

对逆合成孔径雷达的乘积调制干扰方法

徐乐涛¹, 冯德军¹, 刘庆富¹, 王雪松²

(1. 国防科技大学电子信息复杂电磁环境效应国家重点实验室, 湖南长沙 410073;
2. 国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 基于乘积调制干扰理论, 提出了一种新型逆合成孔径雷达欺骗干扰方法: 对干扰模板图像作二维 FFT (Fast Fourier Transform) 变换从而离线快速生成干扰信号, 再经过信号相乘调制到截获雷达信号上后转发, 可在 ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) 上形成虚假目标且假目标尺度可灵活缩放. 在介绍乘积调制干扰的基本原理后, 从理论上分析了 ISAR 假目标生成方法. 在此基础上, 研究了关键干扰参数对干扰效果的影响, 给出了影响尺度缩放功能的关键因素和对侦察的依赖程度, 最后进行了仿真验证, 结果证明了该方法的可行性和有效性.

关键词: 乘积调制干扰; 线性调频信号; 逆合成孔径雷达; 尺度缩放

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2014)12-2501-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.12.024

ISAR Decoy Generation by Utilizing Coherent Multiplication Modulated Jamming

XU Le-tao¹, FENG De-jun¹, LIU Qing-fu¹, WANG Xue-song²

(1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environmental Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;
2. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: A novel generation method of ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) decoy is presented based on coherent multiplication modulated jamming. By processing the modal image by 2-D FFT (Fast Fourier Transform), jamming signal can be formed offline and then modulated on interceptive radar signal to generate a vivid decoy with arbitrary shape and size. After the theory of coherent multiplication modulated jamming is expounded, a theoretical study is carried out to analyze this generation method. On this basis, more analyses are given the jamming parameters, and the key factor of scale zoom and the reliance on reconnaissance is presented. At last, the simulation demonstrates that the above method is feasible and effective.

Key words: coherent multiplication modulated jamming; linear frequency modulated signal; inverse synthetic aperture radar; scale zoom

1 引言

逆合成孔径雷达 (Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR) 具有对目标进行全天时、全天候二维高分辨成像的能力, 在防空、反导等军事领域应用广泛^[1,2]. 如何对其实施干扰, 是雷达对抗领域近年来关注的热点问题^[3,4]. 传统的噪声压制干扰功率要求较高且易被 ISAR 感知, 因此欺骗式干扰更加受到青睐, 特别是基于数字储频 (DRFM) 的转发式假目标干扰更是当前 ISAR 对抗的主要研究方向^[5-7]. 目前转发式假目标干扰研究主要关注新型干扰信号调制方法: 文献[5]采用数字合成技术 (Digital Image Synthesizer, DIS) 实现了 ISAR 假目标图

像的合成, 文献[6]改进了 DIS 技术中的调制系数, 降低了其复杂程度, 文献[7]利用 DIS 技术产生了多个假目标. 上述干扰方法虽然可以生成逼真的假目标图像, 但需要在侦察获得雷达信号参数的基础上, 根据目标各散射点的 RCS 和位置信息生成相应的干扰信号, 计算过程比较复杂且对侦察精确度要求高; 另外, 这些方法的假目标模板设定相对简单, 一般只由有限个强散射点构成, 当需要生成大量散射点以逼真呈现目标特征时, 可能导致干扰机响应速度下降, 影响干扰效果.

乘积调制干扰^[8]是一种新型欺骗干扰方法, 主要用于解决高分辨 SAR 成像干扰运算量大、难以实时实现的问题. 该方法在生成干扰信号后, 仅需对雷达信号

做乘积调制即可实现逼真假目标欺骗干扰,相比卷积干扰等欺骗干扰方式实时运算量大为降低.然而,ISAR在成像场景、信号形式及其处理方式等方面与SAR有着诸多不同,因此其干扰信号的生成不能简单的移植SAR乘积调制干扰方法.文献[8]主要研究了合成孔径雷达(SAR)的乘积调制干扰,而对于ISAR的干扰方法还没有研究.

针对现有ISAR欺骗干扰方法不足,本文提出一种新型的ISAR乘积调制干扰方法,该方法可离线(OFFLINE)生成干扰信号模板,当干扰机截获到雷达信号时,仅需对干扰信号模板进行简单抽取并与截获信号相乘转发即可生成逼真的ISAR假目标图像,还可以通过改变干扰参数灵活的调整假目标图像大小.这种方法还具有对雷达分辨率适应性好,对侦察精确度要求宽松等优点.

2 乘积调制干扰基本原理

乘积调制干扰的基本原理是:首先根据模板图像生成相应的干扰信号模板,这一步可以由干扰机信号处理器实时运算得到,也可以由其他设备离线产生后存储在干扰机内;干扰机截获到成像雷达发射信号并侦察到关键参数后,对存储的干扰信号模板进行抽取形成干扰信号,然后通过信号相乘调制到接收信号并转发出去,如此重复直到成像时间结束[8].通过调整模板图像分辨率,可以灵活调整假目标大小.

由于SAR成像时目标有其它地面物体作为参照物,SAR假目标外形畸变程度应控制在一定范围内以避免失真,这对信号侦察精确度提出了较高要求;而ISAR空中目标成像时背景简单,目标姿态不定,因此成像时目标外形发生尺度变化属于正常现象,这就允许ISAR乘积调制干扰产生的假目标存在一定程度的外形失真,从而降低了对侦察精确度的要求,也能更好的发挥假目标尺度缩放功能.

3 基于乘积调制的ISAR假目标生成方法

3.1 线性调频信号时频耦合特性

考虑到乘积调制干扰方法利用了线性调频信号(LFM)的时频耦合特性,本节首先对这一特性进行阐述.设LFM信号波长为 λ ,带宽为 B ,脉宽为 T ,调频斜率为 $K_r = B/T$,电磁波传播速度为 c ,雷达基带发射信号 $s(t)$ 可以表示为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp(-j\pi K_r t^2) \quad (1)$$

假定目标相对雷达运动速度为 v ,则回波信号的多普勒频移为 $f_{d_r} = 2v/\lambda$,目标与雷达距离 R_0 ,目标回波信号 $r(t)$ 可以写成

$$r(t) = \text{rect}\left(\frac{t-t_0}{T}\right) \exp\left(-j2\pi\left[f_{d_r}(t-t_0) + \frac{1}{2}K_r(t-t_0)^2\right]\right) \quad (2)$$

其中 $t_0 = 2R_0/c$.根据文献[9,10],多普勒失配会导致脉冲压缩后输出峰值点位置发生偏移.定义偏移距离以远离雷达方向为正方向,则偏移距离 ΔR_m 与多普勒频移 f_{d_r} 的关系为

$$\Delta R_m = \frac{cf_{d_r}}{2K} \quad (3)$$

需要特别指出的是,式(3)的得出是建立在 $f_d \ll B$ 的前提下.随着 f_{d_r} 的增加,脉冲压缩后的峰值点会出现主瓣展宽、幅度下降的现象,以至于不能近似为点目标,因此通常将 f_{d_r} 限制在四分之一带宽 B 以内[8].

3.2 ISAR方位向信号特性

设ISAR目标某散射点与参考点(多普勒零点)横向距离为 ΔA ,雷达信号重复周期PRI为 T_p ,雷达发射脉冲数为 N ,目标旋转角速度为 ω ,则此散射点方位向信号为[11]

$$c(n) = \exp(-j2\pi f_{d_a} n T_p), 0 \leq n \leq N-1 \quad (4)$$

其中 f_{d_a} 为该散射点与雷达径向速度造成的多普勒频移.

$$f_{d_a} = \frac{2\omega}{\lambda} \Delta A \quad (5)$$

在转角一定的条件下,ISAR通过估计方位向信号多普勒频率进而确定散射点的方位距离.

3.3 乘积调制干扰实现方法

基于乘积调制的ISAR欺骗干扰方法流程如图1所示,下面首先详细阐述各个步骤,然后根据干扰信号特性分析假目标的成因.

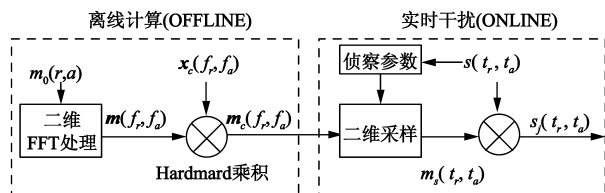


图1 干扰算法流程

选取一张模板图像,图像尺寸为 p_r 像素 \times p_a 像素.假设列代表ISAR距离向信号,行代表方位向信号,记为 $m_0(r, a)$.模板图像中存在一个点目标位于 $m_0(r', a')$,其散射强度假设为1,即 $m_0(r', a') = 1$,其余点散射强度均为0,如图1所示.设模板图像距离向和方位向分辨率分别为 Δr 和 Δa ,则图像模板距离向、方位向总长度分别为 $L_r = p_r \times \Delta r$, $L_a = p_a \times \Delta a$.以模板图像中心单元作为坐标原点建立坐标轴,则点目标位于 $(r' \Delta r - L_r/2, a' \Delta a - L_a/2)$.

对图像模板 $m_0(r, a)$ 做二维 FFT 变换, 得到

$$\begin{aligned} m(f_r, f_a) &= \sum_{a=0}^{N_a-1} \sum_{r=0}^{N_r-1} m(r, a) \exp(-j2\pi f_r r / N_r) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi f_a a / N_a) \\ &= \exp(-j2\pi f_r r' / N_r) \exp(-j2\pi f_a a' / N_a) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $1 \leq f_r \leq N_r, 1 \leq f_a \leq N_a$, N_r 为距离向 FFT 点数, N_a 为方位向 FFT 点数.

接下来将 FFT 得到的矩阵 $m(f_r, f_a)$ 乘以一个校正矩阵 $x_c(f_r, f_a)$ (Hadamard 乘积), 得到干扰信号模板 $m_c(f_r, f_a)$

$$m_c(f_r, f_a) = m(f_r, f_a) \cdot x_c(f_r, f_a) \quad (7)$$

其中

$$x_c(f_r, f_a) = \exp(j\pi(f_r L_r / \Delta r N_r + f_a L_a / \Delta a N_a)) \quad (8)$$

其中 $1 \leq f_r \leq N_r, 1 \leq f_a \leq N_a$. 上述信号处理过程中包含的对模板图像的二维 FFT 运算和校正处理, 是本干扰方法运算量的主要来源. 由于不需要 ISAR 发射信号的任何先验知识, 因此上述处理过程可离线计算完成, 从而提高干扰机的响应速度.

当干扰机截获到 ISAR 发射信号 $s(t_r, t_a)$ 时, 进入实时干扰 (ONLINE) 阶段. 侦察设备获得发射信号的调频率 K_r 、脉冲重复时间 T_p 和信号带宽 B . 同时, 对干扰信号模板 $m_c(f_r, f_a)$ 进行采样, 距离向和方位向采样间隔分别为 η_r, η_a

$$\eta_r = 2K_r \Delta r N_r / c F_s, \eta_a = 2\omega T_p N_a \Delta a / \lambda \quad (9)$$

F_s 指干扰机 A/D 器件采样率, ω 为设定的假目标旋转角速度, 如果 η_r, η_a 不为整数, 可通过线性插值实现抽取. 定义 $f_r' = \eta_r f_r, f_a' = \eta_a f_a$, 将式(7)、式(8)带入式(9)得到采样后经过采样后得到

$$\begin{aligned} m_s(t_r, t_a) &= \exp(-j2\pi(r' \Delta r - L_r/2)2K_r t_r / c) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi(a' \Delta a - L_a/2)2\omega t_a / \lambda) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $t_r = f_r' / F_s, t_a = f_a' T_p$ 分别为距离向时间(快时间)和方位向时间(慢时间), $m_s(t_r, t_a)$ 为干扰信号矩阵.

当干扰机截获到 ISAR 发射的第 t_a 个脉冲 $s(t_r, t_a)$ 时, 选择 $m_s(t_r, t_a)$ 的第 t_a 列与之进行乘积调制, 生成干扰信号 $s_j(t_r, t_a)$

$$s_j(t_r, t_a) = s(t_r, t_a) \cdot m_s(t_r, t_a) \quad (11)$$

如果 $m_s(t_r, t_a)$ 第 t_a 列长度大于截获的 ISAR 发射信号长度, 则舍弃多出的部分即可.

综上所述, 我们已经得到对 ISAR 二维乘积调制干扰的全部流程, 总结如下:

Step1 选择图像模板 (包含要模拟的真实目标的散射点分布及 RCS 幅度), 为了使假目标更加逼真, 图像模板可以从真实 ISAR 图像中直接提取.

Step2 对模板图像数据矩阵做补零二维 FFT 变换.

Step3 根据式(7), 对 STEP2 变换后的二维数据矩阵进行校正, 得到干扰信号模板.

Step4 根据式(9), 计算得到距离向和方位向的抽取间隔, 对干扰信号模板进行抽取, 获得干扰信号.

Step5 将干扰信号与截获 ISAR 信号相乘 (Hadamard 乘积) 并转发即可实现乘积调制干扰.

3.4 乘积调制干扰原理分析

下面我们分析乘积调制可以形成 ISAR 二维假目标的原因. 根据式(11) ISAR 接收到的干扰信号表达式为

$$\begin{aligned} s_j(t_r, t_a) &= s(t_r) \cdot m_s(t_r, t_a) \\ &= \exp(-j2\pi K_r t_r^2) \exp(-j2\pi(r' \Delta r - L_r/2)2K_r t_r / c) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi(a' \Delta a - L_a/2)2\omega t_a / \lambda) \\ &= \exp(-j2\pi((r' \Delta r - L_r/2)2K_r / c) t_r + K_r t_r^2) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi(a' \Delta a - L_a/2)2\omega t_a / \lambda) \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)最后一行等式第一个指数项包含距离向信息, 可以看出干扰信号在距离向上相比发射信号存在频移 f_{d_r}

$$f_{d_r} = (r' \Delta r - L_r/2)2K_r / c \quad (13)$$

结合式(3)可以得出, 干扰信号经过距离向脉压处理后的峰值位置 ΔR 出现在

$$\Delta R = c f_{d_r} / 2K_r = r' \Delta r - L_r/2 \quad (14)$$

这与干扰模板假定的假目标距离向位置保持一致.

式(12)最后一行等式第二个指数项代表方位向, 可以看出干扰信号在方位向上频率 f_{d_a}

$$f_{d_a} = (a' \Delta a - L_a/2)2\omega / \lambda \quad (15)$$

结合式(5), 频率为 f_{d_a} 的方位向干扰信号经过 ISAR 方位向成像处理后, 输出的峰值位置

$$\Delta A = f_{d_a} \lambda / 2\omega = a' \Delta a - L_a/2 \quad (16)$$

这与干扰模板假定的假目标方位向位置一致.

综上所述, 乘积调制干扰方法生成的干扰信号经过 ISAR 成像处理后, 可以产生与模板图像分布一致的二维假目标. 当模板图像由多个散射点构成时, 由于该干扰方法的线性特性, 因此仍只需同样的处理流程即可产生多散射点构成的二维干扰图像.

乘积调制干扰的优点在于当需要产生多散射点假目标时, 可采用离线 (OFFLINE) 方式提前生成干扰信号模板. 当截获到 ISAR 信号时, 仅需对模板做重采样即可生成所需的干扰信号. 相比之下, 移频或延时转发等一维欺骗干扰方法则需要对接收信号做多次移频或延时处理, 实现过程复杂; 而 DIS 干扰方法则需要截获 ISAR 信号后, 按照逐个散射点的幅度和相位实时生成干扰信号, 其运算量随点数增加而显著增大. 因此当干扰机需要产生大量虚假散射点时, 乘积调制干扰相比

传统干扰具有极大的优势,适用于针对高分辨率 ISAR 的欺骗干扰。

4 基于乘积调制的 ISAR 假目标生成关键参数分析

4.1 假目标的尺度缩放分析

乘积调制干扰可以在对抗过程中灵活地改变假目标的大小,即具有假目标尺度缩放功能.通过设定模板图像距离向和方位向空间像素分辨率,可以实现假目标的尺度缩放.这是因为根据式(9),改变分辨率 Δr 和 Δa 会使抽取系数 η_r 和 η_a 发生变化,而抽取系数决定了对干扰信号模板抽取的间隔,这个间隔最终决定着干扰信号的移频量.抽取系数越大,干扰信号的移频量越大,生成的假目标也越大,反之假目标越小.

根据式(9)分析,假目标尺度与移频量成正比,也就正比于模板的分辨率,因此当分辨率变为 $\Delta r'$, $\Delta a'$ 时

$$\Delta r' = a\Delta r \quad \Delta a' = b\Delta a \quad (17)$$

假目标的距离向和方位向长度分别变为为原来的 a 倍和 b 倍.

4.2 假目标的侦察依赖度分析

对于乘积调制干扰来说,其生成假目标的逼真程度很大程度上取决于对 ISAR 信号侦察准确程度.本节将分析乘积调制干扰对 ISAR 发射信号参数的侦察依赖度.假设假目标距离向和方位向的位移分别为

$$\begin{aligned} \Delta R_x &= \frac{c\Delta f_x}{2K_r} \\ \Delta R_y &= \frac{\lambda\Delta f_y}{2\omega} = \frac{c\Delta f_y}{2\omega f_c} \end{aligned} \quad (18)$$

其中, Δf_x 、 Δf_y 分别表示干扰机在距离向和方位向的调制频率, ω 表示干扰机设定的假目标旋转角速度.事实上,式(18)是理想条件下乘积调制生成的假目标坐标.实际中应考虑侦察误差,式(18)应改写为

$$\begin{aligned} \Delta \hat{R}_x &= \frac{c\Delta \hat{f}_x}{2\hat{K}_r} \\ \Delta \hat{R}_y &= \frac{c\Delta \hat{f}_y}{2\omega \hat{f}_c} \end{aligned} \quad (19)$$

其中 \hat{K}_r 表示干扰机侦察得到的信号调频斜率, \hat{f}_c 表示干扰机侦察得到的信号载频, $\Delta \hat{f}_x$ 、 $\Delta \hat{f}_y$ 表示为使假目标与期望目标位置一致而在距离向和方位向上附加的调制.然而,假目标的真实位置是由 ISAR 发射信号的真实值决定的,而不是干扰机对其的估计值.因此干扰产生的假目标的真实坐标为

$$\begin{aligned} \Delta \hat{R}_x &= \frac{c\Delta \hat{f}_x}{2K_r} \\ \Delta \hat{R}_y &= \frac{c\Delta \hat{f}_y}{2\omega f_c} \end{aligned} \quad (20)$$

$\Delta \hat{R}_x$ 、 $\Delta \hat{R}_y$ 表示假目标经过 ISAR 处理后实际的坐标位置, $\hat{\omega}$ 表示 ISAR 对目标旋转角速度的估计值.联合式(19)、式(20),得到

$$\begin{aligned} \Delta \hat{R}_x &= \frac{\hat{K}_r}{K_r} \Delta R_x \\ \Delta \hat{R}_y &= \frac{\hat{f}_c}{f_c} \frac{\omega}{\hat{\omega}} \Delta R_y \end{aligned} \quad (21)$$

由式(21)可以看出,假目标的实际大小等于其期望大小按比例压缩.其中,距离向的压缩比例等于距离向调频斜率估计值与真值之比;方位向的压缩比例不仅受到载频估计误差的影响,还受到 ISAR 对目标旋转角速度估计误差的影响.实际 ISAR 系统通过估计得出目标角速度 $\hat{\omega}$,因此干扰机设定的假目标转速度 ω 同样由 ISAR 估计得到,这就意味着干扰机设定的假目标转速度 ω 决定了假目标的 ISAR 方位分辨率.考虑到实际应用中成像雷达通常保持距离分辨率与方向分辨率一致以使成像结果不过于失真,因此在干扰过程中采用如下方法设定 ω ,以保持假目标方位向与距离向分辨率的基本一致:首先在侦察 ISAR 信号带宽的基础上首先分析其距离分辨率,然后选择与之相应的方位分辨率,最终设定合适的 ω 值.需要说明的是,对于 ISAR 来说,目标转速不易精确估计得到,因此可适当放松对 ω 精确度的要求

5 仿真验证与分析

为了验证乘积调制干扰的性能,本节采用仿真的方法分析干扰产生的假目标特性.假设 ISAR 发射线性调频信号,参数设定如表 1 所示.

表 1 仿真参数设定

参数名称	参数值	单位	参数名称	参数值	单位
雷达载频	10GHz		PRF	1000 Hz	
脉宽	20 μ s		ω	0.31rad/s	

首先分析距离向假目标特性.设定距离向模板如图 2(a)所示,长度为 100m,补零点数为 100000,脉冲压缩采用去斜处理方式,得到的仿真结果如图 2(b)所示.

从图 2(b)可以看出,乘积调制干扰逼真的实现了一维假目标欺骗,生成的假目标分布及幅度与模板图像一致.

接下来分析二维乘积调制干扰特性,考虑到要使假目标与真实目标 ISAR 像相似,因此模板图像从实际 ISAR 像中选取较为合适,这里选取雅克-42ISAR 图像的归一化灰度图作为干扰图像模板,图像尺寸(像素)为 300 \times 300,距离向和方位向像素分辨率大小均为 0.15m,如图 3 所示.

下面分析不同分辨率 ISAR 的假目标特性,设定雷达带宽分别为 300MHz、600MHz 和 900MHz,积累脉冲数

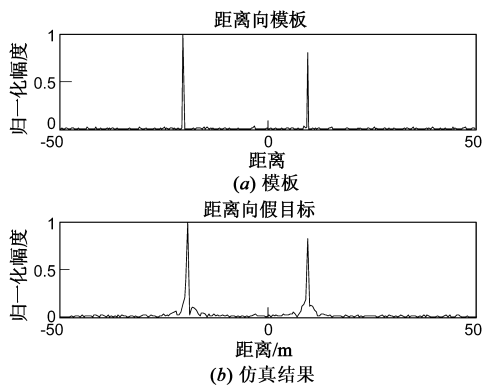


图2 距离向乘积调制干扰

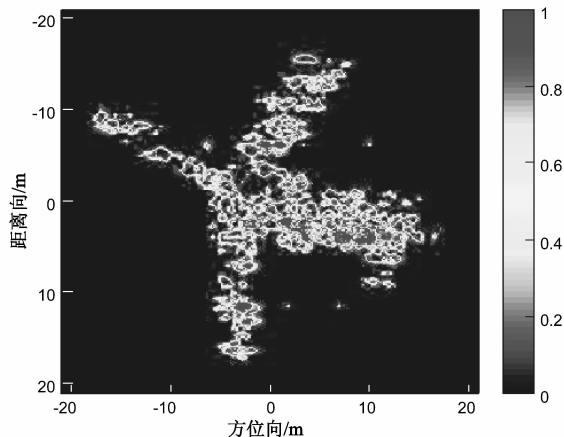


图3 模板图像(归一化灰度图)

分别为 64、128 和 256,则相应 ISAR 分辨率(距离向 × 方位向)分别为 $0.5\text{m} \times 0.74\text{m}$, $0.25\text{m} \times 0.37\text{m}$ 和 $0.17\text{m} \times 0.19\text{m}$,得到 ISAR 成像结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,随着 ISAR 分辨率的提高,生成的假目标更加贴近模板图像,说明乘积调制干扰对于不同的分辨率具有极强的适应性,ISAR 分辨率越高,则该方法产生的假目标相应的具有更多细微特征。

另外从图中可以看出,产生的假目标出现了弥散现象,这是因为根据式(3),乘积调制方法利用了 LFM 信号的时频耦合特性,脉冲压缩后的峰值点除了位置发生移动外,还会出现主瓣展宽的现象,因此假目标会出现一定程度的弥散.但由于 ISAR 目标通常尺寸有

限,因此峰值点频率失配带来的弥散程度在一定范围内,对干扰效果影响不大.细微特征的多少源自模板的分辨率,当 ISAR 分辨率超过模板分辨率时,依据模板生成的干扰信号就无法生成更为逼真的假目标,因此干扰模板的分辨率应尽可能高.结合目前 ISAR 分辨率不断提升的发展趋势,干扰模板的分辨率应达到厘米甚至毫米量级。

下面分析乘积调制干扰的尺度缩放功能,设定信号带宽 300MHz,方位向积累脉冲数为 64,模板图像分辨率分别为 $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$, $0.2\text{m} \times 0.2\text{m}$ 和 $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$,仿真结果如图 5 所示。

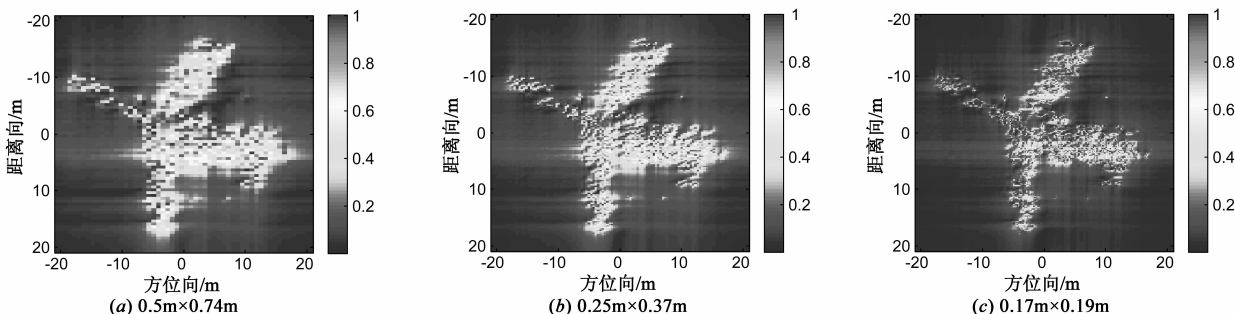


图4 不同ISAR分辨率下乘积干扰假目标对比

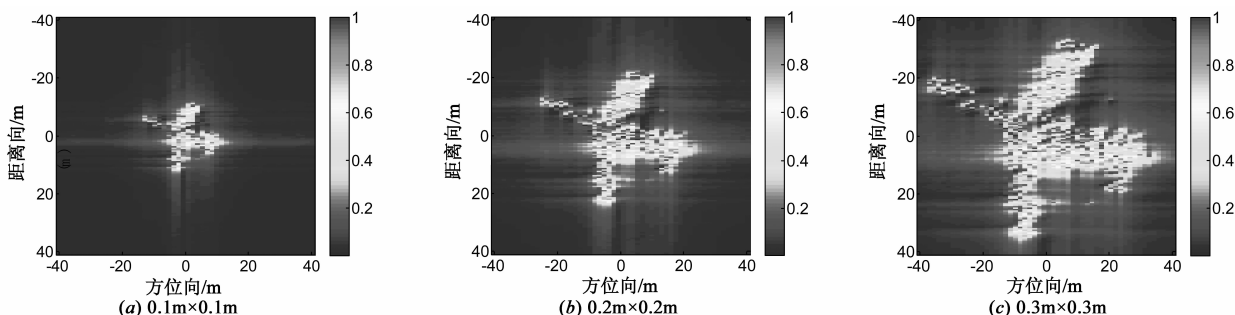


图5 不同模板图像分辨率对假目标影响对比

从图 5 可以看出,通过设定模板图像分辨率,实现了假目标尺度变换,假目标与模板图像大小保持一致。

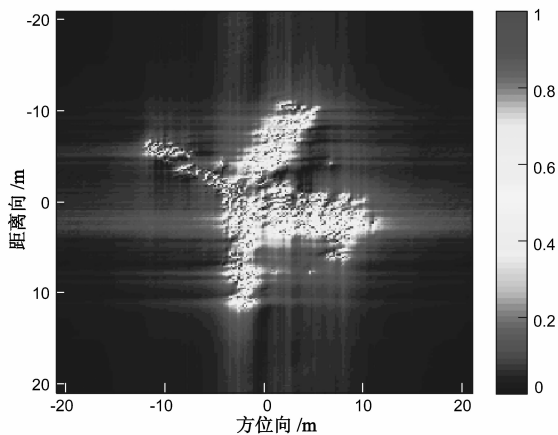


图6 无侦察误差假目标图像

最后我们分析侦察误差对干扰效果影响,设定雷达带宽 900MHz,方位向积累脉冲数为 256,模板图像分辨率设定为 $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$,无侦察误差时假目标图像如图 6 所示.为分析目标尺度变化,假设相对幅度大于 0.3 的数据单元即为目标上的点.根据这一假设,图 6 中无侦察误差条件下假目标的尺寸(距离向 \times 方位向)为 $23.0\text{m} \times 23.5\text{m}$.

图 7(a) ~ (e) 中虚假目标对应的调频率侦察相对误差分别为:10%、30%、50%、-10%、-30%、-50%,距离向长度相对变化的理论值与实际值如表 2 所示,说明调频率侦察误差导致假目标距离向上畸变程度与理论分析基本一致.

表 2 调频率侦察误差对距离向尺度影响

相对变化理论值	-50%	-30%	-10%	10%	30%	-50%
相对变化实际值	-50.7%	-30.4%	-10.9%	8.7%	27.5%	47.8%

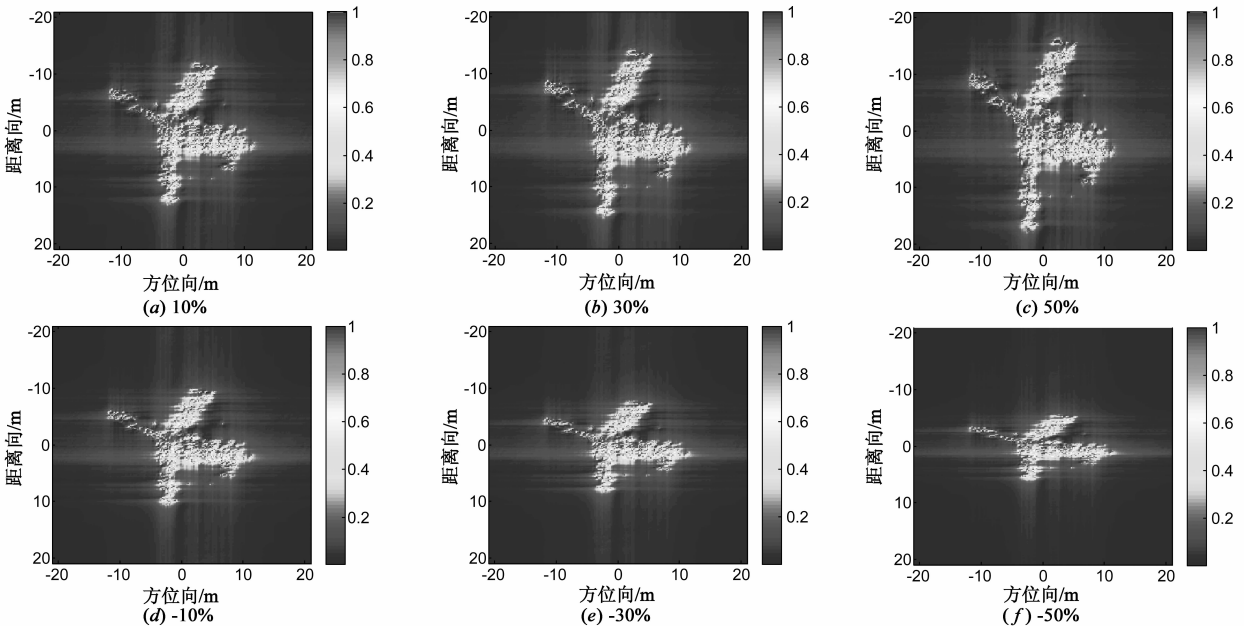


图7 调频率侦察误差对干扰效果影响

图 8(a) ~ (e) 代表载频侦察相对误差分别为 10%、30%、50%、-10%、-30%、-50% 时产生的假目标,可以看出,载频侦察误差导致假目标距离向上畸变程度与理论分析基本一致.

表 3 载频侦察误差对方位向尺度影响

相对变化理论值	-50%	-30%	-10%	10%	30%	50%
相对变化实际值	-50.0%	-30.2%	-10.3%	9.5%	30.2%	46.8%

需要说明的是,虽然侦察误差会造成假目标一定程度的外形畸变(如图 7 和图 8 所示).但实际 ISAR 对目标进行成像时一般不可能是理想的二维平面模型,目标的姿态变化同样会使 ISAR 图像产生畸变,ISAR 本身难以分辨这种畸变是由干扰产生还是由目标姿态变化产生,也就难以发现干扰.这意味着即使存在侦察误差,乘积调制干扰方法仍然是有效的.

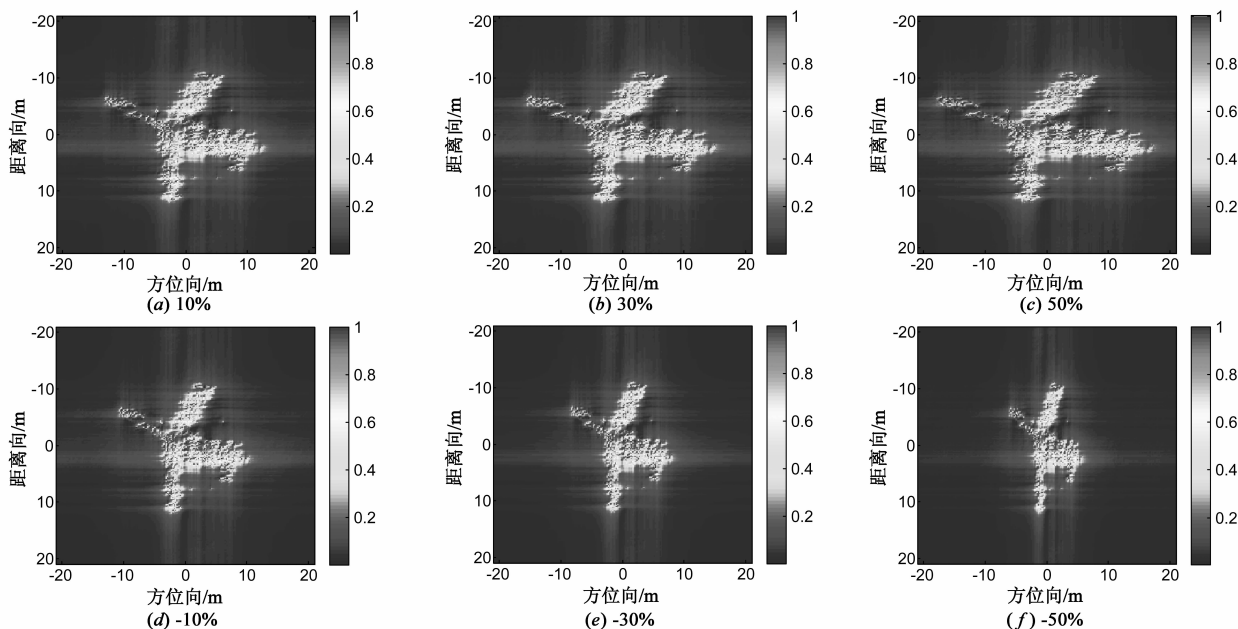


图8 载频侦察误差对干扰效果影响

6 结束语

通过本文的研究可以看出,乘积调制干扰可以实现对 ISAR 的逼真假目标欺骗干扰。这种干扰方法的主要优点包括:(1)干扰信号生成环节中较为耗费时间的步骤(二维 FFT,校正)可离线完成,实施干扰时干扰机运算量较小,适用于多散射点假目标的生成;(2)假目标对雷达分辨率具有适应性,可在不同雷达分辨率下生成具有相应细微特征的逼真假目标;(3)可以灵活调整假目标大小,仅需改变模板图像分辨率即可使相应假目标尺度增大或缩小;(4)对侦察准确性要求不高,即使存在一定的侦察误差,仍可形成有效的欺骗假目标,大大降低了对侦察设备的要求。因此,本文提出的干扰方法为干扰逆合成孔径雷达提供了新的思路,工程化简单,对于机载、弹载干扰机的研制及应用具有较好的指导意义。

参考文献

[1] Du Xiaoyong, Duan Chongwen, Hu Weidong. Sparse representation based autofocus technique for ISAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(3): 1826 – 1835.

[2] Li Yachao, Xing Mengdao, Su Junhai, et al. A new algorithm of isar imaging for maneuvering targets with low SNR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(1): 543 – 557.

[3] 陈思伟,代大海,李永祯,等. SAR 二维余弦调相转发散射波干扰原理[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2620 – 2625.

Chen Siwei, Dai Dahai, Li Yongzhen, et al. The theory of 2-D cosinusoidal phase-modulated repeater scatter-wave jamming to SAR

[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2620 – 2625. (in Chinese)

[4] 李松,何劲,冯有前,等. 基于微多普勒效应的 ISAR 成像干扰新方法[J]. 宇航学报, 2012, 33(6): 736 – 745.

Li Song, He Jin, Feng Youqian, et al. A novel jamming method for dechirping isar based on micro-doppler effect[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(6): 736 – 745. (in Chinese)

[5] P E Pace, D J Fouts, S Ekstorm, et al. Digital false-target image synthesizer for countering ISAR[J]. IEE Proceedings, Radar Sonar Navig, 2002, 149(5): 248 – 257.

[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 – 62.

Li Yuan, Chen Hui-lian. Study on deception jamming against ISAR using image synthesis technology[J]. Modern Radar, 2007, 29(3): 56 – 62. (in Chinese)

[7] 李源,陈惠连. 用于欺骗 ISAR 的多(两)假目标合成技术研究[J]. 信号处理, 2008, 24(5): 725 – 729.

Li Yuan, Chen Hui-lian. The study of multi-false target synthesizing technology against ISAR[J]. Signal Processing, 2008, 24(5): 725 – 729. (in Chinese)

[8] 刘庆富. 对 SAR/InSAR 侦察与干扰方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.

Liu Qingfu. Study on reconnaissance and jamming methods against SAR/InSAR[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.

[9] Feng D J, Tao H M, Yang Y, Liu Z. Jamming de-chirping radar using interrupted sampling repeater[J]. Science in China, Series F: Information Sciences, 2011, 54(10): 2138 – 2146.

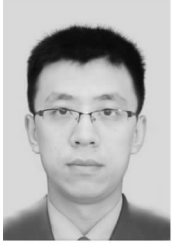
[10] 刘建成,王雪松,刘忠,等. 对线性调频脉压雷达的导前假目

标群干扰[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1350 - 1353.

Liu Jian-cheng, Wang Xue-song, Liu Zhong, et al. Preceded false target groups jamming against LFM pulse compression radars[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(6): 1350 - 1353. (in Chinese)

- [11] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

作者简介



徐乐涛 男, 1987年7月出生于山东省烟台市, 博士生, 主要研究方向为雷达信号处理及雷达电子战.

E-mail: xuletaowin@126.com



冯德军 男, 1972年11月出生于湖南省湘潭市, 博士, 副研究员, 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室一室主任, 主要研究方向为精确制导与目标识别、雷达电子战系统建模与仿真.

E-mail: fdj117@sina.com

刘庆富 男, 1982年4月出生于福建省莆田市, 博士, 主要研究方向为合成孔径雷达电子对抗.

E-mail: liu.675@gmail.com

王雪松(通信作者) 男, 1972年10月出生于内蒙古包头市, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 国防科技大学理学院院长, 主要从事雷达极化信号处理, 信号处理与目标检测及识别, 综合电子战等领域研究.

E-mail: wxs_1019@vip.sina.com