

# 基于微多普勒效应的 ISAR 成像干扰新方法

李 松<sup>1</sup>, 何 劲<sup>2</sup>, 冯有前<sup>4</sup>, 刘昌云<sup>1</sup>, 张 群<sup>2,3</sup>

(1. 空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800; 2. 空军工程大学电讯工程学院, 西安 710077;  
3. 复旦大学波散射与遥感信息国家教育部重点实验室, 上海 200433; 4. 空军工程大学理学院, 西安 710077)

**摘 要:** 本文从分析雷达目标微多普勒效应的产生机理出发, 提出了针对 ISAR 成像的干扰新方法。一方面, 针对现有基于微多普勒特征的雷达目标识别技术, 干扰机将接收到的雷达信号进行移频和幅度调制处理后转发, 生成虚假的微多普勒特征, 实现对敌方雷达系统的欺骗干扰; 另一方面, 利用微多普勒效应对雷达回波的附加调制作用, 干扰机发射虚假微多普勒信号, 通过降低回波各次距离像之间的相关性和破坏距离像的初相信息, 可有效干扰敌方成像系统的运动补偿处理, 并在方位向生成干扰条带, 对敌方 ISAR 系统形成“灵巧”抑制干扰, 使其无法实现对目标的有效成像。仿真和实测数据处理均表明基于微多普勒效应的干扰方法可在较低干信比条件下实现对 ISAR 成像系统的有效干扰。

**关键词:** 欺骗干扰; 抑制干扰; 微多普勒; 雷达成像; 目标识别

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2012)06-0736-10

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2012.06.008

## A Novel Jamming Method for Dechirping ISAR Based on Micro-Doppler Effect

LI Song<sup>1</sup>, HE Jin<sup>2</sup>, FENG You-qian<sup>4</sup>, LIU Chang-yun<sup>1</sup>, ZHANG Qun<sup>2,3</sup>

(1. Missile Institute, AFEU, Sanyuan 713800, China; 2. Telecommunication Engineering Institute, AFEU, Xi'an 710077, China;  
3. Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information, Fudan University, Shanghai 200433, China;  
4. Science Institute, AFEU, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** A novel algorithm for ISAR (inverse synthetic aperture radar) jamming based on the micro-Doppler effect is proposed in the paper. A deception jamming method is presented first, in which the radar signals are repeated by the jammer with additional illusive micro-Doppler signatures after frequency-shift and amplitude-modulation. When receiving these jamming signals, the imaging radar will be confused. On the other hand, because of the additional modulation of the micro-Doppler effect to the radar echoes, the illusive micro-Doppler signals transmitted by the jammer can reduce the correlation between the range profiles, distort the initial phases, and form interference stripes along the azimuth direction. Therefore, another “smart” barrage jamming method is presented based on the micro-Doppler effect. The results of both simulated and measured data prove the effectiveness of these methods with relatively low jam-to-signal ratio.

**Key words:** Deception jamming; Barrage jamming; Micro-Doppler; Radar imaging; Target recognition

### 0 引 言

随着高分辨时频分析技术的发展与成熟, 基于微多普勒效应的 ISAR 目标特征提取技术在特殊目

标的分类与精确识别中展示出越来越大的潜力<sup>[1-3]</sup>。为实现有效的电子反侦察, 提高己方目标的生存率, 研究针对 ISAR 成像及其微动特征提取的干扰技术具有重要意义。

收稿日期: 2011-06-24; 修回日期: 2012-05-04

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(61102109); 陕西省自然科学基金(2010JQ8007)

目前国内针对 ISAR 干扰已开展了一定的研究工作<sup>[4-7]</sup>。当前研究的针对 ISAR 的干扰技术大都是欺骗式干扰技术。目前直接利用 ISAR 像进行目标识别较为困难,通常需结合目标其它特征进行辅助识别。近几年来,从激光雷达中引入的微多普勒效应为 ISAR 目标的精确识别提供了重要的辅助信息<sup>[1-3,8-9]</sup>。要实现对方成像系统的有效干扰,不仅需研究针对 ISAR 成像的干扰方法,还必须研究针对微多普勒特征提取技术的干扰方法。

从现有公开发表的文献来看,目前基于微多普勒效应的 ISAR 成像干扰研究并不多见。文献[10]提出了在地面放置旋转角反射器,利用其微多普勒效应干扰 ISAR 成像的方法,其应用背景实质上更为倾向于针对 SAR 系统的干扰。事实上,在 ISAR 成像中,雷达目标的微多普勒效应具有“双刃剑”的作用:一方面,它可为目标识别提供重要的特征信息,另一方面,由于微多普勒信号在方位向无法正确聚焦,当其功率较强时,将对 ISAR 像带来污染,造成成像质量下降。因此,要实现对方 ISAR 成像系统的有效干扰,可从两方面进行考虑:一是通过侦察雷达信号参数,对其进行特定参数的调制后转发,形成虚假的微多普勒特征信号,从而达到干扰敌方成像系统后续特征提取与目标识别的目的,这种干扰方式能够以很低的干信比实现对敌方的欺骗干扰;二是利用微多普勒信号对回波信号方位向压缩带来的负面影响,干扰机发射具有较强功率的虚假微多普勒信号,降低各次距离像之间的相关性,并破坏复距离像的初相信息,干扰成像系统的方位向聚焦处理,且在方位向形成干扰条带,从而实现对方 ISAR 成像的“灵巧”压制干扰,与常规的压制性干扰相比,该方法能以相对很低的干信比使敌方的成像系统无法正常工作。基于这样的思路,本文从分析 ISAR 中雷达目标微多普勒效应的产生机理出发,提出了基于微多普勒效应的欺骗式干扰和压制式干扰方法,实现了以较低干扰功率有效干扰 ISAR 成像系统的目的。

1 ISAR 中微多普勒效应产生机理

设雷达与含微动部件目标的几何关系如图 1 所示。

图 1 中,目标被等效为转台模型, X 轴方向为方位向, Y 轴方向为距离向, O 为等效转台中心, O 点到

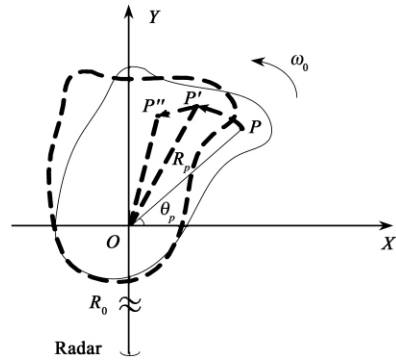


图 1 包含微动部件的目标 ISAR 成像模型

Fig. 1 The IASR imaging model of micro-motion targets

雷达距离为  $R_0$ 。在成像过程中,目标以角速度  $\omega_0$  转过一个很小的角度,目标上点  $P$  由此转动到点  $P'$ 。除了随目标整体转动外,  $P$  点同时存在微动,因此  $P$  点的实际空间位置已变为  $P''$  点。若雷达辐射线性调频信号,忽略回波幅值系数条件下,慢时间  $t_m$  时刻  $P$  点的回波信号为

$$s_p(t, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau_p(t_m)}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c(t - \tau_p(t_m)) + \frac{1}{2}\mu(t - \tau_p(t_m))^2\right)\right) \quad (1)$$

其中  $t$  为快时间,  $T_p$  为脉冲宽度,  $f_c$  为起始载频,  $\mu$  为调频斜率,  $\tau_p(t_m)$  为  $t_m$  时刻  $P$  点到雷达的距离往返延迟。取  $O$  点为参考点,则参考信号可写为

$$s_0(t, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau_0}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c(t - \tau_0) + \frac{1}{2}\mu(t - \tau_0)^2\right)\right) \quad (2)$$

$\tau_0 = 2R_0/c$  为  $O$  点到雷达的距离往返延迟,  $c$  为光速。解线调处理后得到

$$s_c(t, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau_p(t_m)}{T_p}\right) \cdot \exp(j2\pi\mu(t - \tau_0)\Delta\tau(t_m)) \cdot \exp(-j2\pi f_c\Delta\tau(t_m)) \cdot \exp(j\pi\mu\Delta\tau^2(t_m)) \quad (3)$$

其中  $\Delta\tau(t_m) = \tau_p(t_m) - \tau_0$ 。

对式(3)在快时间域进行傅立叶变换并去除 RVP 项和包络斜置项后得到

$$S_c(f, t_m) = T_p \operatorname{sinc}\left(T_p\left(f + \frac{2\mu}{c}\Delta R(t_m)\right)\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R(t_m)\right) \quad (4)$$

其中  $\Delta R(t_m)$  为  $t_m$  时刻  $P$  点到雷达距离与  $O$  点到雷达距离之差。设初始时刻  $P$  点到  $O$  点距离为  $R_p$ ,  $OP$  与  $X$  轴的夹角为  $\theta_p$ ,  $P$  点的微动位移矢量为  $\mathbf{r}_p(t_m)$ , 由于  $R_p$  远小于  $R_0$ , 因此有

$$\begin{aligned} \Delta R(t_m) &= R_p \sin(\omega_0 t_m + \theta_p) + \mathbf{r}_p^T(t_m) \cdot \mathbf{n} \\ &\approx R_p \sin\theta_p + R_p \cos\theta_p \cdot \omega_0 t_m + \mathbf{r}_p^T(t_m) \cdot \mathbf{n} \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $\mathbf{n}$  为雷达视线方向即  $Y$  轴方向的单位向量。由 (4) 式可知, 完成距离压缩后回波信号在距离向上聚焦为 sinc 函数, 其峰值位置反映了散射点与参考点之间距离在视线方向上的投影值。在忽略微动散射点影响的条件下, 对各次回波信号进行包络对齐, 得到<sup>[10]</sup>

$$\begin{aligned} S_c(f, t_m) &= T_p \operatorname{sinc}\left(T_p\left(f + \frac{2\mu}{c}(R_p \sin\theta_p + \mathbf{r}_p^T(t_m) \cdot \mathbf{n})\right)\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R(t_m)\right) \end{aligned} \quad (6)$$

此时由目标整体转动引起的包络在距离向和方位向上的耦合已被消除。因此  $t_m$  时刻  $P$  点在距离像上的峰值位置为

$$\begin{aligned} f(t_m) &= -\frac{2\mu}{c}(R_p \sin\theta_p + \mathbf{r}_p^T(t_m) \cdot \mathbf{n}) \\ &= -\frac{2\mu}{c}(OP + \mathbf{r}_p^T(t_m)) \cdot \mathbf{n} \end{aligned} \quad (7)$$

若从  $f-t_m$  平面上观察,  $P$  点将呈现为一条对应其运动方程  $\mathbf{r}_p(t_m)$  的曲线, 该曲线反映了微动点在雷达视线方向上的运动规律, 即 ISAR 中目标微动引起的微多普勒效应。

## 2 基于微多普勒效应的欺骗式干扰

在分析目标微多普勒效应产生机理的基础上, 我们可以通过截获敌方雷达发射信号, 从目标本身的微动特性出发, 在干扰机中生成对应具有特定目标微动形式的微多普勒信号, 再转发给敌方雷达接收机, 使其在距离向压缩后得到虚假的微多普勒特征, 从而干扰其对己方目标的正确识别。在分析干

扰信号的调制方式前, 首先给出解线调处理中的时移与频移等价关系。

### 2.1 解线调处理中时移与频移的等价性

雷达发射线性调频信号形式为

$$p_0(t) = \operatorname{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right) \quad (8)$$

对其时移  $\tau$  后得到

$$\begin{aligned} p_1(t) &= \operatorname{rect}\left(\frac{t-\tau}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c(t-\tau) + \frac{1}{2}\mu(t-\tau)^2\right)\right) \end{aligned} \quad (9)$$

$p_1(t)$  与  $p_0(t)$  做解线调处理得到

$$\begin{aligned} p_{c1}(t) &= \operatorname{rect}\left(\frac{t-\tau}{T_p}\right) \exp(-j2\pi\mu t\tau) \cdot \exp(-j2\pi f_c \tau) \exp(j\pi\mu\tau^2) \end{aligned} \quad (10)$$

对上式关于  $t$  做傅立叶变换并去除 RVP 项和包络斜置项后得到

$$P_{c1}(f) = T_p \operatorname{sinc}(T_p(f + \mu\tau)) \exp(-j2\pi f_c \tau) \quad (11)$$

可见距离像峰值出现在  $f = -\mu\tau$  处。若对  $p_0(t)$  频移  $f_d$ , 有

$$p_2(t) = \operatorname{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu t^2 - f_d t\right)\right) \quad (12)$$

$p_2(t)$  与  $p_0(t)$  做解线调处理得到

$$P_{c2}(f) = T_p \operatorname{sinc}(T_p(f + f_d)) \quad (13)$$

可见距离像峰值出现在  $f = -f_d$  处。这说明对于基于解线调处理的一维距离成像, 就距离像峰值位置来说, 对发射信号的时延等效于对发射信号的频移, 只相差了一个相位因子。这是由于在消除 RVP 和包络斜置处理中, 由时延引起的非线性相位项被剔除了的缘故。

### 2.2 虚假微多普勒信息调制

雷达目标中较为常见的微动形式包括旋转、锥旋、进动等。下面阐述各种微动形式对应微多普勒信息的调制方法。

对于旋转形式的微动, 其与雷达的几何关系如图 2 所示。

图 2 中,  $O$  点为参考点,  $o'$  点为旋转运动部件的旋转中心, 由  $O$  点指向  $o'$  点的向量为  $\mathbf{R}_p$ ;  $QUVW$  为雷达坐标系,  $OXYZ$  为参考坐标系, 其坐标轴分别与

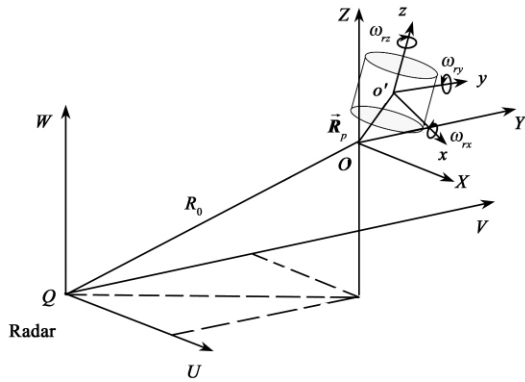


图 2 旋转运动三维几何示意图

Fig. 2 The three-dimensional geometric sketch map of wheeling motion

$QUVW$  对应坐标轴平行;  $o'xyz$  为目标本地坐标系; 目标以旋转角速度  $\omega_r = [\omega_{rx} \ \omega_{ry} \ \omega_{rz}]^T$ 、旋转半径  $r = [r_x \ r_y \ r_z]^T$  绕  $o'$  点做旋转运动。对于旋转部件上任一散射点  $P$ , 其在参考坐标系中的位移在雷达视线方向的投影为

$$\Delta R(t_m) = R_p^T \cdot n + [T_{rotating} R_{init} r]^T \cdot n \quad (14)$$

其中  $R_{init}$  为本地坐标系  $o'xyz$  到参考坐标系  $OXYZ$  的初始旋转矩阵, 设初始时刻  $o'xyz$  与  $OXYZ$  各坐标轴分别平行, 此时  $R_{init}$  为单位矩阵  $I$ ;  $T_{rotating}$  为点  $P$  在参考坐标系中的旋转矩阵<sup>[1]</sup>:

$$T_{rotating} = \exp(\hat{\omega}_r t_m) = I + \hat{\omega}_r \sin \Omega_r t_m + \hat{\omega}_r^2 (1 - \cos \Omega_r t_m) \quad (15)$$

其中  $\hat{\omega}_r = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{rz} & \omega_{ry} \\ \omega_{rz} & 0 & -\omega_{rx} \\ -\omega_{ry} & \omega_{rx} & 0 \end{bmatrix}$ ,

$$\vec{\omega}_r = [\omega_{rx} \ \omega_{ry} \ \omega_{rz}]^T = \omega_r / \|\omega_r\|,$$

$$\hat{\omega}_r = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{rz} & \omega_{ry} \\ \omega_{rz} & 0 & -\omega_{rx} \\ -\omega_{ry} & \omega_{rx} & 0 \end{bmatrix} \Omega_r = \|\omega_r\|$$

因此, 旋转形式的微动在  $f - t_m$  平面上对应的曲线方程为

$$f(t_m) = -\frac{2\mu}{c} \{ R_p^T \cdot n + [T_{rotating} r]^T \cdot n \} \quad (16)$$

由解线调处理中的频移性质可知, 要生成虚假的旋转微多普勒信息, 只需在干扰机中对雷达信号做相应频率调制即可, 调制函数可写为

$$J_r(t, t_m) = A(t_m) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi\mu}{c} [R_p^T \cdot n + [T_{rotating} r]^T \cdot n] t\right) \quad (17)$$

其中  $A(t_m)$  为幅度调制因子, 反映了旋转散射点散射系数随慢时间的变化。比如由直升机或螺旋桨飞机的旋翼引起的微多普勒信号, 在桨面正对雷达的较小角度内有着较强的反射系数, 而在其它角度内反射系数相对较低, 因此旋转散射点的散射系数实际上是时变的, 若进一步考虑散射点的遮挡效应, 则该时变性将更为明显, 为了生成尽量逼真的虚假微多普勒信号, 必须根据拟模拟的假目标散射特性来设计幅度调制因子  $A(t_m)$ 。

设干扰机到雷达的距离往返延迟为  $\tau_j = \tau_j(t_m)$ , 则当雷达发射 (8) 式所示的 LFM 信号时, 理想条件下干扰机接收到的雷达信号为

$$s_{j0}(t, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau_j/2}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{\tau_j}{2}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(t - \frac{\tau_j}{2}\right)^2\right)\right) \quad (18)$$

按 (17) 式对 (18) 式进行调制, 并考虑系统的处理时延  $\tau_d$ , 则干扰机转发的信号为

$$s_{j1}(t, t_m) = A(t_m) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_j/2 - \tau_d}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{\tau_j}{2} - \tau_d\right) + \frac{1}{2}\mu\left(t - \frac{\tau_j}{2} - \tau_d\right)^2\right)\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi\mu}{c} [R_p^T \cdot n + [T_{rotating} r]^T \cdot n] t\right) \quad (19)$$

上式再经过  $\tau_j/2$  的延迟即为敌方雷达接收到的干扰信号:

$$s_{j1}(t, t_m) = A(t_m) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_j - \tau_d}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c(t - \tau_j - \tau_d) + \frac{1}{2}\mu(t - \tau_j - \tau_d)^2\right)\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi\mu}{c} [R_p^T \cdot n + [T_{rotating} r]^T \cdot n] \left(t - \frac{\tau_j}{2}\right)\right) \quad (20)$$

假设干扰机的处理时延  $\tau_d$  足够小, 使得转发信

号仍处于雷达的当前脉冲处理时间内。不考虑 (20) 式中与  $t$  无关的相位因子影响, 可见敌方雷达接收信号为对干扰机所在位置散射点真实回波信号时延  $\tau_d$  和频移  $2\mu [\mathbf{R}_p^T \cdot \mathbf{n} + [\mathbf{T}_{\text{rotating}} \mathbf{r}]^T \cdot \mathbf{n}] / c$  并附加幅度调制  $A(t_m)$  后得到的。根据 2.1 节的推导, 则解线调后距离像上的峰值位置相对于干扰机所在距离单元的偏移量为

$$f(t_m) = -\mu\tau_d - 2\mu [\mathbf{R}_p^T \cdot \mathbf{n} + [\mathbf{T}_{\text{rotating}} \mathbf{r}]^T \cdot \mathbf{n}] / c \quad (21)$$

从而在敌方雷达系统中形成了虚假的微多普勒信息干扰。

同样地, 对于锥旋形式的微动, 设锥旋角速  $\omega_c = [\omega_{cx} \ \omega_{cy} \ \omega_{cz}]^T$ ,  $\hat{\omega}_c = [\hat{\omega}_{cx} \ \hat{\omega}_{cy} \ \hat{\omega}_{cz}]^T = \omega_c / \|\omega_c\|$ ,  $\Omega_c = \|\omega_c\|$  则锥旋部件上任一散射点  $P$  的位移在雷达视线方向的投影为

$$\Delta R(t_m) = \mathbf{R}_p^T \cdot \mathbf{n} + [\mathbf{T}_{\text{coning}} \mathbf{r}]^T \cdot \mathbf{n} \quad (22)$$

其中

$$\mathbf{T}_{\text{coning}} = \mathbf{I} + \hat{\omega}_c \sin \Omega_c t_m + \hat{\omega}_c^2 (1 - \cos \Omega_c t_m),$$

$$\hat{\omega}_c = \begin{bmatrix} 0 & -\hat{\omega}_{cz} & \hat{\omega}_{cy} \\ \hat{\omega}_{cz} & 0 & -\hat{\omega}_{cx} \\ -\hat{\omega}_{cy} & \hat{\omega}_{cx} & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

因此锥旋微多普勒信息的调制函数可写为

$$J_c(t, t_m) = A(t_m) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi\mu}{c} [\mathbf{R}_p^T \cdot \mathbf{n} + [\mathbf{T}_{\text{coning}} \mathbf{r}]^T \cdot \mathbf{n}] t\right) \quad (24)$$

对于进动形式的微动, 由于进动为自旋和锥旋的合成运动, 所以进动部件上任一散射点  $P$  的位移在雷达视线方向的投影为

$$\Delta R(t_m) = \mathbf{R}_p^T \cdot \mathbf{n} + [\mathbf{T}_{\text{coning}} \mathbf{T}_{\text{rotating}} \mathbf{r}]^T \cdot \mathbf{n} \quad (25)$$

相应的进动微多普勒信息调制函数为

$$J_p(t, t_m) = A(t_m) \cdot \exp\left(j \frac{-4\pi\mu}{c} [\mathbf{R}_p^T \cdot \mathbf{n} + [\mathbf{T}_{\text{coning}} \mathbf{T}_{\text{rotating}} \mathbf{r}]^T \cdot \mathbf{n}] t\right) \quad (26)$$

由于利用了敌方雷达成像系统一维距离脉压增益, 因此上述基于虚假微多普勒信息干扰的方法所需干信比很低, 实现也较为简单, 只需对侦察到的雷达信号做相应的频率调制即可。

### 3 基于微多普勒效应的压制式干扰

通常认为 ISAR 由于可获得二维脉压的高增

益, 因此具有较强的抗干扰能力, 但事实上方位向脉压的顺利实现是需要诸多条件的。在 ISAR 成像中, 对非合作运动目标的精确运动补偿是二维成像的关键, 普遍使用的基于参考点的运动补偿方法一般包括包络对齐和相位校正两个步骤。在准确运动的基础上, 再利用各次复距离像之间的相位关系, 经过方位向脉压实现二维成像。因此, 只要破坏包络对齐、相位校正和方位向脉压中某一步骤的顺利实施, 就可实现对 ISAR 成像的有效干扰。下面分别分析微多普勒干扰信号对该三个步骤的干扰效果。

#### 3.1 对包络对齐的干扰

现有包络对齐方法通常采用的是参考强散射点法、互相关法或其衍生的模 -1 距离法、最小熵法等, 这些方法应用的前提是基于短时间内各次目标距离像实包络或模值之间的高相似性。在对齐的过程中, 若目标的强散射中心在各次脉冲间位置变化剧烈, 各次距离像间相似度将大幅降低。当目标上存在微动散射点时, 按照 (6) 式, 微动点相邻两次距离像的模值可写为

$$u_1(f) = \left| T_p \text{sinc} \left( T_p \left( f + \frac{2\mu}{c} (R_p \sin \theta_p + \mathbf{r}_p^T(t_{m1}) \cdot \mathbf{n}) \right) \right) \right|$$

$$u_2(f) = \left| T_p \text{sinc} \left( T_p \left( f + \frac{2\mu}{c} (R_p \sin \theta_p + \mathbf{r}_p^T(t_{m2}) \cdot \mathbf{n}) \right) \right) \right| \quad (27)$$

当  $\mathbf{r}_p^T(t_m) \cdot \mathbf{n}$  随慢时间变化较为剧烈时,  $u_1(f)$  和  $u_2(f)$  之间的相关性将大幅降低, 从而使得包络无法对齐或错误对齐。特别是当微动点回波信号功率较强时, 其对包络对齐的影响更为明显。因此, 若干扰机生成具有较强功率的虚假微多普勒信号, 可有效地干扰 ISAR 成像的包络对齐。

#### 3.2 对相位校正的干扰

除了包络对齐外, 各次距离像中还包含平动分量表现出来的初相, 需做进一步的相位校正。目前应用较为成功的是基于特显点的相位校正方法, 即通过寻找存在孤立散射点的距离单元, 将该孤立散射点的位置作为转台的轴心, 将该距离单元内各次回波的相位校正为 0。当某距离单元只存在孤立特显点时, 其方位向回波序列的幅度近似为常数, 杂波和噪声的影响可能使其幅度有着轻微的起伏, 因此通常通过挑选幅度变化起伏小的距离单元作为特显点单元, 幅度的起伏度可用归一化幅度方差来衡

量<sup>[11]</sup>:

$$\sigma_{un}^2 = 1 - \bar{u}_n^2(t_m) / \bar{u}_n^2(t_m) \quad (28)$$

当采用单特显点法进行相位校正时,通常认为只有当某距离单元满足  $\sigma_{un}^2 < 0.12$  时,才可被选择作为特显点单元。若采用多特显点综合法或相位梯度自

聚焦(PGA)法时,由于可将多个特显点的相位校正数据进行加权求和并迭代修正,因此对  $\sigma_{un}^2$  的要求可适当放宽<sup>[12]</sup>。

当目标上存在  $i$  个微动散射点时,有

$$u_n(t_m) = \left| \sum_i S_{ci}(n, t_m) \right| = \left| \sum_i T_p \text{sinc} \left( T_p \left( f_n + \frac{2\mu}{c} (R_{pi} \sin\theta_{pi} + \mathbf{r}_{pi}^T(t_m) \cdot \mathbf{n}) \right) \right) \cdot \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} [R_{pi} \sin\theta_{pi} + R_{pi} \cos\theta_{pi} \cdot \omega_0 t_m + \mathbf{r}_{pi}^T(t_m) \cdot \mathbf{n}] \right) \right| \quad (29)$$

可见由于各微动散射点之间相位的差异变化,  $u_n(t_m)$  出现起伏,使得难以寻找到满足要求的特显点。某个距离单元内微动散射点越多,该距离单元的  $u_n(t_m)$  起伏越剧烈。若错误地选择微动点所在距离单元作为特显点单元,则在将该单元相位校正为 0 时,与正确的相位校正相比,相当于多乘了相位项  $\exp(j4\pi \mathbf{r}_{pi}^T(t_m) \cdot \mathbf{n} / \lambda)$ ,这将引起非微动点距离单元相位值的紊乱,导致无法实现方位向压缩。因此,利用干扰机随机生成各种频率的多个微多普勒信号可

有效实现对相位校正的干扰。

### 3.3 对方位向脉压的干扰

若各次回波信号完成了正确的包络对齐和相位校正,则通过方位向的傅立叶变换即可获得目标的二维像。设目标主体信号已实现精确的运动补偿,以旋转形式的微动散射点为例,其在成像平面内雷达视线方向上的运动方程可简化为

$$\Delta R(t_m) = R_p \sin\theta_p + r \sin(\Omega_r t_m) \quad (30)$$

其微多普勒信号可写为

$$S_c(f, t_m) = T_p \text{sinc} \left( T_p \left( f + \frac{2\mu}{c} (R_p \sin\theta_p + r \sin(\Omega_r t_m)) \right) \right) \cdot \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} (R_p \sin\theta_p + R_p \cos\theta_p \cdot \omega_0 t_m + r \sin(\Omega_r t_m)) \right) \quad (31)$$

令  $B = 4\pi r / \lambda$ , 对上式相位项采用第一类 Bessel 函数展开,得到<sup>[1,10]</sup>

$$S_c(f, t_m) = T_p \text{sinc} \left( T_p \left( f + \frac{2\mu}{c} (R_p \sin\theta_p + r \sin(\Omega_r t_m)) \right) \right) \cdot \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} R_p \sin\theta_p \right) \cdot \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} R_p \cos\theta_p \cdot \omega_0 t_m \right) \cdot \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \in Z}}^{\infty} J_k(B) \exp(-jk\Omega_r t_m) \quad (32)$$

$$J_k(B) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp(j(B \sin u - ku)) du \quad (33)$$

对(32)式关于慢时间  $t_m$  做傅立叶变换,得到

$$S_c(f, f_m) = T_m T_p \text{sinc} \left( T_p \left( f + \frac{2\mu}{c} (R_p \sin\theta_p + r \sin(\Omega_r t_m)) \right) \right) \cdot \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} R_p \sin\theta_p \right) \cdot \{ J_0(B) \text{sinc}(T_m(f_m - 2R_p \cos\theta_p \cdot \omega_0 / \lambda)) + J_1(B) \text{sinc}(T_m(f_m - 2R_p \cos\theta_p \cdot \omega_0 / \lambda - \Omega_r)) + J_1(B) \text{sinc}(T_m(f_m - 2R_p \cos\theta_p \cdot \omega_0 / \lambda + \Omega_r)) + J_2(B) \text{sinc}(T_m(f_m - 2R_p \cos\theta_p \cdot \omega_0 / \lambda - 2\Omega_r)) + J_2(B) \text{sinc}(T_m(f_m - 2R_p \cos\theta_p \cdot \omega_0 / \lambda + 2\Omega_r)) + \dots \} \quad (34)$$

其中  $T_m$  为方位向相干积累时间。上式诸多  $\text{sinc}$  函数中,  $2R_p \cos\theta_p \cdot \omega_0/\lambda$  为由目标主体等效为转台模型时相对雷达旋转产生的方位向多普勒频率, 这表明由旋转引起的微多普勒信号在做方位向压缩时, 将产生以主体多普勒频率为中心, 以旋转频率  $\Omega_r$  为间隔的等间隔分布的峰值, 从而生成方位向上的条带干扰。干扰机通过合适生成具有不同频率  $\Omega_r$  的微多普勒信号, 可在目标成像区域产生较强较均匀的微多普勒干扰条带, 实现对 ISAR 成像的“灵巧”压制干扰。

从以上分析可知, 基于微多普勒效应的压制干扰可从包络对齐、相位校正和方位向压缩三个环节构成对 ISAR 成像系统的有效干扰, 三个环节环环相扣, 给 ISAR 抗干扰造成了严重困难。从现有技术手段来看, ISAR 系统要对抗这种形式的干扰是较为困难的。

#### 4 仿真分析

由于篇幅受限, 论文仅以压制干扰为例进行仿真分析。发射信号载频为 10GHz, 发射信号带宽为 300MHz, 距离分辨率为 0.5m, 发射信号脉宽为  $1\mu\text{s}$ , 脉冲重复频率为 1000Hz, 目标到雷达距离为 10km, 目标运动速度为 300m/s, 方位向分辨率为 0.5m, 成像时间为 1s。假设目标为某飞机模型, 无干扰条件下仿真结果如图 3 所示。

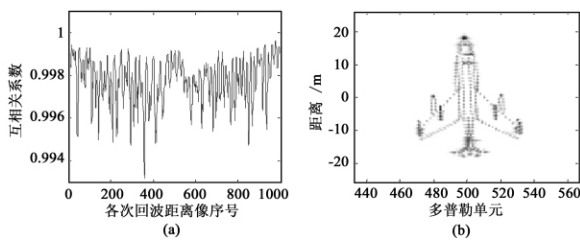


图 3 无干扰时 ISAR 像及相邻距离像模值之间的相关系数

Fig. 3 The ISAR image without jam and correlativity between modulus of adjacent range profile

图 3 (a) 为无干扰条件下目标 ISAR 像。在无干扰条件下, 当运动补偿精确完成时, 相邻距离像模值之间的互相关系数如图 3 (b) 所示, 可见相邻距离像之间的相似度是非常高的, 这也是基于相关法的包络对齐得以成功进行的前提。

当干扰机发射旋转频率为 10Hz、在距离向上均匀分布的虚假微多普勒信号时, 假设目标运动状态精确已知, 即可以进行精确运动补偿条件下, 敌方雷达接收到的目标回波信号在  $f - t_m$  平面上的分布如图 4 (a) 所示, 干信比为 8.32dB。此时各次相邻距离像模值的互相关系数如图 4 (b) 所示, 对比图 3 (b), 可见相邻距离像之间的相似度明显下降。图 5 进一步给出了某两次相邻距离像移位相关时互相关系数的变化曲线。由于假设已经对回波做了精确运动补偿, 因此两次距离像的相对移位值为 0 时包络是正确的, 即图 5 中的 A 点位置, 但由图可以看出, 由于干扰的存在, 使得两次距离像互相关系数最大值位于相对移位值为 -11 处, 即图 5 中的 B 点位置, 因此将导致包络的错误对齐。

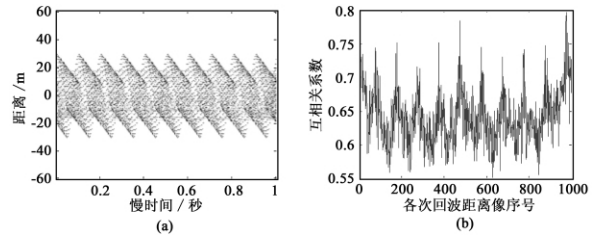


图 4 有干扰时目标回波在  $f - t_m$  平面上的分布及相邻距离像模值之间的相关系数

Fig. 4 The  $f - t_m$  distribution of target echo under jam and correlativity between modulus of adjacent range profile

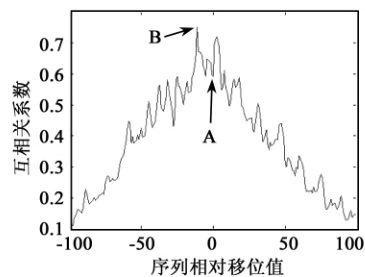


图 5 有干扰时某两次相邻距离像移位相关时互相关系数变化曲线

Fig. 5 The correlativity curve of shift correlation between certain two adjacent range profiles

接下来考察微多普勒干扰对相位校正的影响。假设已经实现了准确的包络对齐。在构建飞机模型时, 我们设置机头鼻锥处散射点具有高散射系数, 由于该距离单元内只有一个强散射点, 依据 (28) 式可计算得到该距离单元的归一化幅度方差为 0.0011

$\ll 0.12$ , 因此在无干扰条件下可被选作特显点。干扰机发射图 4( a) 所示的虚假微多普勒信号后, 机头鼻锥处距离单元幅度起伏变得十分剧烈, 计算可得其归一化幅度方差为  $0.2164 \gg 0.12$ 。图 6 给出了目标区域各距离单元的归一化幅度方差, 可见基本上所有距离单元的归一化幅度方差都在 0.3 以上, 这将导致无法确定特显点单元, 从而难以实现相位校正。

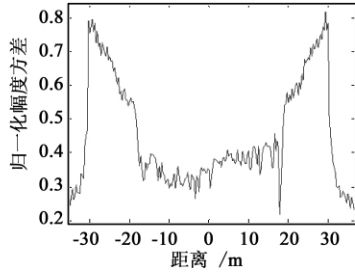


图 6 各距离单元归一化幅度方差

Fig. 6 The normalized altitude variance of each range cell

为考察对方位向压缩带来的干扰效应, 假设敌方成像系统可实现对目标运动姿态的精确测量, 从而实现了精确的运动补偿。干扰机发射旋转频率为 2Hz 的一个虚假的强微多普勒信号, 如图 7( a) 所示, 经过方位向压缩后, 生成了图 7( b) 方位向上的干扰条带。若干扰机发射多个具有旋转频率的微多普勒信号, 如图 8( a) 所示, 则可很好地形成对 ISAR 成像的压制干扰, 成像结果如图 8( b) 所示, 其中干信比为 16.12dB。

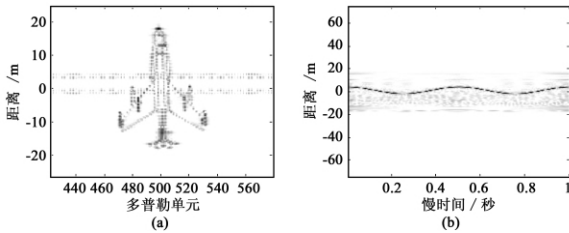


图 7 生成的单个虚假微多普勒信号及方位向压缩结果

Fig. 7 The produced single illusive micro-Doppler signal and azimuth compress result

### 5 实测数据处理

为了进一步验证本文所提方法的有效性, 我们采用 C 波段某飞机的实测数据, 对基于微多普勒效

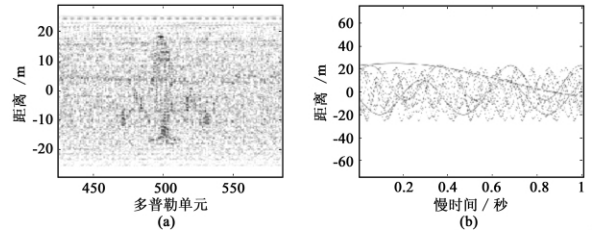


图 8 生成的多个虚假微多普勒信号及方位向压缩结果

Fig. 8 The produced multi illusive micro-Doppler signal and azimuth compress result

应的压制性干扰进行了验证。在无干扰条件下飞机的 ISAR 成像结果如图 9( a) 所示。为了考察微多普勒信号对包络对齐、相位校正和方位向压缩三个环节的干扰效果, 在实验中, 微多普勒干扰信号分别在包络对齐前、包络对齐后相位校正前、相位校正后等三个环节加入回波数据。

首先验证微多普勒信号对包络对齐的干扰效果。干扰机产生图 9( b) 所示的微多普勒干扰信号, 干信比为 8.58dB。雷达接收机接收到的距离脉压后回波如图 9( c) 所示, 对齐做包络对齐处理后的得到图 9( d) 所示结果, 可以明显看出存在包络漂移和突跳现象(若包络准确对齐, 微多普勒信号当呈现为规则的正弦曲线), 因而实现了对 ISAR 成像的有效干扰。

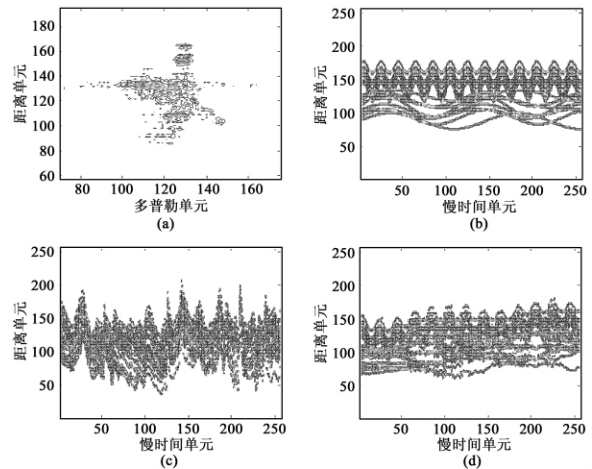


图 9 干扰对包络对齐的影响

Fig. 9 The effect of jam to range alignment

其次验证微多普勒信号对相位校正的干扰效果。在对目标原始回波完成包络对齐后, 加入图 9( b) 所示的微多普勒干扰信号, 干信比仍为 8.58dB,



如图 10(a) 所示。图 10(b) 给出了(a) 中目标区域各距离单元的归一化幅度方差,可以看出,在微多普勒信号干扰下,难以选取到满足要求的特显点。选取其中幅度方差较低的 4 个距离单元作为特显点单

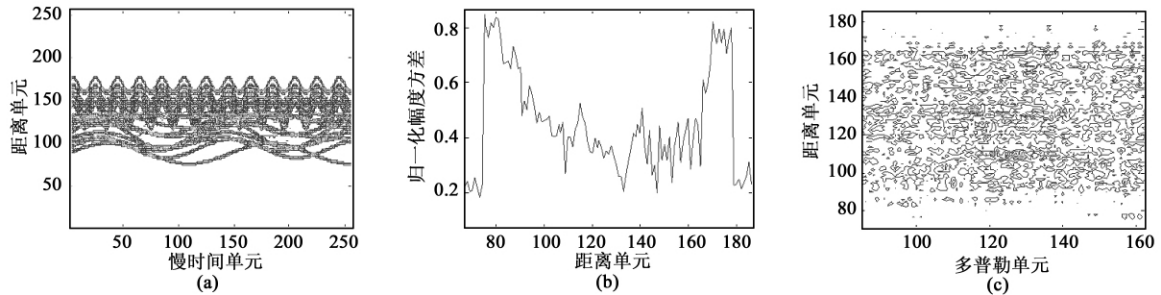


图 10 干扰对相位校正的影响

Fig. 10 The effect of jam to phase correction

最后验证微多普勒信号对方位向压缩的干扰效果。在对目标原始回波完成包络对齐和相位校正后,仍加入上述微多普勒干扰信号。方位向压缩后成像结果如图 11 所示,可以看到明显的沿方位向等间隔分布的干扰条带,而目标的真实像已被淹没在干扰条带中。

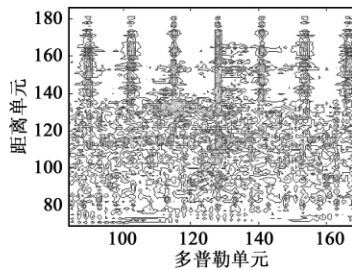


图 11 干扰对方位向压缩的影响

Fig. 11 The effect of jam to azimuth compressing

## 6 结论

随着 ISAR 技术的日益成熟与广泛应用,针对 ISAR 成像的干扰技术必将成为电子对抗领域的一个研究重点。本文提出了一种基于雷达目标微多普勒效应的 ISAR 成像干扰方法,利用微多普勒效应即可为目标识别提供微动特征信息却又给目标成像带来污染的双重特性,设计了基于微多普勒效应的 ISAR 成像欺骗式干扰方法和压制式干扰方法,并通过仿真实验和实测数据处理验证了本文方法可在较低干信比条件下实现对 ISAR 成像的有效干扰。该方法简单易行,可望在空中或空间攻防对抗领域发

挥重要作用。

## 参 考 文 献

- [1] Chen V C, Li F, Ho S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study [J]. IEEE Trans. on AES, 2006, 42(1): 2-21.
- [2] 庄钊文,刘永祥,黎湘. 目标微动特性研究进展[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 520-525. [Zhang Zhao-wen, Liu Yong-xiang, Li Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 520-525.]
- [3] Bai X R, Xing M D, Zhou F, et al. Imaging of micro-motion targets with rotating parts based on empirical-mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(11): 3514-3523.
- [4] 冯德军,王雪松,肖顺平,等. 空间目标 ISAR 成像与识别对抗研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(1): 43-45. [Feng De-jun, Wang Xue-song, Xiao Shun-ping, et al. Study on countermeasures against ISAR imaging and identification of space target [J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(1): 43-45.]
- [5] 张煜,董春曦,崔艳鹏,等. 对解线调处理的 ISAR 的相干干扰技术[J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1590-1594. [Zhang Yu, Dong Chun-xi, Cui Yan-peng, et al. Coherent jamming technique countering ISAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9): 1590-1594.]
- [6] 李源,陈惠连. 基于图像合成的 ISAR 欺骗干扰研究[J]. 现代雷达, 2007, 29(3): 56-58. [LI Yuan, CHEN Hui-lian. Study on deception jamming against ISAR using image synthesis technology [J]. Modern Radar, 2007, 29(3): 56-58.]
- [7] 李源,刘建新,陈惠连. 基于正弦调相的 ISAR 干扰方法[J].

- 信号处理, 2007, 23(1): 101 - 105. [Li Yuan Liu Jian-xin Chen Hui-lian. A jamming method to ISAR based on sinusoidal phase modulation[J]. Signal Processing, 2007, 23(1): 101 - 105. ]
- [ 8 ] 白雪茹, 周峰, 邢孟道, 等. 空中微动旋转目标的二维 ISAR 成像算法[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1937 - 1943. [ Bai Xue-ru, Zhou Feng, Xing Meng-dao, et al. 2D ISAR imaging algorithm for air micro-motion targets [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1937 - 1943. ]
- [ 9 ] Luo Y, Zhang Q, Qiu C W, et al. Micro-Doppler effect analysis and feature extraction in ISAR imaging with stepped-frequency chirp signals[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(4): 2087 - 2098.
- [10] 白雪茹, 孙光才, 周峰, 等. 基于旋转角反射器的 ISAR 干扰新方法[J]. 电波科学学报, 2008, 23(5): 868 - 872. [Bai Xue-ru, Sun Guang-cai, Zhou Feng, et al. A novel ISAR jamming method based on rotating angular reflectors [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(5): 868 - 872. ]
- [11] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 电子工业出版社, 2006: 244 - 249.
- [12] Ye W, Yeo T S, Bao Z. Weighted least-squares estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2487 - 2494.
- 作者简介: 李松(1977 - ) 男, 空军工程大学导学院讲师, 博士, 主要研究方向为雷达信号与信息处理。  
通信地址: 陕西省三原县 25#信箱 200 乙(713800)  
电话: 13992072760  
E-mail: li\_song77@163.com

(编辑: 余 未)