

基于精确二维频谱的调频连续波 SAR 动目标特性分析

罗运华^{*①②} 宋红军^① 王宇^① 郑世超^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100039)

摘要: 传统的调频连续波(FMCW)SAR 运动目标特性的分析方法大都在时域展开, 导致其对目标的特性研究存在近似或者不全面。基于此, 该文提出一种基于精确 2 维频谱模型的 FMCW SAR 动目标特性分析方法。该方法充分考虑了天线平台及运动目标在脉冲收发期间运动的影响, 推导了解析的 FMCW SAR 运动目标斜距模型, 进而求解了非停-走模型下的运动目标的 2 维频谱模型。基于该模型该文系统地分析了动目标的成像特性, 精确定量地研究了动目标 2 维速度的影响。相对于传统时域分析方法, 该方法更加精确全面而且有着更好的适应性。仿真实验验证该文分析中结论的合理性和有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 调频连续波; 动目标; 2 维频谱

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)08-1834-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01498

Characteristics Analysis of Moving Target in Frequency-modulation Continuous-wave SAR Based on An Accurate 2-D Spectrum

Luo Yun-hua^{①②} Song Hong-jun^① Wang Yu^① Zheng Shi-chao^{①②}

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^②(*University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: The conventional characteristics analysis methods for moving target in Frequency Modulation Continuous Wave (FMCW) SAR all carry out in space-domain, leading to approximated and partial results. Therefore, a novel analysis approach based on an accurate two-dimensional spectrum is proposed in the paper. The approach takes accurately the continuous movements of antenna and moving targets during pulse transmission and reception into account and derives an analytical slant range model for moving targets in FMCW SAR, as well as an accurate two-dimensional spectrum. Based on the spectrum, the characteristics of moving target are discussed in detail, including the effects caused by 2-D velocities of moving target. Compared with its counterparts, it is more accurate and robust. Simulation experiments verify the reasonableness and effectiveness of the proposed method.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Frequency Modulation Continuous Wave (FMCW); Moving target; 2-D spectrum

1 引言

调频连续波(FMCW)SAR 采用双天线收发, 通过发射连续的脉冲信号, 降低系统的峰值发射功率; 而在接收端采用 Dechirp 的接收方式, 极大地降低了接收数据的带宽, 从而简化系统设备和体积, 降低了成本, 因此在近几年来得到了迅速的发展^[1,2]。同时由于设备成本和使用成本很低, FMCW SAR 除了在传统的军用领域外, 在民用方面也有着十分广泛的应用前景。然而, 目前国内外针对 FMCW

SAR 的研究主要集中在成像领域^[3,4], 而作为 SAR 重要应用之一的动目标识别(GMTI)在 FMCW SAR 中的研究较少^[5-7]。FMCW SAR 可以利用三角波产生正负调频的信号实现单通道动目标检测, 使其在检测高速目标的时候相对脉冲 SAR 更具有优势; 同时由于更大的脉宽, 其对低速运动目标的检测也有着更好的灵敏性^[5]。因此开展对 FMCW SAR 中动目标的特性研究具有重要意义。

在 FMCW SAR 中, 由于发射脉冲的连续性, 天线平台以及地面目标在脉冲发射和接收期间的运动, 将会对目标的成像特性造成影响, 这种脉内运动主要体现在斜距模型上和 2 维频谱模型上, 在成像和运动目标特性分析时不可忽略。然而, 传统的

2012-11-20 收到, 2013-03-07 改回

中国科学院百人计划及国家自然科学基金面上项目(61172122)资助课题

*通信作者: 罗运华 csuluoyunhua@163.com

FMCW SAR 运动目标特性分析方法大都采用近似的斜距展开模型在时域展开研究, 导致分析的结果不全面和缺乏准确性。如文献[5]采用了一阶泰勒展开的近似斜距模型对 FMCW SAR 动目标距离向速度影响进行了分析; 文献[6,7]在方位时域对动目标的回波模型、运动参数估计、成像和残留视频相位(RVP)进行了近似研究。这种斜距近似导致在对 FMCW SAR 运动目标的特性分析时缺乏准确性, 特别是在高分辨率短程 SAR 和大斜视的情况下将导致较大误差。同时基于时域的分析方法忽略了距离方位耦合项的影响, 导致分析结果往往偏离实际值。因此, 本文在前人 FMCW SAR 研究的基础上^[3]提出了一种基于精确 2 维频谱的 FMCW SAR 动目标特性分析方法。该方法基于一个解析的 FMCW SAR 动目标斜距模型, 推导了 FMCW SAR 中动目标精确的 2 维参考谱, 然后通过对 2 维频谱的展开来定量分析 FMCW SAR 中动目标的特性。相对于传统方法, 该方法有着更高的精度同时可以更好地适应大斜视下和高分辨率情形下的动目标特性分析。

本文的结构安排如下, 首先介绍了传统的 FMCW SAR 动目标特性分析方法, 然后从 FMCW SAR 的解析斜距模型出发, 推导出精确的 FMCW SAR 动目标 2 维频谱模型; 接着基于 2 维频谱来分析 FMCW SAR 中动目标的成像特性; 最后通过仿真实验来验证文中分析结论的合理性及有效性。

2 传统的 FMCW SAR 动目标分析方法

本节简要地介绍传统的 FMCW SAR 动目标分析方法。首先给出了条带模式下 FMCW SAR 的成像几何。如图 1 所示。 τ 表示方位向时间, O 表示方位时间起点, v 表示雷达天线平台方位向速度。 $P(r_0, \tau_0)$ 表示场景中的一个运动目标, 其到天线平台最短距离为 r_0 , 方位时间位置为 τ_0 , 距离向速度 v_r , 方位向速度 v_a 。

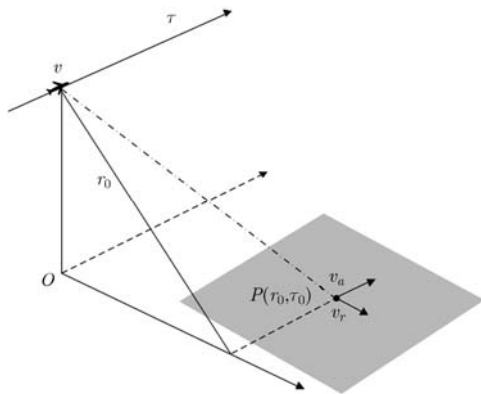


图1 条带 FMCW SAR 动目标成像几何关系

在研究 FMCW SAR 的动目标特性时, 首先需要考虑地面运动目标到天线平台的斜距历程, 这种斜距变化需要精确反映 FMCW SAR 中天线平台和地面目标在脉内的运动。然而, 在传统的 FMCW SAR 动目标研究中^[5-9], 这种斜距采用一阶泰勒展开进行了近似, 如式(1)所示:

$$R(r_0, \tau_0, \tau) = \sqrt{(r_0 + v_r(\tau - \tau_0))^2 + (v - v_a)^2(\tau - \tau_0)^2} \\ \approx r_0 + v_r(\tau - \tau_0) + \frac{(v - v_a)^2(\tau - \tau_0)^2}{2r_0} \quad (1)$$

其中 $\tau = \tau_n + t$, τ_n 为离散的方位慢时间, t 为距离向快时间。然后将式(1)代入 FMCW SAR 的接收信号模型中^[3], 并忽略残留视频相位(RVP)即可以得到其回波信号表达式:

$$S_{IF}(\tau_n, t, \tau_0, r_0) \\ = \gamma(\tau_0, r_0) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[r_0 + v_r(\tau_n + t - \tau_0) \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{(v - v_a)^2(\tau_n + t - \tau_0)^2}{2r_0} - \tau_c \right] \right\} \\ \cdot \exp \left\{ -j 2\pi K_r \left[r_0 + v_r(\tau_n + t - \tau_0) \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{(v - v_a)^2(\tau_n + t - \tau_0)^2}{2r_0} - \tau_c \right] (t - \tau_c) \right\} \quad (2)$$

其中 K_r 为距离调频率, $\gamma(\tau_0, r_0)$ 是与后向散射系数相关的常数, τ_c 为参考斜距延时, 一般取场景中心斜距延时, 这里忽略了 2 维天线方向图的影响。由式(2)可以得到传统分析方法中 FMCW SAR 中动目标的 2 维位移分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= r_0(v_r/v) \\ \Delta R &= f_0 v_r / K_r \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 Δx 表示方位向位移, ΔR 表示距离向位移。

从整个分析过程中可以看到, 传统的 FMCW SAR 动目标特性分析方法存在如下不足。其一, 这些方法是基于一个近似的一阶泰勒展开斜距方程, 和传统的静止目标斜距一样, 这种近似在超短程 SAR(如车载 SAR)或者超高分辨率和大斜视的时候是存在误差的。其二, 在求解目标回波延时, 采用了双程斜距相等的近似, 这是不符合精确的 FMCW SAR 斜距表达。其三, 该方法仅给出了运动目标 2 维位移表达式, 而忽略了 RVP 项的影响以及方位散焦的研究。最后, 目前这些研究^[5-7]都是在方位时域进行, 从而缺少在 2 维频域对距离方位耦合相位影响的研究。

因此, 基于以上不足, 本文提出了一种基于解

析的 FMCW SAR 动目标斜距模型和精确的 2 维频谱模型的动目标特性分析的方法, 给出了基于频谱模型的运动目标 2 维位移量和方位散焦相位, 并对 FMCW SAR 中的残留视频分量对运动目标特性的影响进行了简单分析。本文将从推导动目标信号模型开始。

3 FMCW SAR 动目标信号模型

在本节, 本文将从推导解析的动目标斜距模型开始, 推导出动目标时域信号模型, 然后得到其在 2 维频域的信号模型。

3.1 动目标时域信号模型

如图 1 中所示的成像几何中, 天线平台到地面动目标的斜距历程可以表示为式(4)所示。考虑到动目标实际应用需求, 这里暂不考虑动目标的 2 维加速度的影响。

$$R(\tau) = \sqrt{[r_0 + v_r(\tau - \tau_0)]^2 + (v - v_a)^2(\tau - \tau_0)^2} \quad (4)$$

为了得到动目标回波延时, 需要考虑回波的双程斜距。在脉冲 SAR 中, 由于发射脉宽很短, 在脉冲发射和接收的过程中的天线平台的运动可以忽略不计, 即停-走模式是成立的, 此时的回波延时为双倍单程斜距延时, 可以表示为 $\tau_d = 2R(\tau)/c$, 其中 c 为光速。然而在 FMCW SAR 中, 由于脉冲的持续时间一般可以达到毫秒量级, 天线及运动目标在脉内的运动就不能再忽略。此时, 在推导其斜距历程表示式的时候需要考虑在距离向快时间中天线平台和目标运动的影响。

为了更好地描述 FMCW SAR 的斜距模型, 图 2 给出了 FMCW SAR 的斜距几何模型。雷达经过时间 τ_d 从 A 运动到 A' , 而动目标从 P 点运动到 P' 点。 AP 的距离为 $R(\tau)$, 则 $A'P'$ 的距离为 $R(\tau + \tau_d)$, 此时回波延时可以表示为

$$\tau_d = \frac{R(\tau) + R(\tau + \tau_d)}{c} \quad (5)$$

其中

$$R(\tau) = \sqrt{[r_0 + v_r(\tau - \tau_0)]^2 + (v - v_a)^2(\tau - \tau_0)^2} \quad (6)$$

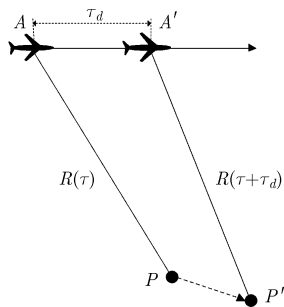


图 2 FMCW SAR 的斜距几何模型

$$\begin{aligned} & R(\tau + \tau_d) \\ &= \sqrt{[r_0 + v_r(\tau + \tau_d - \tau_0)]^2 + (v - v_a)^2(\tau + \tau_d - \tau_0)^2} \end{aligned} \quad (7)$$

联合式(5)-式(7)可以求得 FMCW SAR 动目标的回波延时为

$$\tau_d = 2\alpha_0 \left[\frac{R(\tau)}{c} + \beta_0(\tau - \tau_0) + \frac{r_0 v_r}{c^2} \right] \quad (8)$$

其中 α_0 为多普勒因子, 定义为: $\alpha_0 = \frac{1}{1 - \beta_0}$, $\beta_0 = \frac{v_r^2 + (v - v_a)^2}{c^2}$ 。

由式(8)可以得到 FMCW SAR 经过 Dechirp 接收后的动目标回波信号模型为

$$\begin{aligned} S_{IF}(\tau, t, \tau_0, r_0) &= \gamma(\tau_0, r_0) \cdot \exp\{-j2\pi f_0(\tau_d - \tau_c)\} \\ &\cdot \exp\{-j2\pi K_r(\tau_d - \tau_c)(t - \tau_c)\} \\ &\cdot \exp\{j\pi K_r(\tau_d - \tau_c)^2\} \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中第 1 指数项表示动目标的方位调制项, 第 2 项为距离徙动项, 最后一项为残留视频相位(RVP), 在传统的 FMCW SAR 动目标分析中, 该项的影响被忽略, 这里进行简单的验证分析。

在动目标特性分析中, 主要分析由目标速度导致的 2 维位移和散焦, 即关于距离快时间和方位慢时间的变化量, 因此我们展开 RVP 并忽略固定相位得到关于快时间和慢时间的一次和二次项:

$$\begin{aligned} \Phi_{RVP} &= \pi K_r \tau_d^2 - 2\pi K_r \tau_c \tau_d + \Phi_{\text{const}} \\ &\approx -\pi K_r \tau_d^2 + \Phi_{\text{const}} \\ &\approx [-4\pi K_r \alpha_0^2 ((r_0 + v_r(\tau - \tau_0))^2 + (v - v_a)^2 \\ &\quad \cdot (\tau - \tau_0)^2)]/c^2 + \Phi_{\text{const}} \\ &\approx -\frac{4\pi K_r \alpha_0^2 v_e^2}{c^2} (\tau_n^2 + t^2) - \frac{8\pi K_r \alpha_0^2 r_0 v_r}{c^2} \\ &\quad \cdot (\tau_n + t) + \Phi'_{\text{const}} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 Φ_{const} , Φ'_{const} 均为与 2 维时间量无关的固定相位。 v_e 为等效速度, 定义为 $v_e = \sqrt{v_r^2 + (v - v_a)^2}$ 。此时由 RVP 引起的目标 2 维位移分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{\text{rvp}} &= -\frac{2K_r \lambda \alpha_0^2 r_0^2 v_r}{c^2 v} \\ \Delta R_{\text{rvp}} &= \frac{2\alpha_0^2 r_0 v_r}{c} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

采用第 5 节的仿真参数进行验证分析, RVP 引起的方位位移和距离位移分别为 0.008 m 与 $7.3e-6$ m, 而其导致的二次相位误差分析为 0.018π rad 和 $5.5e-12\pi$ rad。因此为了简化推导分析, 忽略 RVP 的影响。

通过对式(9)进行时频关系 $f_r = K_r(t - \tau_c)$ 替

换^[3,10], 我们可以得到 FMCW SAR 动目标回波信号的一般形式为

$$S_{IF}(\tau, f_r, \tau_0, r_0) = \gamma(\tau_0, r_0) \cdot \exp(-j2\pi(f_0 + f_r)(\tau_d - \tau_c)) \quad (12)$$

将式(8)代入式(12)可以得到 FMCW SAR 中动目标信号的形式为

$$S_{IF}(\tau, f_r, \tau_0, r_0) = \gamma(\tau_0, r_0) \cdot \exp \left\{ -j4\pi\alpha_0(f_0 + f_r) \cdot \left[\frac{R(\tau)}{c} + \beta_0(\tau - \tau_0) + \frac{r_0 v_r}{c^2} - \frac{r_c}{c} \right] \right\} \quad (13)$$

其中 r_c 为参考斜距, $\tau = \tau_n + t$ 。

从整个动目标模型的推导过程中来看, 除了忽略 RVP 的影响外, 该模型没有进行近似, 因此式(13)给出的动目标回波信号是精确的。而解析的斜距模型将是本文推导精确的 2 维频谱模型的基础。

3.2 动目标 2 维频谱模型

为了得到动目标的 2 维频域信号, 需要对式(13)进行方位向傅里叶变换, 如式(14)所示。

$$S_{IF}(f_r, f_r, \tau_0, r_0) = \int S_{IF}(\tau, f_r, \tau_0, r_0) \exp \{-j2\pi f_r \tau_n\} d\tau_n \quad (14)$$

在对式(13)进行积分的时候, 本文采用了驻定相位原理进行求解。通过对积分符号内相位进行一阶求导, 并令导数为零, 求取驻定相位点的离散时间 τ_n 的表达式 τ_p , 如式(15)所示。

$$\tau_p = \tau_0 - \frac{r_0}{v_e} \frac{\alpha\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} - \frac{r_0 v_r}{v_e^2} - t \quad (15)$$

这里定义 α 为速度调制因子, 表示为 $\alpha = \sqrt{1 - \left(\frac{v_r}{v_e}\right)^2}$,

$$\beta = \left(\frac{cf_r}{2\alpha_0 v_e (f_0 + f_r)} + \frac{v_e}{c} \right)$$

将式(15)代入式(14)内的相位表达式, 并采用时频替换 $K_r(t - \tau_c) = f_r$ ^[3], 即可以得到如式(16)所示的 FMCW SAR 精确的动目标 2 维频谱模型:

$$\begin{aligned} \Phi_{PTRS}(f_r, f_r, r_0) &= -\frac{4\pi r_0 \alpha_0 \alpha}{c} \sqrt{(f_0 + f_r)^2 - \left[\frac{v_e}{c} (f_0 + f_r) + \frac{cf_r}{2\alpha_0 v_e} \right]^2} \\ &+ \frac{4\pi \alpha_0 f_r r_0 v_r}{c^2} + \frac{2\pi r_0 v_r f_r}{v_e^2} + \frac{4\pi \alpha_0 f_0 r_0 v_r}{c^2} \\ &+ 2\pi(f_c + f_r + f_r)\tau_c + \frac{2\pi f_r f_r}{K_r} - 2\pi f_r \tau_0 \end{aligned} \quad (16)$$

当运动目标的 2 维速度均为零时, 式(16)蜕变为 FMCW SAR 中静止目标的 2 维频谱, 如式(17)所示。

$$\begin{aligned} \Phi_{PTRS}'(f_r, f_r, r_0) &= -\frac{4\pi r_0 \alpha_0'}{c} \sqrt{(f_0 + f_r)^2 - \left[\frac{v}{c} (f_0 + f_r) + \frac{cf_r}{2\alpha_0' v} \right]^2} \\ &+ 2\pi(f_c + f_r + f_r)\tau_c + \frac{2\pi f_r f_r}{K_r} - 2\pi f_r \tau_0 \end{aligned} \quad (17)$$

其中 α_0' 为静止目标的多普勒因子, 表示为 $\alpha_0' = \frac{1}{1 - v^2/c^2}$ 。

可以看到式(17)的结果和文献[3]中推导的结果是一致的, 初步验证了本文所推导的动目标 2 维频谱模型的正确性和通用性。为了说明动目标的 2 维频谱模型, 本文将对式(16)进行定性介绍。

式(16)中第 1 项表示距离向和方位向耦合项, 和静止目标的 2 维频谱模型不同的是, 动目标的耦合项受到了速度调制因子的影响, 因此, 在 FMCW SAR 图像上的动目标将出现方位散焦和微少的距离偏移, 而这种距离偏移在传统的动目标分析方法中被忽略。第 2 项为 FMCW SAR 中特有的距离偏移。第 3 项为距离向速度导致的方位位移量。第 4 项为动目标距离向速度带来的固定相位, 这也是 FMCW SAR 中特有的。最后几项是 FMCW SAR 动目标与静止目标的频谱模型共有的, 这里不再做介绍^[3]。

综合以上分析可以看到基于解析斜距模型的 FMCW SAR 动目标 2 维频谱模型可以直观地反映动目标 2 维速度对动目标成像结果的影响。为了更好地对动目标的特性进行分析, 在下面章节, 本文通过展开式(16)中的耦合项对动目标成像特性进行定量分析。

4 FMCW SAR 动目标特性分析

动目标的成像特性的产生是由于在对包含动目标在内的 SAR 数据成像的时候采用了如式(17)所示的静止目标的频谱模型, 从而导致了运动目标在成像后的图像上表现为 2 维位移与 2 维散焦。因此, 这里可以取式(16)与式(17)的相位差来分析 FMCW SAR 中运动目标的特性, 表述为

$$\begin{aligned} \Phi_{MT}(f_r, f_r, r_0) &= -\frac{4\pi r_0}{c} \left[\alpha_0 \alpha \sqrt{(f_0 + f_r)^2 - \left[\frac{v_e}{c} (f_0 + f_r) + \frac{cf_r}{2\alpha_0 v_e} \right]^2} \right. \\ &- \alpha_0' \sqrt{(f_0 + f_r)^2 - \left[\frac{v}{c} (f_0 + f_r) + \frac{cf_r}{2\alpha_0' v} \right]^2} \\ &\left. + \frac{4\pi \alpha_0 f_r r_0 v_r}{c^2} + \frac{2\pi r_0 v_r f_r}{v_e^2} + \frac{4\pi \alpha_0 f_0 r_0 v_r}{c^2} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

对式(18)中的根号采用一阶泰勒级数展开可得

$$\begin{aligned} \Phi_{MT}(f_r, f_\tau, r_0) &\approx -\frac{4\pi r_0}{c}(\alpha_0 \alpha D f_0 - \alpha'_0 D' f'_0) - \frac{4\pi r_0}{c} \\ &\cdot \left(\frac{\alpha_0 \alpha (1 - \mu_1 \mu_2)}{D} - \frac{\alpha'_0 (1 - \mu'_1 \mu'_2)}{D'} - \frac{\alpha_0 v_r}{c} \right) f_r \\ &+ \frac{2\pi r_0 v_r f_\tau}{v_e^2} + \frac{4\pi \alpha_0 f_0 r_0 v_r}{c^2} \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $D = \sqrt{1 - \mu_1^2}$, $\mu_1 = \frac{v_e}{c} + \frac{c f_\tau}{2\alpha_0 v_e f_0}$, $\mu_2 = \frac{v_e}{c}$,
 $D' = \sqrt{1 - \mu'_1{}^2}$, $\mu'_1 = \frac{v}{c} + \frac{c f_\tau}{2\alpha'_0 v f_0}$, $\mu'_2 = \frac{v}{c}$ 。

从式(19)可以看到, FMCW SAR 中动目标的方位散焦相位, 距离向位移与方位向位移可以分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\Phi_{SM}(r_0, f_\tau) &= -\frac{4\pi r_0}{c}(\alpha_0 \alpha D f_0 - \alpha'_0 D' f'_0) \\ \Delta R &= r_0 \left(\frac{\alpha_0 \alpha (1 - \mu_1 \mu_2)}{D} - \frac{\alpha'_0 (1 - \mu'_1 \mu'_2)}{D'} - \frac{\alpha_0 v_r}{c} \right) \\ \Delta x &= \frac{r_0 v_r}{v_e^2} v \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

在正侧视的时候, 距离向的位移量可以近似为

$$\Delta R_{BS} \approx -\frac{r_0 \alpha_0 v_r}{c} + r_0 (\alpha \alpha_0^2 - \alpha_0'^2) \quad (21)$$

从式(20)可以看到, 相对于传统的动目标特性的时域分析方法, 本文的方法可以定量获取其导致方位散焦的相位以及 2 维位移量。对比式(3)中的结果, 其距离向的位移量考虑了速度调制因子带来的影响, 因而更加精确, 同时又与多普勒中心有关的, 可以很好地表达斜视下的动目标特性。而方位散焦相位的给出对于动目标的二次聚焦具有重要意义。这些结论本文将在下一节进行仿真验证对比。

因此, 通过对动目标的 2 维频谱模型进行泰勒展开, 本文定量地获取了 FMCW SAR 中动目标距离向和方位向速度对动目标成像的影响, 而这种影响的分析更加精确和全面。距离向的速度将导致点目标方位向位移、距离向轻微位移和方位散焦, 而方位向的速度将导致目标出现散焦。本文精确地求取了这些位移量和导致方位散焦的相位, 因此可以对散焦的动目标进行快速精确地补偿。这些结论对于 FMCW SAR 中动目标特性的量化研究具有重要意义。

5 仿真实验

本节主要验证文中所推导的 FMCW SAR 动目标 2 维频谱以及基于 2 维谱的动目标特性分析的结果。采用的验证方法是利用时域的方法生成 FMCW SAR 动目标回波, 然后采用传统的波数域聚焦算法

对其进行聚焦^[3], 通过对成像后目标 2 维位移的测量和方位散焦补偿, 来验证文中的理论推导。仿真所用的参数如表 1 所示。场景中设置了 5 组在同一方位位置, 不同斜距位置的运动目标, 其 2 维速度如图 3 中的标注所示, 其中第 1 个值为方位向速度, 第 2 个值为距离向速度。聚焦后的结果如图 3 所示。

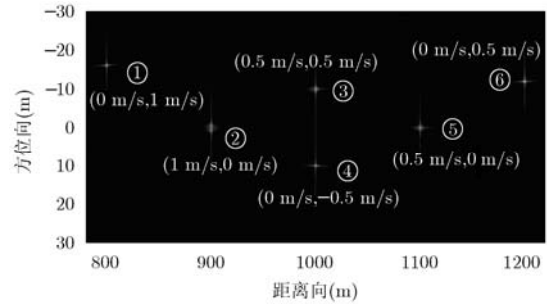


图 3 运动目标聚焦结果

表 1 仿真参数

载频	9.6 GHz	参考斜距	1000 m
扫频带宽	500 MHz	载机速度	50 m/s
扫频周期	1 ms	天线尺寸	0.6 m
采样频率	4 MHz	斜视角	0°

通过图 3 可以看出, 在同一方位时刻的目标由于不同的速度导致了不同的位移, 散焦现象。这里将对这些位移进行精确测量并与传统分析的结果式(3)进行比对来验证本文方法的优缺点。而对于方位散焦的目标点, 如图 3 中的目标点②, ③, ⑤, 将通过本文推导的散焦相位对其进行二次聚焦从而验证本文分析的准确性。这里考虑到测试中目标的速度对目标散焦的影响, 这里对成像后的目标进行 32 倍插值以精确地获取的成像后动目标位置信息。测试值和理论值如表 2 所示。

从表 2 的结果可以看到, 考虑到方位散焦对测量精度的影响, 基于谱分析的 FMCW SAR 运动目标的方位位移偏移与传统方法有着类似的精度。而在距离偏移的表述上, 由于本文方法在 2 维频域进行, 充分考虑了耦合相位的影响, 因此结果更加接近实际的位移量。而传统的分析方法由于在时域分析, 忽略了其影响, 其结果存在较大误差。需要注意的是, 为了防止过大的距离向速度和最近斜距导致运动目标出现方位位置模糊而影响图 3 的比较效果, 本文在仿真中选取了较小的距离向速度和最近斜距, 但是当运动目标的最近斜距和距离向速度增大时, 传统方法将可能导致数十个距离门的距离位移误差, 影响到运动目标的二次聚焦及应用。

表 2 运动目标 2 维位移结果

动目标信息		方位偏移(m)			距离偏移(m)		
目标速度(m/s)	目标斜距位置(m)	测量值	传统方法	本文方法	测量值	传统方法	本文方法
$v_r=1.0, v_a=0.0$	800	15.99	16.00	15.99	0.16	0.02	0.16
$v_r=0.5, v_a=0.0$	1000	-10.00	-10.00	-10.00	0.05	0.01	0.05
$v_r=0.5, v_a=0.5$	1000	10.01	10.00	10.20	0.05	0.01	0.05
$v_r=0.5, v_a=0.0$	1200	12.00	12.00	12.00	0.06	0.01	0.06

与此同时, 本文对式(20)中给出的散焦相位的准确性进行了验证。图 4 给出了图 3 中目标点②, ③, ⑤经过二次聚焦前后的方位剖面图。可以看到经过相位补偿, 不同速度的运动目标均得到了较好的聚焦。我们对点目标的聚焦质量进行了分析, 结果如表 3 所示。可以看到其指标都接近理论值, 从而验证了本文中散焦相位表达的准确性。综上所述, 我们可以得出结论, 本文所推导的 FMCW SAR 动目标 2 维频谱模型是准确的, 而文中基于 2 维频谱的

动目标特性分析方法是精确合理的。

6 结论

本文针对传统 FMCW SAR 动目标分析方法存在的不足, 系统地研究了 FMCW SAR 中动目标的特性。通过解析的 FMCW SAR 斜距模型, 推导了精确的运动目标 2 维频谱模型, 并基于此提出了一种基于 2 维频谱模型的运动目标特性分析方法。展开的谱模型分析结果表明, 在 FMCW SAR 中, 距离向的速度不但会导致目标的方位位移和散焦, 而且还会导致微小的距离向偏移; 文中还对方位散焦模型进行了分析和验证。仿真结果表明, 本文提出的基于 2 维频谱模型的动目标特性分析方法相对于传统时域方法更加全面也更加精确, 对 FMCW SAR 乃至高速平台下的高分辨率脉冲 SAR 中的动目标特性分析都具有重要的借鉴意义。

表 3 方位散焦补偿后的点目标性能分析

目标编号	IRW(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
②	0.28	-13.28	-10.28
③	0.27	-13.17	-10.19
⑤	0.27	-13.28	-10.27

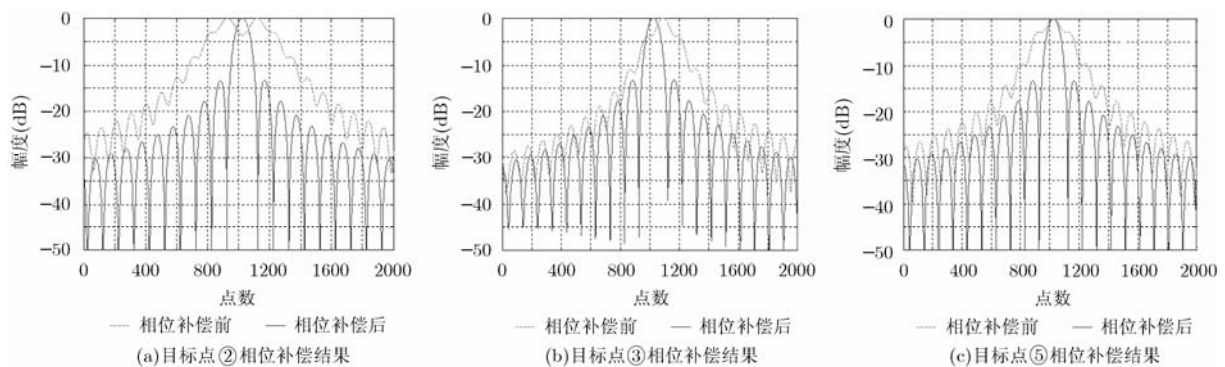


图 4 动目标方位向速度影响仿真结果

参考文献

- [1] Meta A, Hoogeboom P, and Ligthart L P. Signal processing for FMCW SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3519-3532.
- [2] Zaugg E C and Long D G. Theory and application of motion compensation for LFM-CW SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 2990-2998.
- [3] Wang R, Loffeld O, Nies H, et al.. Focus FMCW SAR data using wavenumber domain algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2109-2118.
- [4] Haderer A, Scherz P, Schrattecker J, et al.. Real-time implementation of an FMCW back projection algorithm for 1D and 2D apertures[C]. *Proceedings of Radar Conference*, Manchester, UK, 2011: 53-56.
- [5] Meta A and Hoogeboom P. Signal processing algorithms for FMCW moving target indicator synthetic aperture radar[C]. *Proceedings of IGARSS'05*, Seoul, Korea, 2005: 316-319.
- [6] 梁毅, 王虹现, 邢孟道, 等. 调频连续波 SAR 慢速动目标参数估计与成像[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(5): 1001-1006.

- Liang Yi, Wang Hong-xian, Xing Meng-dao, *et al.*. Slow ground moving target parameter estimation and imaging in FMCW SAR[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(5): 1001-1006.
- [7] 耿淑敏, 李星. FM-CW SAR 动目标检测算法[J]. 研究计算机工程与应用, 2012, 48(9): 120-123.
- Geng Shu-min and Li Xing. Study on moving target detection algorithm for FM-CW SAR[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(9): 120-123.
- [8] Lu Gao-huan, Wang Jun-feng, and Liu Xing-zhao. Ground moving target indication in SAR images by symmetric defocusing[J]. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, 2013, 10(2): 241-245.
- [9] Zhu S, Liao G, Qu Y, *et al.*. Ground moving targets imaging algorithm for synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 462-477.
- [10] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 78-82.
- 罗运华: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为 FMCW SAR 系统及信号处理.
- 宋红军: 男, 1968 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为 SAR 系统仿真、成像新体制研究、信号处理.
- 王 宇: 男, 1981 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为双基 SAR 及 FMCW SAR 信号处理.
- 郑世超: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为动目标检测与成像.