

一种利用目标微动特性提高 SAR-MMTI 检测性能的方法

晏艺翡, 廖桂生, 杨志伟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 地面运动目标除具有匀速、匀加速等平动的运动形式外, 还可能存在如摆动, 振动, 旋转等周期性的微动形式, 而传统的二阶距离近似模型不能准确描述微动目标的斜距历程. 本文通过建立多通道合成孔径雷达地面微动目标几何模型, 借助成对回波理论与 SAR 成像算法, 推导出了微动目标图像域回波的矢量表达式, 分析了微动导致的单通道方位散焦及其对通道间干涉相位的影响. 设立回波的鬼影点的归一化幅度及鬼影点空域导向矢量与杂波空域导向矢量间相关系数这两个性能指标, 仿真验证了在较强杂波环境中, 利用鬼影点对地面运动目标进行检测仍具有良好的改善因子性能.

关键词: 多通道; 微动; 鬼影点; 干涉相位; 空域导向矢量; 杂波抑制

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)06-1050-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.06.002

A Method for Improving SAR-MMTI Performance Based on Micro-motion Features

YAN Yi-fei, LIAO Gui-sheng, YANG Zhi-wei

(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: In addition to the bulk motion induced by constant velocity or uniform acceleration, the target or any structure on it may undergo micro-motion dynamics, such as mechanical rocking, vibrations, or rotations. The traditional range model approximated by second-order polynomials is not suitable for describing the range from a radar to the micro-motion targets. In this paper, combining with Paired Echo Principle and Range-Doppler (R-D) algorithm in synthetic aperture radar (SAR), we derive the vector expression which indicates the multi-channel echo of the ground moving micro-motion target in image domain on the basis of setting up its geometrical model, and analyze the azimuth defocusing in single-channel and the interferometric phase between channels induced by micro Doppler. The normalization of the amplitude of the echo of different ghost points and the correlation coefficient of the spatial steering vectors between each ghost point and clutter are introduced. The result of simulation demonstrates that making use of the ghost points to detect the ground moving target has good improvement factor in strong clutter background.

Key words: multi-channel; micro-motion; ghost points; interferometric phase; spatial steering vector; clutter suppression

1 引言

将合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR)^[1] 技术与地面运动目标显示 (Ground Moving Target Indication, GMTI) 技术相结合, 能够在获得场景高分辨率 SAR 图像的同时检测出场景中的运动目标. 目前, 有关 SAR-GMTI^[2] 技术的研究主要集中于匀速或匀加速的运动目标, 且一般采用二阶近似距离模型对其进行重聚焦成像^[3]. 在此基础上, 文献[4]引入偏置相位中心天线 (DP-CA) 技术将场景回波相减以对消地杂波. 文献[5]则利

用沿航迹干涉 (ATI) 技术将不同通道接收的场景回波共轭相乘以提取干涉相位、区分慢速目标与地杂波. 文献[6]采用了空间与时间二维联合的自适应处理方法, 充分利用机载雷达地杂波的空时二维耦合性来抑制杂波.

而在现实环境中, 侦查区域可能存在一些“特殊”运动的目标, 如敌方阵地车辆上的旋转天线、车辆由于发动机运转引起的振动等. 这些目标或部件的非匀加速运动使回波包含复杂的非线性相位历史, 造成多普勒调频率时变, 即微多普勒效应 (Micro-Doppler)^[7]. 文献[8]分析并验证了单通道下目标的微多普勒效应, 即相比普通

运动目标,微动还可造成除图像散焦和偏移之外的特殊的 SAR 图像特征,如鬼影,灰度条带,直线圆列等.实际环境中,地面目标常处在强地杂波环境中,在单天线情况下,回波中的大量强杂波使得淹没其中的微动目标难以检测.而多通道系统因其良好的杂波对消性,可实现低信噪比下慢速目标的检测.文献[9]提出了一种基于双通道 SAR/DPCA 杂波抑制的微多普勒提取方法,即在复原始数据域将斜距配准后的振动目标回波信息进行相减以对消地杂波.文献[10,11]分别在单基地雷达体制和双基地雷达体制下将配准后的两通道回波在数据域共轭相乘以提取其干涉相位.以上两种目标检测的方法均是将在数据域进行处理,由于配准后的微动目标的斜距中存在 $A\cos[\omega(t+mT)]$ 项,当 ωmT 为 2π 的整数倍时,信号经 DPCA 后的幅值或经 ATI 后的相位均为 0,此时检测不到微动目标,这一现象被称为“盲频”^[10].为了克服这一缺陷,考虑将微动目标回波在图像域进行多通道处理,并利用多通道间目标的空域导向与杂波导向的差异来抑制杂波.

本文结合成对回波理论与 SAR 成像算法,建立了多通道 SAR 地面微动目标回波几何模型,推导出该模型下目标图像域回波的矢量表达式,分析了微动目标对单通道方位散焦及其对通道间回波干涉相位的影响.以各鬼影点回波相对目标无微动时回波的归一化幅度为性能指标,揭示了微动幅度对动目标检测带来的影响;此外,还定量分析了鬼影点空域导向矢量与杂波空域导向矢量的相关系数对杂波抑制性能带来的影响.最后,仿真实验验证了理论分析的正确性,可为强杂波背景下利用鬼影点检测地面运动目标提供有力支撑.

2 信号模型

2.1 微动目标斜距模型

假设沿航迹 N 通道正侧视雷达的空间坐标系及观测示意图如图 1 所示:以平行航线方向为 X 轴,地距向相反方向为 Y 轴,竖直向上方向为 Z 轴建立坐标系.平台速度为 V_a ,高度为 H ,雷达采用自发自收的工作方式,相邻两天线物理间距为 d ,该体制下观测地面上—行进行中车辆.由于汽车发动机怠速抖动以及车上旋转天线部件的存在,该目标除具有平动外,还存在振动与旋转的微动形式.假设点 P_{z0} 为车辆质心,具有方位向平动速度 V_x 及距离向平动速度 V_y ,散射点 P_z 以车辆质心 P_{z0} 为中心沿竖直方向上下振动,振幅为 A_z ,振动角频率为 ω_z ;散射点 P_r 绕质心 P_{z0} 在 XOY 面内以半径为 r ,角速度为 ω_r 旋转.

记慢时间为 t_m ,不失一般性,假设初始时刻振动点 P_z 与旋转点 P_r 相对载机在方位向的距离均为 0,初始

相位 φ_0 均为 0. t_m 时刻质心 P_{z0} 平动至 P_{z0}' 处,振动点 P_z 以 P_{z0}' 为中心竖直振动至 P_z' 处,旋转点 P_r 绕 P_{z0}' 在 XOY 面内绕至 P_r' 点.

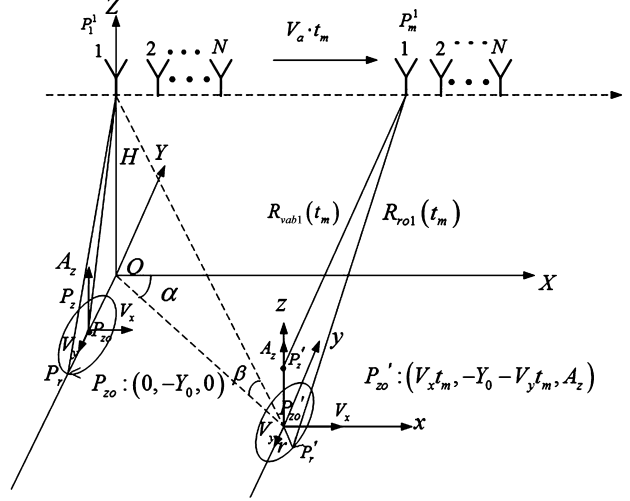


图1 SAR地面微动目标几何结构

对于旋转点 P_r' ,该散射点到质心 P_{z0}' 的半径矢量为 $\mathbf{r}(t_m) = P_r' P_{z0}' = [r_{xt}, r_{yt}, r_{zt}]^T$,其中 $r_{xt} = r\cos(\omega_r t_m + \varphi_0)$, $r_{yt} = r\sin(\omega_r t_m + \varphi_0)$, $r_{zt} = 0$. t_m 时刻通道 1 位于 P_m^1 处,则通道 1 与散射点 P_r' 间的斜距可以表示为:

$$\begin{aligned} R_{r1}(t_m) &= \sqrt{H^2 + (V_a t_m - V_x t_m - r_{xt})^2 + (-Y_0 - V_y t_m - r_{yt})^2} \\ &\approx |P_{z0}' P_m^1| - \mathbf{r}(t_m) \cdot \frac{P_{z0}' P_m^1}{|P_{z0}' P_m^1|} \\ &= \sqrt{(V_a t_m - V_x t_m)^2 + (-Y_0 - V_y t_m)^2 + H^2} \\ &\quad + r\cos\beta\cos(\omega_r t_m + \alpha) \end{aligned} \quad (1)$$

该式的后一项由微动造成.令 $r' = r\cos\beta$ 得地面旋转目标的微多普勒为:

$$\begin{aligned} f_{dm}(t_m) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_r(t_m)}{d(t_m)} = \frac{1}{2\pi} \frac{d(4\pi R_{r1}(t_m)/\lambda)}{d(t_m)} \\ &\approx \frac{2}{\lambda} r' \omega_r \sin(\omega_r t_m + \varphi_0 + \alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

对于振动点 P_z' ,设 t_m 时刻该散射点在振动轴上相对于质心 P_{z0}' 的位置为 $A_z = A_v \cos(\omega_z t_m + \varphi_0)$,则通道 1 到散射点 P_z' 的斜距历程 $R_{z1}(t_m)$ 可写为:

$$\begin{aligned} R_{z1}(t_m) &= \sqrt{(H - A_z(t_m))^2 + (V_a t_m - V_x t_m)^2 + (-Y_0 - V_y t_m)^2} \\ &\approx |P_{z0}' P_m^1| - A_z(t_m) \cos\langle P_{z0}' P_z', P_{z0}' P_m^1 \rangle \\ &\approx \sqrt{(V_a t_m - V_x t_m)^2 + (-Y_0 - V_y t_m)^2 + H^2} \\ &\quad - A_v \sin\beta \cos(\omega_z t_m + \varphi_0) \end{aligned} \quad (3)$$

对式(3)中的后一项进行求导,令 $A_v' = A_v \sin\beta_0$ 可得地面振动目标的微多普勒:

$$f_{dm}(t_m) = -\frac{2}{\lambda} A_v' \omega_v \sin(\omega_v t_m + \varphi_0) \quad (4)$$

由式(2)和式(4)可见,地面振动目标与旋转目标的多普勒具有相同的形式.一般而言,可将旋转看为振幅较大、振动频率较小的振动.因此在后续处理中仅考虑振动.

2.2 微动目标多通道回波模型

设 V_r 为目标平动速度 V_y 与 V_x 沿径向方向(天线与目标连线)的投影, $A_r(t_m)$ 为目标相对于质心 P_{z0} 的距离 A_v 沿径向的投影,且假设 $A_r(t_m) = A_r \sin(\omega_v t_m)$. 可见式(3)可近似表示为:

$$\begin{aligned} R_1(t_m) &= \sqrt{(H - A_z(t_m))^2 + (V_{atm} - V_{xtm})^2 + (-Y_0 - V_{ytm})^2} \\ &\approx \sqrt{(R_0 + V_r t_m + A_r(t_m))^2 + V_a^2 t_m^2} \\ &= [R_0 + V_r t_m + A_r(t_m)] \cdot \sqrt{1 + \frac{V_a^2 t_m^2}{[R_0 + V_r t_m + A_r(t_m)]^2}} \\ &= R_0 + V_r t_m + A_r(t_m) + \frac{V_a^2 t_m^2}{2R_0} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $R_0 = \sqrt{H^2 + Y_0^2}$, 上式推导中利用了等价无穷小: $\sqrt{1+x} - 1 \sim \frac{1}{2} \cdot x$

同理可得第 i 个通道与目标间斜距为:

$$R_i(t_m) = R_0 + V_r \cdot t_m + A_r(t_m) + \frac{V_a^2(t_m - (i-1)\Delta t)^2}{2R_0}$$

由此目标回波经距离压缩后的方位信号形式可写为:

$$\begin{aligned} S_i(t_m) &= \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_i(t_m)\right) \\ &= \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} V_r t_m - j \frac{4\pi}{\lambda} A_r \sin(\omega_v t_m) - j \frac{2\pi V_a^2(t_m - (i-1)d/V_a)^2}{\lambda R_0}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $i = 1, \dots, N$ 为通道数. 根据成对回波原理和第一类贝塞尔函数的展开式^[9], 令 $b = -4\pi A_r/\lambda$, 后有

$$\begin{aligned} \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} A_r \sin(\omega_v t_m)\right) &= \exp(jb \sin(\omega_v t_m)) \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(b) \exp(jm \omega_v t_m) \end{aligned} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)得振动目标方位信号形式为:

$$S_i(t_m) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(b) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} V_r t_m + jm \omega_v t_m - j \frac{2\pi V_a^2(t_m - (i-1)d/V_a)^2}{\lambda R_0}\right) \quad (8)$$

3 微动对 SAR-GMTI 的影响

3.1 微动对方位聚焦的影响

文献[7,8]已对微动目标的成对回波现象及其原理(Paired Echo Principle, PEP)做了详细分析,为了本文的完整性,这里简要概述微动目标对单通道 SAR 成像的影响.假设不存在距离徙动,根据 PEP 理论,存在微动时成像中将会出现以点目标真实位置为中心的沿方位向成对分布的多个虚假目标,即鬼影点,也称成对回波,如图 2 所示. 尽管式(7)中 $\exp(jb \sin(\omega_v t_m))$ 的展开将会产生无穷项成对回波,但实际上对于给定的 b , $J_m(b)$ 随 m 的增大趋近于 0, 根据卡森准则^[12], 理论鬼影点数目为

$$M = 2N_{PE} + 1 \approx 2|b| + 3 \quad (9)$$

其中 $b = \frac{-4\pi A_r}{\lambda}$, 式(9)表明在雷达发射波长固定的情况下, 振动幅度(或旋转半径)越大, 鬼影数目越多.

由 Fourier 变化理论知, 式(8)中的指数项将导致多重对称的多普勒频移, 相邻回波间的多普勒频移为 $f_m = \omega_v/2\pi$, 如图 3 所示. 旋转目标的成像结果会由于目标运动幅度较大而使目标能量跨越几个距离单元, 从而形成如图 4 所示的“灰度条带”.

3.2 微动对多通道处理的影响

定义 $\Delta t = d/V_a$, 方位向多普勒调频 $\gamma = 2V_a^2/\lambda R_0$, 由目标平动造成的多普勒中心频率为 $f_d = 2V_r/\lambda$, 结合式(9)中理论鬼影点个数的表达式, 式(8)可进一步写为:

$$S_i(t_m) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(b) \exp(-j2\pi f_d t_m + jm \omega_v t_m - j\pi \gamma (t_m - (i-1)\Delta t)^2)$$

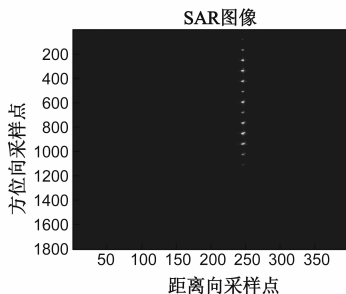


图2 鬼影点现象图

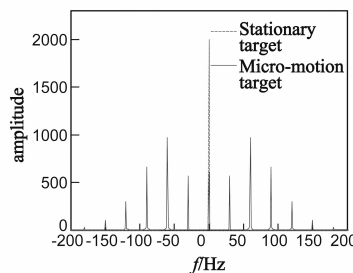


图3 单通道方位向成对回波

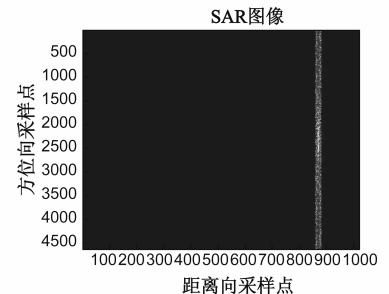


图4 灰度条带现象

$$\approx \sum_{m=1}^M J_m(b) \exp(-j2\pi f_d t_m + jm\omega_v t_m - j\pi\gamma(t_m - (i-1)\cdot\Delta t)^2) \quad (10)$$

其中, m 为鬼影点序列号, 且由式(9)知 m 的取值范围仅为 $m = 1, \dots, M$.

将 $S_{fi}(t_m) = \exp(j\pi\gamma(t_m + (i-1)\cdot\Delta t)^2)$ 作为方位向参考函数. 不同的通道选择不同的参考函数是为了使回波峰值时刻对准. 设 T 为合成孔径时间. 将数据域回波与方位向参考函数进行卷积后, 可得第 i 个通道振动目标的图像域回波:

$$y_i(t_m) = S_i(t_m) * S_{fi}(t_m) = \int_{t_m - T/2}^{t_m + T/2} S_i(\tau) \cdot S_{fi}(t_m - \tau) d\tau, \quad -T \leq t_m \leq T$$

以参考通道为例进行分析, 地面振动目标在第 1 个通道内的图像域回波如式(11)所示:

$$y_1(t_m) = \int_{t_m - T/2}^{t_m + T/2} \exp(-j2\pi f_d \tau - j\pi\gamma\tau^2 + \sum_{m=1}^M J_m(b) \cdot \exp(jm\omega_v \tau + j\pi\gamma(t_m - \tau)^2)) d\tau = \sum_{m=1}^M J_m(b) \exp(j\pi\gamma t_m^2) \cdot \int_{t_m - T/2}^{t_m + T/2} \exp(-j2\pi f_d \tau + jm\omega_v \tau - 2j\pi\gamma t_m \tau) d\tau = \frac{2}{C} \sum_{m=1}^M J_m(b) \exp(j\pi\gamma t_m^2 + jCt_m) \cdot \text{sinc}\left(\frac{CT}{2}\right) \quad (11)$$

其中, $C = -2\pi f_d + \omega_v m - 2\pi\gamma t_m$

同理可得第 i 个通道目标的图像域回波:

$$y_i(t_m) = \frac{2}{C} \sum_{m=1}^M J_m(b) \cdot \exp(j\pi\gamma t_m^2 + 2(i-1)j\pi\gamma t_m \Delta t + jCt_m) \cdot \text{sinc}\left(\frac{CT}{2}\right) \quad (12)$$

令式(12)中 $C = 0$ 可求得微动目标回波在单通道内的峰值时刻, 其中第 m 个鬼影点对应的峰值时刻为: $t_{m_max} = (\omega_v m - 2\pi f_d) / 2\pi\gamma$. 将该时刻分别代入式(11)与式(12)的相位项中, 可得第 m 个鬼影点各通道间的干涉相位为:

$$\Delta\varphi_m = (m \cdot \omega_v - 4\pi V_r / \lambda) \cdot d / V_a \quad (13)$$

由式(13)看出, 对于同一鬼影点, 不同通道接收到的信号相差一个由目标径向速度和振动角频率引起的干涉相位. 由该干涉相位可写出第 m 个鬼影点对应的 N 维空域导向矢量:

$$\mathbf{a}_{gm}(\omega_v, \mathbf{v}_r) = [1, e^{j\frac{d}{V_a}(m \cdot \omega_v - 4\pi V_r / \lambda)}, \dots, e^{j\frac{d}{V_a}(m \cdot \omega_v - 4\pi V_r / \lambda)}]^T \quad (14)$$

当式(14)中 $m = 0$ 时, 鬼影点的空域导向矢量退化为普通平动目标 N 通道下的空域导向. 另外, 由式(11)可知, 每个通道均出现 M 个鬼影点, 第 m 个鬼影点的

幅度由微动调制项 $\exp(jb \sin(\omega_v t_m))$ 按一阶贝塞尔函数展开的系数 $J_m(A_r)$ 表示, 其中 A_r 与 b 一一对应. 因此, 结合鬼影点的复包络 $J_m(A_r)$ 及空域导向矢量, 可构建单一鬼影点回波数据的矢量表达式. 例如第 m 个鬼影点的 N 通道回波数据矢量可写为:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_g^m &= J_m(A_r) \cdot \mathbf{a}_{gm}(\omega_v, \mathbf{v}_r) \\ &= J_m(A_r) \cdot [1, e^{j\frac{d}{V_a}(m \cdot \omega_v - 4\pi V_r / \lambda)}, \dots, e^{j\frac{d}{V_a}(m \cdot \omega_v - 4\pi V_r / \lambda)}]^T \end{aligned} \quad (15)$$

再联立所有 M 个鬼影点的回波数据, 得振动目标回波的数据矢量为:

$$\mathbf{X}_g(A_r, \omega_v, V_r) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_g^1(A_r, \omega_v, V_r)^T, \dots, \mathbf{X}_g^M(A_r, \omega_v, V_r)^T \\ \dots, \mathbf{X}_g^M(A_r, \omega_v, V_r)^T \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

以首个鬼影点 $m = 1$ 为例, 基于 LCMV 准则构造的最优加权矢量为 $\mathbf{w}_{opt-1} = \mu \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_{g1}(\omega_v, \mathbf{v}_r)$, 用该最优权对场景内数据进行波束形成, 在目标所处的距离单元内检测出多个峰值, 如图 5 所示.

为解释这一现象, 定义参数 $\rho_{gm} = |\mathbf{a}_{g1}^H \mathbf{a}_{gm}| / \sqrt{|\mathbf{a}_{g1}^H \mathbf{a}_{g1}| \cdot |\mathbf{a}_{gm}^H \mathbf{a}_{gm}|}$, 称 ρ_{gm} 为第 m 个鬼影点的导向与首个鬼影点导向的相关系数. 从相关系数表达式中可看出其取值范围为 $[0, 1]$, 且数值越大, 表示两导向间夹角越小, 相关程度越高. 图 6 画出了随 m 递增时 ρ_{gm} 的变化, 以此展现鬼影点间导向矢量的相关程度. 可见鬼影点的空域导向具有较大相关性, 这与图 5 中的多峰值现象相吻合.

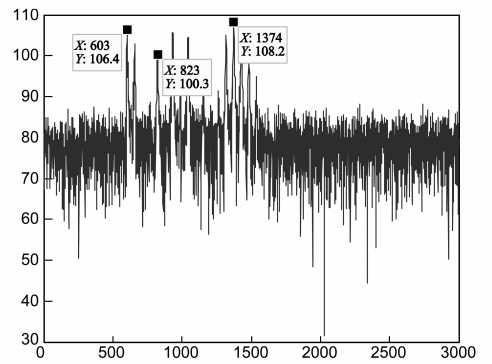


图5 波束形成

4 仿真实验

4.1 微动目标多通道回波的干涉相位特性

式(14)给出了微动目标回波通道间干涉相位的理论表达式, 本节利用给定的微动参数和 SAR 成像中的距离-多普勒(R-D)算法, 对干涉相位的理论值进行仿真验证. 仿真参数为: $\lambda = 0.02\text{m}$, 脉冲重复频率 PRF = 2048Hz, 信号带宽 150MHz, 俯仰角 $\beta_0 = 0.838\text{rad}$, $V_a =$

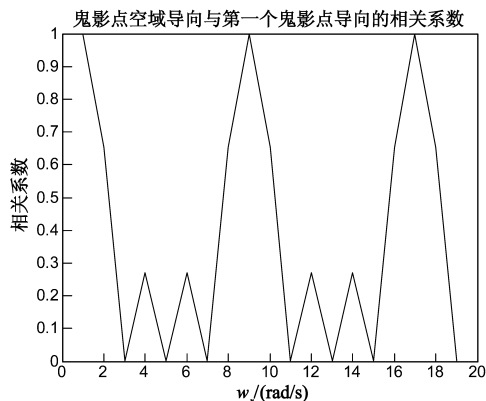


图6 $a_{gm}(\omega_p, \nu_r)$ 与 $a_{g1}(\omega_p, \nu_r)$ 的相关系数

200m/s, 方位向调频率 $\gamma = 594.6$, 目标沿径向振幅 $A_r = 0.0134\text{m}$, 振动角频率 $\omega_v = 32\text{rad/s}$, 振动初始相位 $\varphi_0 = -90^\circ$, 慢时间采样点 $N_{\text{slow}} = 3473$, 快时间采样点数 $N_{\text{fast}} = 898$, 由目标径向平动速度 V_r 造成的多普勒中心频率 $f_d = 185.8\text{Hz}$, 基线长 $d = 16V_a \cdot \text{PRT}$.

采用双通道 SAR 结构对地观测, 回波数据由仿真产生, 由式(9)中鬼影点个数与振幅间关系得该参数下可产生 19 个鬼影点. 为验证通道间干涉相位, 分别将通道一与通道二内的回波的每个幅度峰值点(鬼影点)所对应的相位画出, 如图 7 所示. 共有 19 个峰值点, 故每个通道内可统计出 19 个相位值, 进而将两通道回波数据的相位对应做差(即将图 7 中两条曲线对应相减)后再与理论干涉相位值比较, 理论值由(13)中的 $\Delta\varphi(m)$ 经取相角求得, 如图 8 所示.

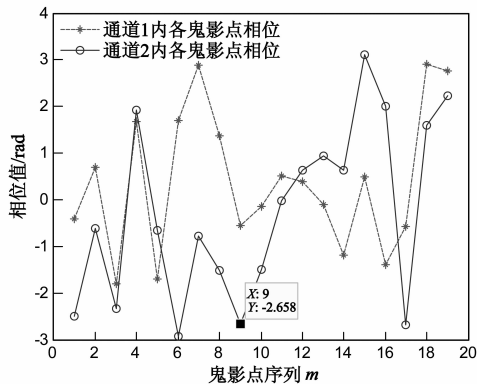


图7 双通道内鬼影点回波相位分布

可见, 干涉相位仿真值接近于 0, 与式(13)中理论值一致.

4.2 鬼影点幅度规律

由式(15)可知, 不同鬼影点的导向和幅度在具有统一构型的同时又存在差异, 探究这些差异带来的规律和性能, 能够为杂波抑制和微动目标检测提供便利.

单通道情况下, 引入回波归一化幅度这一性能指

标, 通过改变振动幅度, 分别寻找鬼影点最大能量与鬼影中心点(振动目标真实位置对应的成像点)能量的变换关系. 令振动幅度为 $0 \sim 3\text{cm}$, 其它仿真参数同仿真 4.1. 设 J_{ref} 为假设目标仅有平动速度 V_r 时回波的幅值, 该值为一常数. 分别画出鬼影中心点的幅度 $J_0(A_r)$ 以及最大幅度的鬼影点 $\max(J_m(A_r))$ 相对 J_{ref} 的归一化曲线.

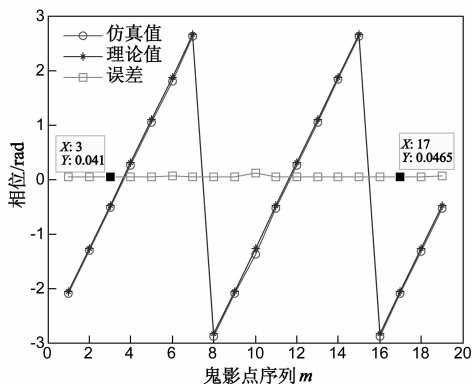


图8 通道间干涉相位理论与仿真值对比

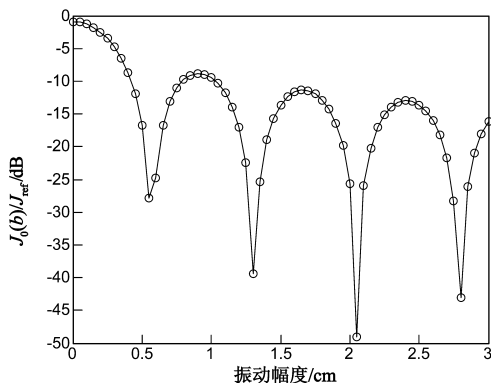


图9 不同振幅下的 $J_0(A_r)$ 归一化损失(dB)

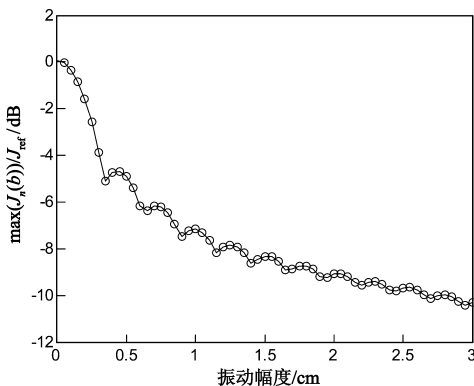


图10 不同振幅下的 $\max(J_m(A_r))$ 归一化损失(dB)

一般车辆的振动幅度在毫米量级, 结合图 9 可知, $J_0(A_r)$ 随振幅的增大呈较快速振荡衰减, 即若仅利用振动目标真实位置对应的成像点, 该点处能量在毫米量

级内(0~1cm),最大衰减已达-27dB,最小衰减在振幅为0.55cm时已达-10dB.这说明即使能有效抑制杂波,但因鬼影中心点处信噪比较低仍难以可靠的检测出振动目标.图10中,在相同量级区间内,max($J_m(A_r)$)随振幅的增大缓慢衰减,例如当振幅增大至1cm时能量只缓慢衰减至-7.16dB.尽管振动幅度的增大会加剧目标能量的散焦,可即便振幅增大至3cm,max($J_m(A_r)$)依然能维持缓慢衰减.这表明最大幅度鬼影点的能量较高且较为稳定,较高的信噪比使目标在杂波抑制过程中更易检测.

4.3 鬼影点导向与杂波导向的相关度

为探究鬼影点空域导向矢量与杂波导向矢量的关系,定义性能参数 $\rho_{gc}(m, \omega_r) = | \mathbf{a}_{gm}^H \mathbf{a}_c | / \sqrt{ | \mathbf{a}_{gm}^H \mathbf{a}_{gm} | \cdot | \mathbf{a}_c^H \mathbf{a}_c | }$,称 $\rho_{gc}(m, \omega_r)$ 为第 m 个鬼影点的空域导向与杂波空域导向的相关系数.为更加直观的体现成对回波空域导向的特征,改变上文鬼影点 $m = 1 \cdots M$ 的标记方式,重新标记鬼影点中心为 0 号鬼影点 ($m = 0$),且两种标记方式不影响仿真结果.在平动径向速度 V_r 固定时,鬼影点空域导向矢量 $\mathbf{a}_{gm}(\omega_r, V_r)$ 仅由 ω_r 和鬼影点序列 m 确定.图11仿真计算了4通道内不同鬼影点的空域导向矢量 \mathbf{a}_{gm} 与杂波空域导向矢量 \mathbf{a}_c 的相关系数 $\rho_{gc}(m, \omega_r)$,以此来观测鬼影导向与杂波导向之间的相关度.其中 $\mathbf{a}_c = [1, 1, 1, 1]^T$.

$\rho_{gc}(m, \omega_r)$ 越小,该鬼影点导向与杂波导向的正交性越好,区分度也就越大,在杂波抑制和目标检测中该

鬼影点空域导向与杂波导向的相关系数

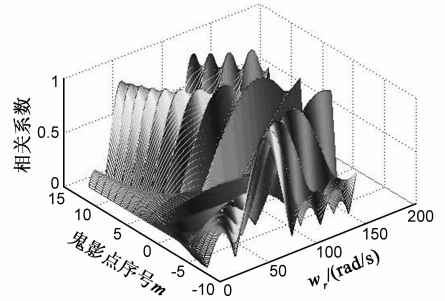


图11 鬼影点空域导向与杂波导向的正交性

导向的利用价值越高.为了更直观的体现随鬼影点 m 与 ω_r 的变化目标导向与杂波导向的区分程度,引入参数 F ,满足:

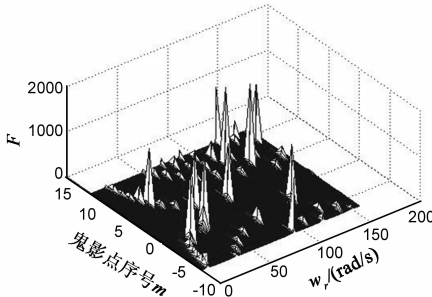
$$F(m, \omega_r) = 1 / \rho_{gc}(m, \omega_r) \quad (17)$$

由图12可见,除鬼影中心点 $m = 0$ 外,其他位置的鬼影点导向与杂波导向也存在较大区分度,此特性在 $V_r = 0.5\text{m/s}$ 时体现的更为明显,如图12中的右图所示,随着鬼影点与振动(旋转)角频率的不同,目标导向矢量与杂波导向矢量的区分度在 $V_r = 0.5\text{m/s}$ 时更为显著.可见,当目标平动速度不明显时,由于 f_d 很小,无振动目标与杂波已很难分辨,而可以产生鬼影点的振动目标仍具有较好的可检测性.

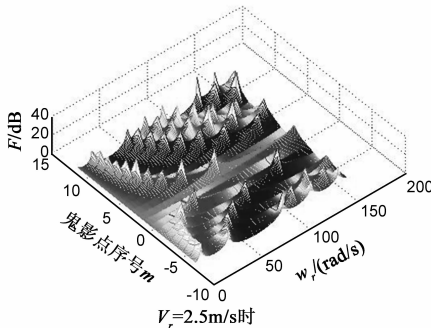
4.4 杂波抑制改善因子

通常对于杂波抑制的性能分析,普遍借助改善因子这一性能指标.这里将改善因子定义为输出信噪

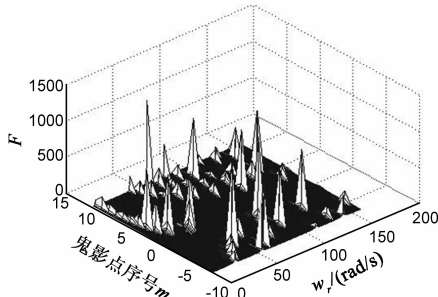
鬼影点空域导向与杂波导向的区分度



鬼影点空域导向与杂波导向的区分度



鬼影点空域导向与杂波导向的区分度



鬼影点空域导向与杂波导向的区分度

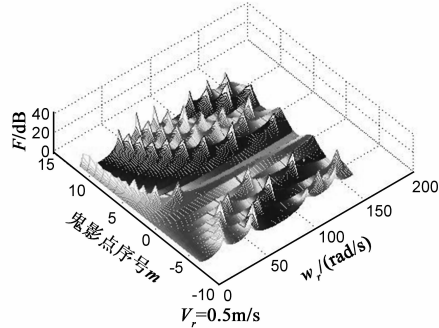


图12 不同鬼影点空域导向与杂波的区分度

比与输入信杂噪比的比值. 在已知地面微动目标的空域导向矢量的前提下, 借助 IF 曲线, 比较仅利用目标平动信息与目标还具有微动时输出信杂噪比的改善情况.

下面给出 IF 曲线的公式, 其中 b 为信号幅值, $|b|^2$ 为信号功率, σ_{ni}^2 为噪声功率, $\mathbf{a}_{gm}(\omega_r, V_r)$ 为地面微动目标的空域导向. 则可推导 IF 表达式如下:

$$\text{由于输入信杂噪比为: } \text{SCNR}_i = \frac{|b|^2}{(\text{CNR} + 1)\sigma_{ni}^2}$$

自适应权为 $\mathbf{w} = \mu \mathbf{R}_{cn}^{-1} \mathbf{a}_{gm}(\omega_r, V_r)$, 且波束形成的输出为: $y = \mathbf{w}^H \mathbf{b} \cdot \mathbf{a}_{gm}(\omega_r, V_r)$

$$\begin{aligned} \text{SCNR}_0 &= \frac{|b|^2 \mathbf{w}^H \mathbf{a}_{gm}(\omega_r, V_r) \mathbf{a}_{gm}^H(\omega_r, V_r) \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{cn} \mathbf{w}} \\ &= |b|^2 \mathbf{a}_{gm}^H(\omega_r, V_r) \mathbf{R}_{cn}^{-1} \mathbf{a}_{gm}(\omega_r, V_r) \end{aligned}$$

由此可得

$$\text{IF} = \text{SCNR}_0 / \text{SCNR}_i$$

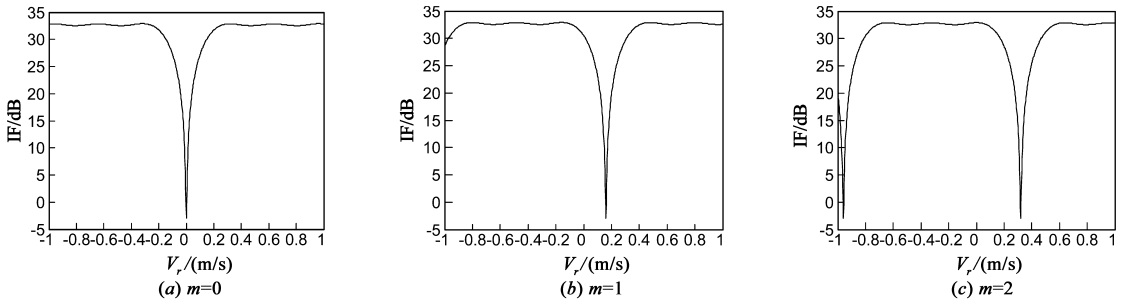


图13 4通道下取 $m=0,1,2$ 时的IF曲线

故若以速度为横坐标, 则每次的平移量为 $\frac{\lambda \omega_r}{4\pi}$. 在仿真参数下计算的该平移量为 0.16m/s, 与仿真结果相符. 图 13 说明, 若能利用目标的振动信息(即 $m\omega_r$ 项), 即使在目标的径向速度很小甚至趋近于 0 时也能对目标进行很好的检测.

以上是单个鬼影点的空域导向矢量代入 IF 的公式计算, 下面借助仿真将 4 通道内该仿真参数下产生的 19 个鬼影点的空域导向矢量进行联合, 形式如式(16)中的所有 M 个鬼影点的联合数据矢量. 这样一来, 目标的空域导向矢量为 76×1 维. 仿真结果如图 14 所示

由图 14 可见, 利用众鬼影点的联合空域导向矢量依然可以在目标径向平动速度很小时, 有效检测出目标.

5 结论

地面微动目标具有特殊的微多普勒特性, 在目标聚焦成像中, 这些特性会带来如成对回波, 鬼影点等一系列现象. 而在多通道 SAR 检测地面微动目标的过程中, 微动特性的存在也为较强地杂波环境中目标的检测提供了有效的途径. 本文通过推导多通道 SAR 地面

$$= \mathbf{a}_{gm}^H(\omega_r, V_r) \mathbf{R}_{cn}^{-1} \mathbf{a}_{gm}(\omega_r, V_r) (\text{CNR} + 1) \sigma_{ni}^2 \quad (18)$$

仿真参数如 4.1, 图 13 给出了 4 通道下分别利用不同鬼影点(仅以 $m=0, 1, 2$ 为例)的空域导向所形成的 IF 曲线. 其中 m 为鬼影点序号, $m=0$ 对应鬼影中心点, 即目标若无微动时的真实成像点. 由于基线长度 $d = 16 V_a \cdot \text{PRT}$, 根据盲速的定义: 当 $\exp(4\pi d V_r / \lambda V_a) = 0$, 即目标径向速度 $V_r = \lambda / (32 \cdot \text{PRT}) = 1.28 \text{m/s}$, 该目标导向与杂波导向一致, 无法检测该目标. 故将速度区间定义在 $[-1, 1] \text{m/s}$. 如图 13 所示, 若利用单个鬼影点的空域导向矢量进行 IF 计算, 随着选取的鬼影点不同(鬼影点序号 m 的递增), IF 曲线的凹陷处的横坐标会出现等间隔的平移. 由式(13)知

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_{md} &= \exp\left(j \frac{d}{V_a} (m\omega_r - 4\pi V_r / \lambda)\right) \\ &= \exp\left(j \frac{d}{V_a} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\lambda m \omega_r}{4\pi} - V_r\right)\right)\right) \end{aligned} \quad (19)$$

微动目标图像域回波的矢量式, 找出其目标回波各鬼影点间幅度与导向的分布规律, 结合该规律, 通过仿真分析对比了微动目标与普通平动目标在多通道 SAR 目标检测中的差异, 并由此揭示这一差异对抑制地杂波、检测微动目标所带来的良好的可利用性.

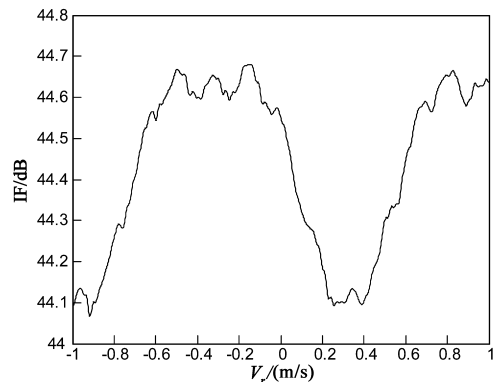


图14 利用所有鬼影点构造联合空域导向矢量时的IF曲线

参考文献

[1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业

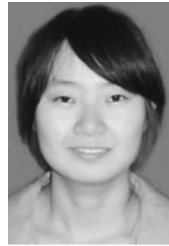
出版社,2005.

- [2] Ender J H G. Detection and estimation of moving target signals by multi-channel SAR[J]. Aeu-Archiv fur Elektronik und U-bertragungstechnik-International Journal of Electronics and Communacations, 1996, 50(2): 150 - 156.
- [3] Perry R P, Dipietro R C, Fante R. SAR imaging of moving targets[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 1999, 35(1): 188 - 200.
- [4] Nohara T J. Comparison of DPCA and STAP for space-based radar[A]. Radar Conference, 1995, Record of the IEEE 1995 International[C]. Alexandria, VA: IEEE, 1995. 113 - 119.
- [5] Chapin E, Chen C W. Along-track interferometry for ground moving target indication[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 2008, 23(6): 19 - 24.
- [6] Melvin W L. A stap overview[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 2004, 19(1): 19 - 35.
- [7] Chen V C, Li F, Ho S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2006, 42(1): 2 - 21.
- [8] Li X, Deng B, Qin Y, et al. The influence of target micromotion on SAR and GMTI[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2011, 49(7): 2738 - 2751.
- [9] Chen Y B, Deng B, Wang H Q, et al. Vibration target detection and vibration parameters estimation based on the DPCA technique in dual-channel SAR[J]. Science China Information Sciences, 2012, 55(10): 2281 - 2291.
- [10] Zhang W, Tong C. Micro-Doppler extraction of vibrating target based on dual-channel ATI technique in SAR[A]. Zhang Q. 2010 Second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing (IITA-GRS)[C]. Qingdao: IEEE, 2010. 422 - 425.

- [11] Zhang W, Tong C. Bistatic micro-Doppler radar signatures of vibrating targets with along-track interferometry[A]. Ren L. IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Communications [C]. Beijing: IEEE, 2011. 505 - 508.

- [12] 曹志刚, 钱亚生. 现代通信原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

作者简介



晏艺翡 女, 1990 年生于陕西西安, 西安电子科技大学硕士研究生, 研究方向为微动目标的成像与检测.

E-mail: yanyifei112@126.com



廖桂生 男, 1963 年生于广西桂林, 现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室教授, 博士生导师, 1999 年获教育部颁发的首批“新世纪百千万人才工程国家级人选”, 2008 年获国家杰出青年科学基金, 在国内外发表学术论文 160 余篇, 现主要从事雷达探测系统信号处理、包括空时自适应处理、天基预警和阵列信号处理研究领域.

E-mail: gsliao@xidian.edu.cn

杨志伟 杨志伟男, 博士, 1980 年生于四川南充. 现为西安电子科技大学雷达信号处理国防科技重点实验室副教授, 主要从事阵列信号处理、空时极化自适应处理、地面运动目标检测和天基预警领域研究.

E-mail: yangzw@mail.xidian.edu.cn