (22)$$

将二次距离脉压、距离徙动校正后的数据变到二维频率域, 乘以相位保持函数

$$H_{\text{RPC}}(f_r, f_a) = \exp\left[j\frac{4\pi R_{\text{ref}}}{c} \frac{f_r}{\beta}\right] \quad (23)$$

完成距离向的处理, 对于 Dechirp 数据, 将距离徙动校正后的数据变换到距离频率域等效的即完成了距离脉压。

(6)方位脉压 完成距离压缩后, 点目标在距离多普勒域的信号形式为

$$\begin{aligned} s\left(\frac{f_r}{\beta}, f_a; R_B\right) &= C \exp\left[-j\frac{4\pi R_B \beta}{\lambda}\right] \\ &\cdot \text{sinc}\left[\pi \frac{T_p}{\beta} \left(f_r + \frac{2\gamma}{c}(R_B - R_{\text{ref}})\right)\right] \quad (24) \end{aligned}$$

方位向匹配函数为

$$H_{\text{AZC}}(f_a; R_B) = \exp\left[j\frac{4\pi R_B \beta}{\lambda}\right] \quad (25)$$

方位压缩首先乘以匹配函数 $H_{\text{AZC}}(f_a; R_B)$, 然后作方位向的逆傅里叶变换, 变换到方位时域, 从而得到聚焦的图像。压缩后的信号为

$$\begin{aligned} s(f_r, t_m; R_B) &= C \text{sinc}\left[\pi \frac{T_p}{\beta} \left(f_r + \frac{2\gamma}{c}(R_B - R_{\text{ref}})\right)\right] \\ &\cdot \text{sinc}(\pi \Delta f_a t_m) \quad (26) \end{aligned}$$

其中 Δf_a 为方位向多普勒带宽。

5 仿真结果与分析

为了验证本文分析的正确性, 仿真了25个点目标, 表1给出了点目标仿真的系统参数。图3是25个点目标的成像结果, 其中图3(a)为设置的点目标, 25个点目标分别位于圆心、内圆和外圆上, 半径为3m, 6m; 图3(b)为成像结果, 可以看出, 本文算法对不同距离的点目标无论是距离向还是方位向都能很好地聚焦。图3(c)、3(d)是单个点目标在多普勒频移补偿与不补偿时空间响应曲线的对比, 横坐标为方位时间, 纵坐标为距离, 其中图3(c)为不补偿的情况, 图3(d)为补偿时的情况, 如果不补偿多普勒频移, 则会出现越距离单元徙动, 进而影响图像的聚焦效果。图3(e)、3(f)是单个点目标成像结果的剖面图, 可以发现, 距离向的峰值旁瓣比和方位向的峰值旁瓣比都接近理论值。绘图时采用了16倍的插值, 使图像看起来更为平滑。

6 结束语

本文对 Dechirp 接收体制的调频连续波 SAR 信号进行

表1 系统仿真参数

载频	35GHz	场景中心距离	700m
发射信号带宽	500MHz	天线方位向 波束宽度	2°
脉冲重复间隔 (PRI)	1 ms	测绘带宽	150m
载机速度	120m/s	系统采样频率	5MHz

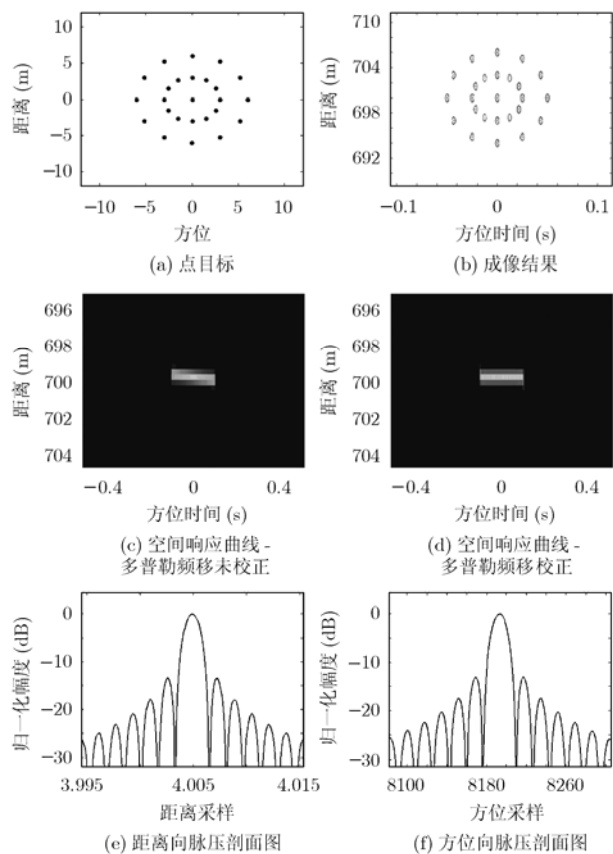


图3 点目标仿真结果

了建模。与脉冲式 SAR 不同, 调频连续波 SAR 由于雷达平台在发射信号的过程中是连续运动的, 这样会在距离向产生多普勒频移, 从而使目标的回波包络产生时移, 影响图像的聚焦, 本文在频率变标的同时校正这个多普勒频移。另外, 由于采用了去斜接收方式, 就不可避免的存在残余视频相位 (RVP), 本文考虑了 RVP 的影响, 将其分离成一个卷积的形式, 在距离频率域完成补偿。最后点目标的仿真验证了本文分析的正确性。需要说明的是, 对于多普勒频移的校正, 是

通过引入一个距离快时间的一次项在频率变标时完成的, 与传统的频率变标算法相比几乎没有增加额外的运算量。

参考文献

- [1] Meta A and Hooeboom P. Development of signal processing algorithms for high resolution airborne millimeter wave FMCW SAR. Rroc. IEEE Int. Radar Conf. '05, Arlington, U.S.A, 2005: 326-331.
- [2] de Wit J J M, Meta A, and Hooeboom P. Modified range-Doppler processing for FM-CW synthetic aperture radar. *IEEE Geosci. Remote Sensing Letters*, 2006, 3(1): 83-87.
- [3] Meta A and Hooeboom P. Signal processing algorithms for FMCW moving target indicator synthetic aperture radar. Proc. IGARSS'05, Seoul, Korea, 2005: 316-319.
- [4] 张军, 毛二可. 线性调频连续波SAR成像处理研究. *现代雷达*, 2005, 27(4): 42-45.
Zhang Jun and Mao Er-ke. A study on LFM-CW signal processing. *Modern Radar*, 2005, 27(4): 42-45.
- [5] 保铮, 邢孟道, 王彤编著. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 24-25.
- [6] Mittermayer J, Moreira A, and Loffeld O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm. *IEEE Trans. on Geosc. Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198-2214.

梁毅: 男, 1981年生, 博士生, 从事雷达信号处理、SAR实时成像等方面的研究工作。

王虹现: 男, 1979年生, 博士生, 主要研究方向为雷达成像及其实时处理。

邢孟道: 男, 1975年生, 博士生导师, 教授, 研究方向主要为雷达成像和目标识别。

保铮: 男, 1927年生, 博士生导师, 教授, 中国科学院院士, 主要研究领域为雷达信号处理。