

SAR 运动目标微动信号模型及微多普勒效应研究

周 辉^{1,2} 赵凤军² 禹卫东²

(1. 中国科学院大学 北京 100047; 2. 中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘 要: 作为一种全新的雷达运动目标识别方法,微多普勒效应能够显示出目标自身更为丰富的运动学信息,同时也会造成目标 SAR 成像模糊等传统理论无法克服不利影响。通过研究振动和转动 SAR 目标回波模型,综合出 SAR 微动目标统一的距离方程及 SAR 回波表达式,推导出回波方位向将呈现正弦调频(sinusoidal frequency modulation, SFM)信号等周期性特点。最后,通过计算机仿真实验验证了本文结果的正确性。

关键词: 合成孔径雷达; 运动目标; 信号模型; 微多普勒效应; 微动

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Study on the micro-motion signal model and micro-Doppler effect of SAR moving targets

Zhou Hui^{1,2} Zhao Fengjun² Yu Weidong²

(1. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080, China;

2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China)

Abstract: As a new method for radar target feature extraction and recognition, micro-Doppler effect can express more kinematic information of moving targets. However, micro-Doppler will result in defocusing and other disadvantageous effect on SAR imagery, which can't be overcome by conventional methods. Through the research of the vibration and rotation of SAR target echo model, SAR micro-motion unified target distance equation and SAR echo are summarized in this paper, and azimuth will present Sinusoidal Frequency Modulation (SFM) characteristics of periodic signal. At last, simulation results on point targets validate the proposed approach.

Keywords: SAR; Micro-Doppler; moving target; signal model; micro-motion

1 引 言

微多普勒效应可以用来研究目标的运动学性质,如车辆发动机产生的振动可以通过车身的表面振动来检测,通过分析车身表面的微多普勒特性,可以得出发动机的转速,从而识别出车辆的类型。微多普勒的概念最早是从激光雷达系统中引入的,主要用于激光雷达测距。

微多普勒效应提供了一种新的用于识别目标特性的手段,而传统 SAR/GMTI 技术没有考虑目标复杂运动(如振动、转动等)模型及特性,只是针对做匀速或匀加速运动的目标,因此对微动目标就显得无能为力^[6]。在高分辨率 SAR 图像中,微动目标通常是以散焦或“鬼影”方式存在,严重干扰 SAR 成像的质量及图像后期应用。通过对振动和转动目标回波信号模型分析,推导出微动目标 SAR 回波信号的统一表达式及方位向呈现出正弦调频(sinusoidal

frequency modulation, SFM)信号特点^[1-4]。

2 微动目标信号模型及微多普勒分析

微多普勒主要由运动目标自身的转动分量引起的,而振动和转动是运动目标最常见的转动分量,如发动机的振动,坦克的履带旋转运动等。

2.1 振动目标微动模型及微多普勒分析

雷达与振动点目标的几何模型如图 1 所示,雷达在空间固定坐标系 (x, y, z) 中沿着 x 方向以速度 V_R 和高度 h 飞行,其下视角为 α ,斜视角为 β ,地斜角为 γ 。坐标系 (X, Y, Z) 为运动目标参考坐标系,与空间固定坐标系 (x, y, z) 平行,其坐标系原点 O_p 在固定坐标系 (x, y, z) 中的坐标为 (x_0, y_0, z_0) 。点目标 P 以 O_p 中心做简谐振动, D_v 为振动幅度, ω_v 为振动频率,振动的方位角和俯仰角分别为 α_p 和 β_p ,则 P 与 O_p 之间距离为:

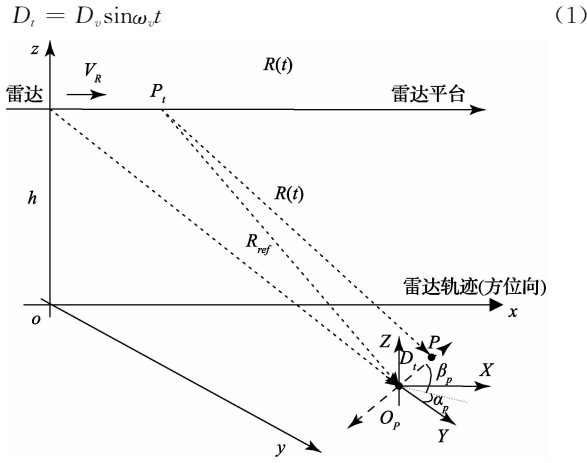


图1 雷达与振动点目标几何模型

根据球面坐标系原理, P 点在坐标系 (X, Y, Z) 中的坐标为 $(D_t \cos \beta_p \cos \alpha_p, D_t \cos \beta_p \sin \alpha_p, D_t \sin \beta_p)$ 。在图1中, t 时刻雷达位置 P_t 在空间固定坐标系中的坐标为 $(V_R t, 0, h)$, 雷达与运动目标参考坐标系原点 O_p 之间的矢量距离为 $\mathbf{R}_{ref}(t)$, 其标量距离:

$$R_{ref}(t) = |\mathbf{R}_{ref}(t)| = [(x_0 - V_R t)^2 + (y_0)^2 + (z_0 - h)^2]^{1/2} \quad (2)$$

雷达与散射点目标 P 之间的矢量距离为雷达波束中心 LOS 方向, 可以表示为:

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{R}_{ref}(t) + \mathbf{D}_t \quad (3)$$

由于 P 点在空间固定坐标系 (x, y, z) 中的坐标为 $(x_0 + D_t \cos \beta_p \cos \alpha_p, y_0 + D_t \cos \beta_p \sin \alpha_p, z_0 + D_t \sin \beta_p)$, 其标量距离为^[5]:

$$\begin{aligned} R(t) &= |\mathbf{R}(t)| = \\ &= [(x_0 + D_t \cos \beta_p \cos \alpha_p - V_R t)^2 + \\ &+ (y_0 + D_t \cos \beta_p \sin \alpha_p)^2 + (z_0 + D_t \sin \beta_p - h)^2]^{1/2} = \\ &= [(x_0 - V_R t)^2 + 2(x_0 - V_R t)D_t \cos \beta_p \cos \alpha_p + (D_t \cos \beta_p \cos \alpha_p)^2 + \\ &+ y_0^2 + 2y_0 D_t \cos \beta_p \sin \alpha_p + (D_t \cos \beta_p \sin \alpha_p)^2 + \\ &+ (z_0 - h)^2 + 2(z_0 - h)D_t \sin \beta_p + (D_t \sin \beta_p)^2]^{1/2} = \\ &= [(x_0 - V_R t)^2 + y_0^2 + (z_0 - h)^2 + D_t^2 + \\ &+ 2(x_0 - V_R t)D_t \cos \beta_p \cos \alpha_p + \\ &+ 2y_0 D_t \cos \beta_p \sin \alpha_p + 2(z_0 - h)D_t \sin \beta_p]^{1/2} = \\ &= [R_{ref}^2(t) + D_t^2 + 2(x_0 - V_R t)D_t \cos \beta_p \cos \alpha_p + \\ &+ 2y_0 D_t \cos \beta_p \sin \alpha_p + 2(z_0 - h)D_t \sin \beta_p]^{1/2} \quad (4) \end{aligned}$$

由于 $R_{ref}(t) \geq D_t$, 式(4)可以近似为:

$$\begin{aligned} R(t) &= \\ &= [R_{ref}^2(t) + D_t^2 + 2(x_0 - V_R t)D_t \cos \beta_p \cos \alpha_p + \\ &+ 2y_0 D_t \cos \beta_p \sin \alpha_p + 2(z_0 - h)D_t \sin \beta_p]^{1/2} \approx R_{ref}(t) + \\ &= \frac{(x_0 - V_R t)D_t \cos \beta_p \cos \alpha_p + y_0 D_t \cos \beta_p \sin \alpha_p + (z_0 - h)D_t \sin \beta_p}{R_{ref}(t)} = \\ &= R_{ref}(t) + D_t \left[\frac{(x_0 - V_R t)}{R_{ref}(t)} \cos \beta_p \cos \alpha_p + \frac{y_0}{R_{ref}(t)} \cos \beta_p \sin \alpha_p + \frac{(z_0 - h)}{R_{ref}(t)} \sin \beta_p \right] \quad (5) \end{aligned}$$

根据雷达波束中心 LOS 法向量:

$\mathbf{n} = (\sin \alpha \sin \gamma, \sin \alpha \cos \gamma, \cos \alpha)^T$, 则有:

$$\begin{cases} \frac{x_0 - V_R t}{R_{ref}(t)} = \sin \gamma \sin \alpha \\ \frac{y_0}{R_{ref}(t)} = \cos \gamma \sin \alpha \\ \frac{h - z_0}{R_{ref}(t)} = \cos \alpha \end{cases} \quad (6)$$

因此, 雷达与散射点目标 P 之间的距离等式可以进一步写成:

$$\begin{aligned} R(t) &= R_{ref}(t) + D_t \left(\frac{\sin \beta \cos \beta_p \cos \alpha_p}{\cos \gamma \sin \alpha \cos \beta_p \sin \alpha_p + \cos \alpha \sin \beta_p} \right) = \\ &= R_{ref}(t) + D_v \left(\frac{\sin \gamma \sin \alpha \cos \beta_p \cos \alpha_p + \cos \gamma \sin \alpha \cos \beta_p \sin \alpha_p + \cos \alpha \sin \beta_p}{\cos \gamma \sin \alpha \cos \beta_p \sin \alpha_p + \cos \alpha \sin \beta_p} \right) \sin \omega_v t = \\ &= R_{ref}(t) + K \sin \omega_v t \quad (7) \end{aligned}$$

式中: $K = D_v \left(\frac{\sin \gamma \sin \alpha \cos \beta_p \cos \alpha_p}{\cos \gamma \sin \alpha \cos \beta_p \sin \alpha_p + \cos \alpha \sin \beta_p} \right)$ 为常数。

雷达回波信号可以写成:

$$\begin{aligned} s_R(t) &= \rho \exp \left\{ j \left[2\pi f_0 t + 4\pi \frac{R(t)}{\lambda} \right] \right\} = \\ &= \rho \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} R_{ref}(t) \right\} \exp \left\{ j \left[2\pi f_0 t + \frac{4\pi}{\lambda} K \sin \omega_v t \right] \right\} = \\ &= \rho \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} R_{ref}(t) \right\} \exp \left\{ j \left[2\pi f_0 t + b \sin \omega_v t \right] \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

式中: $b = \frac{4\pi}{\lambda} K$, 根据第一类 K 阶 Bessel 函数, 将式(8)分解为:

$$\begin{aligned} s_R(t) &= \rho \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} R_{ref}(t) \right\} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_k(b) \exp[j(2\pi f_0 + k\omega_v)t] = \\ &= \rho \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} R_{ref}(t) \right\} \{ J_0(b) \exp(j2\pi f_0 t) + \\ &+ J_1(b) \exp[j(2\pi f_0 + \omega_v)t] - J_1(b) \exp[j(2\pi f_0 - \omega_v)t] + \\ &+ J_2(b) \exp[j(2\pi f_0 + 2\omega_v)t] - J_2(b) \exp[j(2\pi f_0 - 2\omega_v)t] + \\ &+ J_3(b) \exp[j(2\pi f_0 + 3\omega_v)t] - J_3(b) \exp[j(2\pi f_0 - 3\omega_v)t] + \dots \} \quad (9) \end{aligned}$$

式中: $J_k(b) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp\{j(b \sin x - kx)\} dx$ 。根据傅里叶变换原理, 式(8)中的指数项将导致微多普勒频谱由以 f_0 为中心的成对谱线组成, 相邻谱线间隔为 $\frac{\omega_v}{2\pi}$ 。根据给定的调制参数 b , $J_n(b)$ 将趋近于零。根据卡森原则, 振动目标的微多普勒的成对回波的个数应该为^[6]:

$$N \approx |b| + 1 \quad (10)$$

t 时刻, P 点在空间固定坐标系 (x, y, z) 中的坐标为 (x_1, y_1, z_1) , 用矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = D_t \begin{bmatrix} \cos \beta_p \cos \alpha_p \\ \cos \beta_p \sin \alpha_p \\ \sin \beta_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = D_v \sin \omega_v t \begin{bmatrix} \cos \beta_p \cos \alpha_p \\ \cos \beta_p \sin \alpha_p \\ \sin \beta_p \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

点目标 P 由于振动产生的速度为:

$$\mathbf{v} = D_v \omega_v \cos \omega_v t \begin{bmatrix} \cos \beta_p \cos \alpha_p \\ \cos \beta_p \sin \alpha_p \\ \sin \beta_p \end{bmatrix} \quad (12)$$

振动引起的微多普勒可以直接写成^[7]:

$$\begin{aligned} f_{mD} &= \frac{2f_c}{c} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = \\ \frac{2fD_v \omega_v}{c} \cos \omega_v t &\begin{bmatrix} \cos \beta_p \cos \alpha_p \\ \cos \beta_p \sin \alpha_p \\ \sin \beta_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \gamma \\ \cos \alpha \end{bmatrix} = \\ \frac{2fD_v \omega_v}{c} \cos \omega_v t &\begin{bmatrix} \cos \beta_p \sin \alpha \cos \alpha_p \sin \gamma \\ + \cos \beta_p \sin \alpha \sin \alpha_p \cos \gamma + \sin \beta_p \cos \alpha \end{bmatrix} = \\ \frac{2fD_v \omega_v}{c} \cos \omega_v t &[\cos \beta_p \sin \alpha \sin(\alpha_p + \gamma) + \sin \beta_p \cos \alpha] \quad (13) \end{aligned}$$

2.2 转动目标微动模型及微多普勒分析

雷达与转动点目标的几何模型如图 2 所示,雷达在空间固定坐标系 (x, y, z) 中沿着 x 方向以速度 v_R 和高度 h 飞行,其下视角为 α ,斜视角为 β ,地斜角为 γ 。坐标系 (X, Y, Z) 为旋转运动目标固定参考坐标系,与空间固定坐标系 (x, y, z) 平行的坐标系 (X', Y', Z') 为运动目标参考坐标系,其共同的坐标系原点 Q 在固定坐标系 (x, y, z) 中的坐标为 (x_0, y_0, z_0) 。运动目标上的散射点目标 P 跟随运动目标一起做旋转振动。

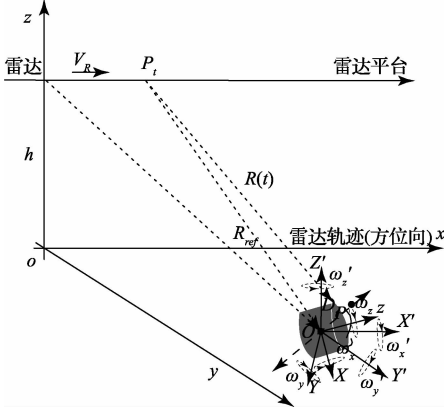


图 2 雷达与转动点目标几何模型

经过旋转转动,运动目标上任意点目标在旋转运动目标固定参考坐标系 (X, Y, Z) 中描述的坐标位置将运动到坐标系 (X', Y', Z') 中一个新的坐标,并且,新坐标可以通过起始坐标乘以初始转动矩阵获得。初始转动矩阵主要由运动目标围绕坐标轴分量旋转顺序及旋转角度的不同而不同。假设运动目标围绕坐标轴的旋转顺序为 z - x - z ,相应的旋转角度为 $(\varphi_0, \theta_0, \psi_0)$,即目标先围绕 z 轴旋转 φ_0 度,然后再围绕 x 轴旋转 θ_0 度,最后再围绕 z 轴旋转 ψ_0 度。该转动目标的起始旋转矩阵 R_{init} 为^[8]

$$R_{init} = R_z(\varphi_0) R_x(\theta_0) R_z(\psi_0) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中相关参数为:

$$\begin{cases} r_{11} = -\sin \varphi_0 \cos \theta_0 \sin \psi_0 + \cos \varphi_0 \cos \psi_0 \\ r_{21} = -\cos \varphi_0 \cos \theta_0 \sin \psi_0 - \sin \varphi_0 \cos \psi_0 \\ r_{31} = \sin \theta_0 \sin \psi_0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} r_{12} = -\sin \varphi_0 \cos \theta_0 \cos \psi_0 + \cos \varphi_0 \sin \psi_0 \\ r_{22} = -\cos \varphi_0 \cos \theta_0 \cos \psi_0 - \sin \varphi_0 \sin \psi_0 \\ r_{32} = \sin \theta_0 \cos \psi_0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} r_{13} = \sin \varphi_0 \sin \theta_0 \\ r_{23} = \cos \varphi_0 \sin \theta_0 \\ r_{33} = \cos \theta_0 \end{cases} \quad (17)$$

在旋转运动目标固定参考坐标系 (X, Y, Z) 中,运动目标以角速度 $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ 围绕坐标轴 X, Y, Z 旋转。运动目标上的散射点目标 P 在该坐标系中的坐标为 $r_p = (x_p, y_p, z_p)^T$ 。在坐标系 (X', Y', Z') 中,散射点目标 P 经过旋转运动到一个新的位置,可以 $R_{init} \cdot r_p$ 来表示,且运动目标围绕该坐标系单位旋转速度矢量为:

$$\omega' = (\omega'_x, \omega'_y, \omega'_z)^T = \frac{R_{init} \cdot \omega}{\|\omega\|} \quad (18)$$

其对应的标量转动角速度可以表示为:

$$\Omega = \|\omega\| \quad (19)$$

因此根据 Rodrigues 表达式, t 时刻相应的转动矩阵为:

$$R_t = I + \tilde{\omega}' \sin \Omega t + \tilde{\omega}'^2 (1 - \cos \Omega t) \quad (20)$$

式中: $\tilde{\omega}'$ 是对称矩阵,即:

$$\tilde{\omega}' = \begin{bmatrix} 0 & -\omega'_z & \omega'_y \\ \omega'_z & 0 & -\omega'_x \\ -\omega'_y & \omega'_x & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

因此,在坐标系 (X', Y', Z') 中,时刻散射点目标 P 从初始位置运动到新位置可以用矢量 $r = R_t \cdot R_{init} \cdot r_p$ 来表示^[9]。该转动分量多普勒频移即为多普勒分量可以近似为:

$$\begin{aligned} f_{mD} &= \frac{2f_c}{c} [\omega \times r]^T \mathbf{n} = \frac{2f_c}{c} [\Omega \omega' \times r]^T \mathbf{n} = \\ \frac{2f_c}{c} [\Omega \tilde{\omega}' r]^T \mathbf{n} &= \frac{2f_c}{c} [\Omega \tilde{\omega}' R_t \cdot R_{init} \cdot r_p]^T \mathbf{n} = \\ \frac{2f_c \Omega}{c} \left\{ \tilde{\omega}' [-I + \tilde{\omega}' \sin \Omega t + \right. & \\ \left. \tilde{\omega}'^2 (1 - \cos \Omega t)] R_{init} \cdot r_p \right\}^T \mathbf{n} &= \\ \frac{2f_c \Omega}{c} \left\{ [\tilde{\omega}'^2 \sin \Omega t - \tilde{\omega}'^3 \cos \Omega t + \right. & \\ \left. \tilde{\omega}' (I + \tilde{\omega}'^2)] R_{init} \cdot r_p \right\}^T \mathbf{n} & \quad (22) \end{aligned}$$

式中: $\tilde{\omega}'$ 为单位对称矩阵,因此满足 $\tilde{\omega}'^3 = -\tilde{\omega}'$,则有:

$$f_{mD} = \frac{2f_c \Omega}{c} [\tilde{\omega}' (\tilde{\omega}' \sin \Omega t + \cos \Omega t) R_{init} \cdot r_p]^T \mathbf{n} \quad (23)$$

3.3 SAR 微动目标回波统一表达式

根据振动及转动目标分析,SAR 微动目标的统一距离表达式为:

$$r(t) = R_{ref}(t) + d \cos \omega_m t \quad (24)$$

式中： $R_{ref}(t)$ 是 SAR 静止点目标的距离模型， d 是微多普勒调制的偏移量或幅度， ω_{mD} 是微多普勒调制频率。作为双曲线距离等式， $R_{ref}(t)$ 进行抛物线近似为：

$$R_{ref}(t) = \sqrt{R_0^2 - v_r^2 t^2} = R_0 + \frac{v_r^2}{2R_0} t^2 \tag{25}$$

SAR 微动点目标信号先经过解调成基带信号，然后进行距离向压缩，距离压缩后的回波信号表示为^[10]：

$$s(t, \tau) = A_0 \omega_a(t) \text{sinc}[\pi B_r(\tau - \frac{2r(t)}{c})] \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} r(t)) \tag{26}$$

式中： A_0 为复常数，表示目标的后向散射系数， $\omega_a(\cdot)$ 为方位向窗函数， B_r 表示发射信号带宽， λ 为发射信号波长， c 为光速， τ 和 t 分别为距离向和方位向变量。将式(24)代入式(26)，则有：

$$s(t, \tau) = A_0 \omega_a(t) \text{sinc}[\pi B_r(\tau - \frac{2R_0}{c})] \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_0) \cdot \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{v_r^2}{2R_0} t^2) \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} d \cos \omega_{mD} t) \cdot \exp(-j \frac{4\pi K_r}{c} \frac{v_r^2}{2R_0} t^2) \tag{27}$$

式中：第 1 项指数为目标距离向位置，第 2 项指数为目标方位相位，第 3 项指数为目标微动信息，第 4 项指数为距离徙动项。与 SAR 静止点目标回波相比，微动点目标信号回波方位向相位受正弦信号调制，呈现出正弦调频 (sinusoidal frequency modulation, SFM) 信号特点，即相位周期特性^[11]。因此，在聚焦之后 SAR 图像中，微动点目标在方位向得不到很好的聚焦，而是根据相关参数的不同，呈现散焦、“鬼影”等特征。

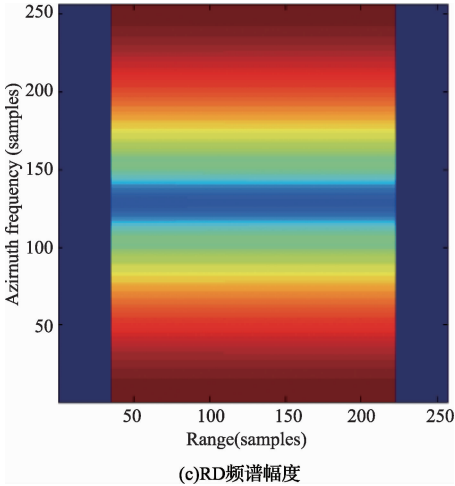
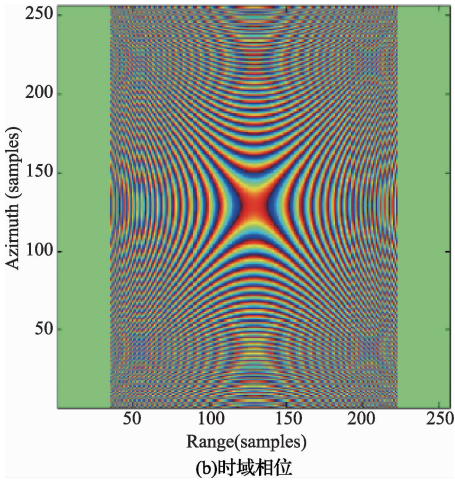
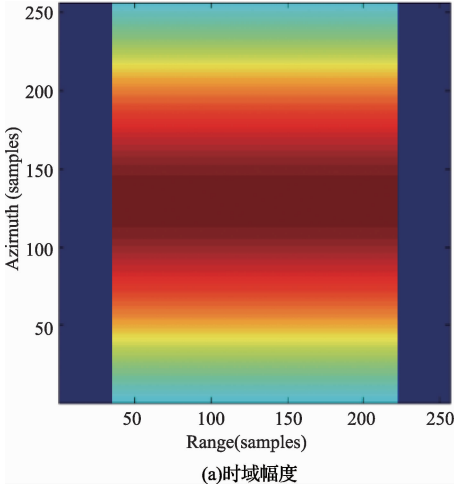
3 仿真试验

下面通过机载 C 波段的仿真参数来说明微动点目标

表 1 机载雷达仿真参数

参数	符合	数值	单位
景中心斜距	$R_{ref}(t_c)$	20	km
雷达有效速度	v_r	150	m/s
发射脉冲时宽	T_r	25	μs
距离调频率	K_r	$0.25E+12$	Hz/s
雷达工作频率	f_0	5.3	GHz
多普勒带宽	Δf_{dop}	80	Hz
距离采样率	F_r	7.5	MHz
方位采样率	F_a	104	Hz
距离线数	N_a	256	
距离线采样点数	N_r	256	
波束斜视角	$\theta_{sq,c}$	0	(°)
波束中心偏移时间	η_c	0	s
多普勒中心频率	$f_{\overline{r}}$	0	Hz
微多普勒调制幅度	d	0.1	m
微多普勒调制频率	ω_{mD}	10	rad

在不同域中的 SAR 信号性质。仿真参数位于表 1 中，所选距离采样率的过采样系数为 1.2，而 PRF 的方位过采样率为 $1.3^{[12]}$ 。



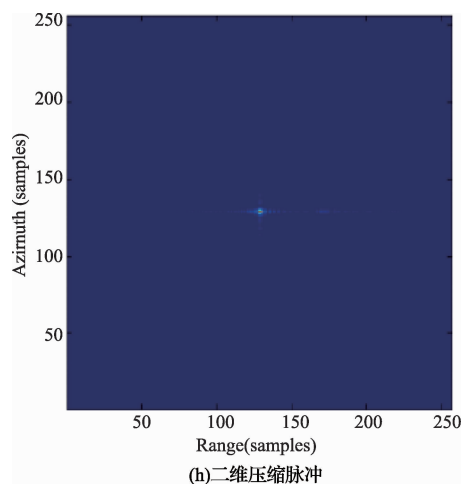
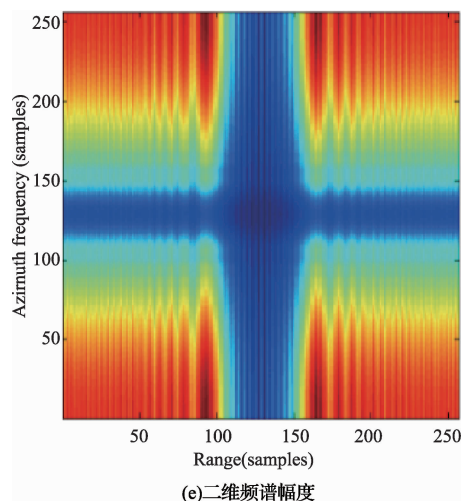
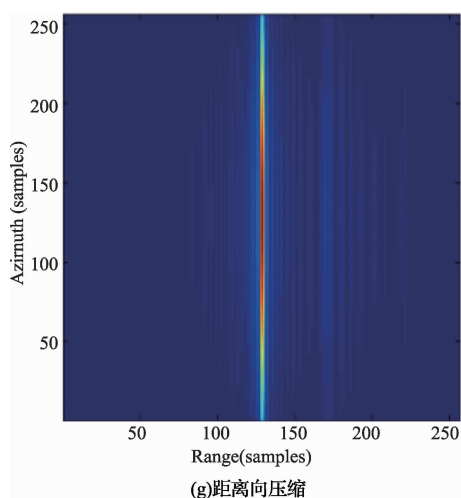
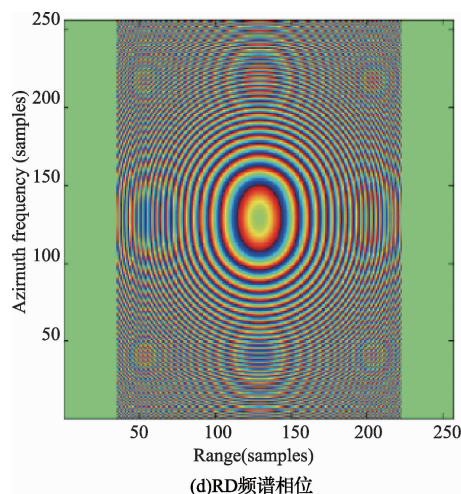
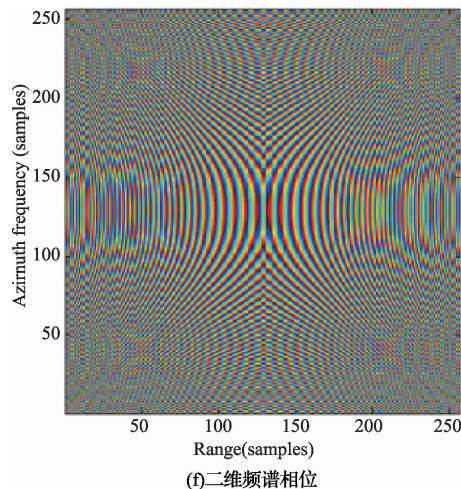
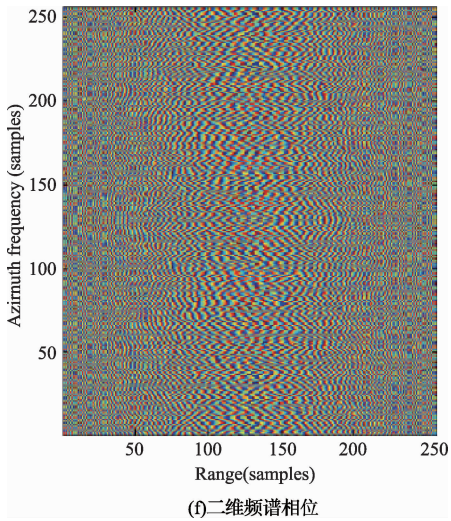
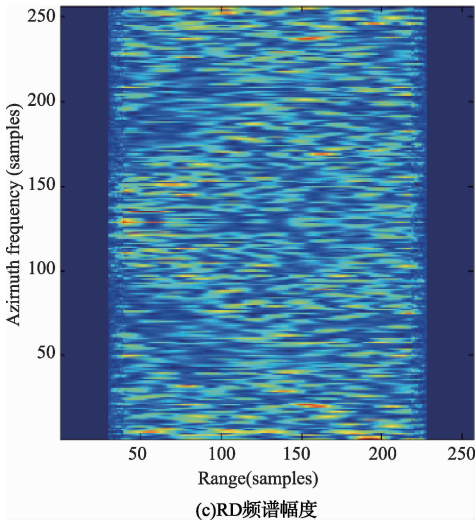
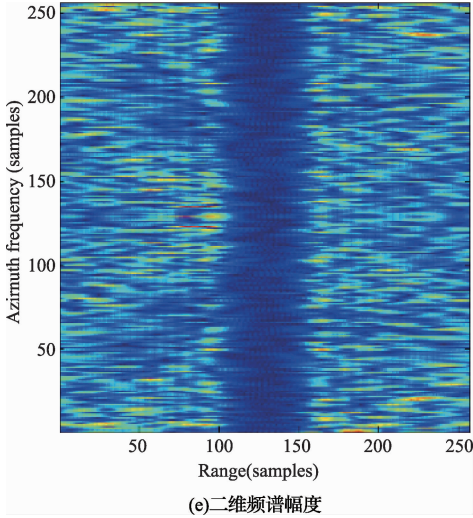
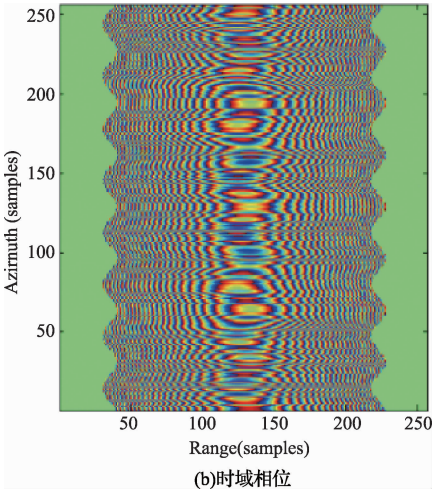
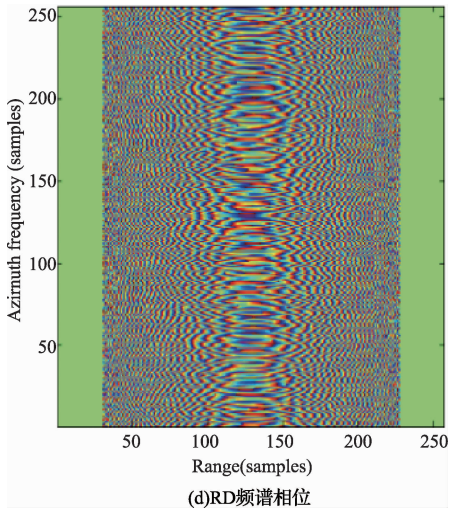
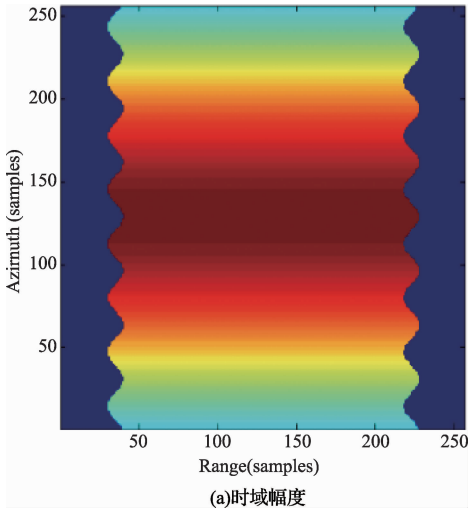


图 3 静止点目标相关性质



为了更好的突出微动点目标的 SAR 信号性质,将同参数下 SAR 静止点目标回波信号在不同域中的性质,如图 3 所示,与微动点目标的性质,如图 4 所示。做一下对比。通过图 3 与图 4 对比,可以得出目标微动信息对 SAR 图像的影响主要体现在方位向上,对距离向的影响相对较少。由于微动点目标回波信号回波不再是线性频率调制(LFM),而是正弦频率调制(SFM),微动点目标信号在方位向呈现周期特性,在 SAR 图像中表现为“鬼影”特征,严重时不能成像。这些特征与前面理论推导结果一致。



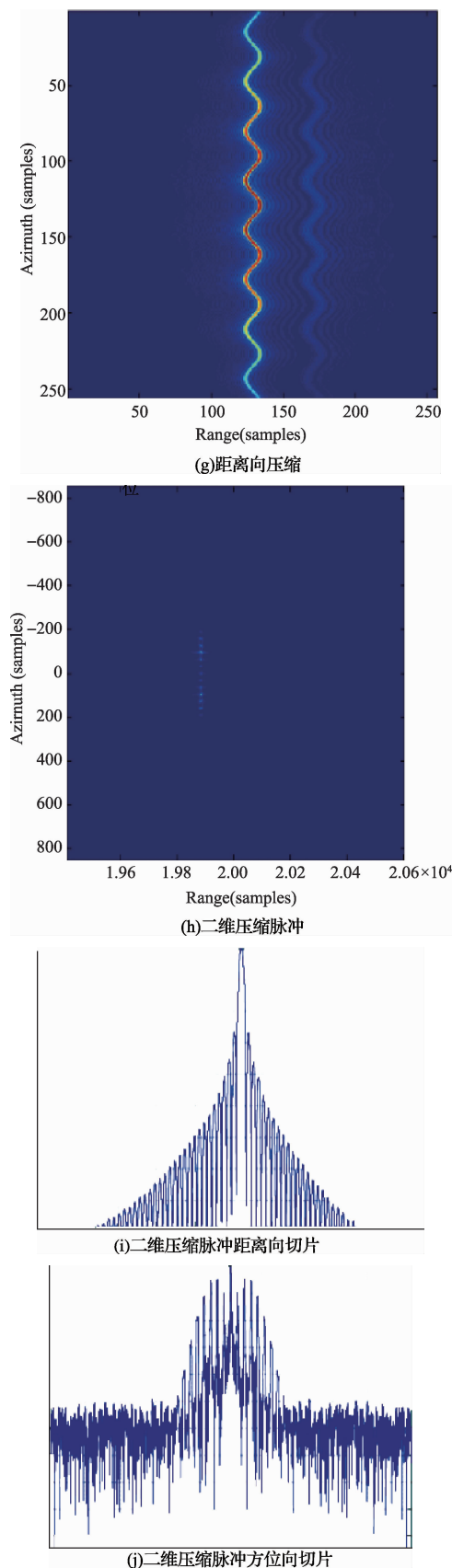


图 4 微动点目标相关性质

4 结 论

SAR/GMTI 技术主要对做匀速及径向加速度的运动目标有效,由于没有考虑运动目标复杂运动(如振动、转动等)的运动形式及信号模型,再针对这类做复杂运动的目标显得无能为力。目标的这类复杂运动特性在多普勒域是通过微多普勒效应表现出来,通常会导致目标回波的相位历史产生 SFM 调制,造成多普勒调频率时变,信号频谱展宽等现象,从而对杂波抑制与运动目标检测、RCMC、参数估计及成像产生影响,造成 SAR/GMTI 算法失效。为了解决上述问题,通过研究 SAR 运动目标振动及转动信号模型,从理论上推导出微多普勒效应的统一表达式,并通过计算机实验仿真验证其正确性,为后续 SAR 微动目标检测、成像及识别打下基础。

参考文献

- [1] CARMINE C. Vibrating target micro-doppler signature in bistatic SAR with a fixed receiver[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(8): 3219-3227.
- [2] YANG J, LIU C. Detection and imaging of ground moving targets with real SAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(2): 920-932.
- [3] 李舜酩,郭海东,李殿荣. 振动信号处理方法综述[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1907-1915.
- [4] 严莹,王琼,柏业超,等. 基于相位函数的 ISAR 目标转角估计方法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(2): 42-46.
- [5] GAO H W. Micro-Doppler signature extraction from ballistic target with micro-motions [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(4): 1969-1982.
- [6] SURESH P. Extracting micro-doppler radar signatures from rotating targets using fourier-bessel transform and time-frequency analysis [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 53(6): 3204-3210.
- [7] YUAN B, CHEN Z P. Micro-Doppler analysis and separation based on complex local mean decomposition for aircraft with fast-rotating parts in ISAR imaging [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(2): 1285 - 1298.
- [8] 谢冬冬,吴侠义,禹卫东. 一种多通道星载 SAR 通道间一致性精确测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(5): 379-384.
- [9] 雷斌,丁赤飏. 一种基于 SAR 图像视觉特征的改进像素掩蔽方法[J]. 电子测量技术, 2014, 37(11): 37-41.

[10] 邓彬,合成孔径雷达微动目标指示(SAR/MMTI)研究[D]. 国防科技大学,2011.

[11] 李菊,李克清,苏勇刚. Markov 随机游走和高斯混合模型相结合的运动目标检测算法[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(5):533-537.

[12] 熊文昌,王宏琦,张月婷. 基于栅格化模型的 SAR 图像仿真方法研究[J]. 国外电子测量技术,2014,34(8): 59-63.

作者简介

周辉,1983 年出生,中科院电子学研究所博士研究生。

主要研究方向为 SAR/ISAR 信号处理。
E-mail:zhouhui-lg@163.com

赵凤军,中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部主任研究员,博士生导师。主要研究方向星载/机载 SAR 系统总体设计及信号处理。
E-mail: fjzhao@mail.ie.ac.cn

禹卫东,中国科学院电子学研究所研究员、博士生导师,研究方向为星载 SAR 系统设计,高分辨率 SAR 新体制,多极化 SAR,干涉 SAR 等。
E-mail: ywd@mail.ie.ac.cn

(上接第 134 页)

[8] 秦廷楷. 微带交指型电容的变分分析[J]. 通信学报,1988, 9(4): 88-91.

[9] 田唯人,麻媚香. 带状线交指滤波器电容间隙的准确设计[J]. 火控雷达技术,2007, 36(6): 97-102.

[10] 刘砚涛,刘玉蓓,尹伟. LC 滤波器设计方法介绍及其仿真特性比较[J]. 电子测量技术,2010(5):17-21.

[11] 冯佳,李佩玥,徐立松,等. 基于反馈的交流激励式电容测量电路设计[J]. 国外电子测量技术,2014(11):

38-42.

作者简介

胡玉琛,1990 年出生,硕士研究生,主要研究方向:高速 PCB 设计、FPGA 编程和数字视频处理。

刘一清,1968 年出生,教授级高级工程师,主要研究方向:数字视频及数字化显示、高速 PCB 设计。