

对逆合成孔径雷达的多相位分段调制干扰方法研究

俞道滨* 吴彦鸿 王宏艳 贾 鑫
(装备学院 北京 101416)

摘 要: 针对逆合成孔径雷达(ISAR)的干扰技术是雷达对抗领域的热点问题。该文提出一种基于多相位分段调制的干扰方法,对该调制方法的基本原理及其在信号脉内和脉间综合调制的过程进行详细分析,推导干扰信号在成像处理后的表达式,给出在 2 维上分别对干扰样式进行精确控制的参数设计方法,通过仿真验证相关干扰效果,说明应用该方法能够产生灵活可控的干扰样式和遮盖效果。

关键词: 逆合成孔径雷达; 多相位分段调制; 干扰控制; 遮盖效果

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)02-0423-07

DOI: 10.11999/JEIT160397

Research on Multiple Phase Sectionalized Modulation Jamming Method for Inverse Synthetic Aperture Radar

YU Daobin WU Yanhong WANG Hongyan JIA Xin
(Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: The problem of ISAR image jamming is the main stream in radar countermeasures study. This paper proposes a new jamming technique for ISAR imaging based on Multiple Phase Sectionalized Modulation (MPSM) jamming method. Its basic principle and processing in intra-pulse and inter-pulse is analyzed in details. Then the final expression of MPSM jamming signal after ISAR imaging processing is derived, and the precise control method of jamming pattern by parameters design in double dimensions is provided. Simulation is conducted to prove the related jamming effects, and it is flexible and controllable to generate different jamming patterns and overspread effects by applying this new method.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR); Multiple phase sectionalized modulation; Jamming control; Overspread effects

1 引言

逆合成孔径雷达(ISAR)通过对回波信号的 2 维压缩成像处理,从而具备较强的抗干扰能力。典型干扰样式根据干扰效果可以分为压制干扰和欺骗干扰,二者均具有各自的特点:一方面,压制干扰的信号处理增益较低,对干扰设备的功率要求较高;另一方面,由欺骗干扰得到的虚假图像在逼真度上往往低于真实目标,可以由一些细小的特征判断出目标的真假并进行剔除^[1-4]。当前,兼具压制干扰和欺骗干扰特点的部分相干干扰技术具有一定的优势,其可以获得高于压制干扰的处理增益,同时可以对目标的识别产生扰乱的效果,不易被剔除,是对抗 2 维成像雷达的有效干扰方式^[5-7]。

当前针对 ISAR 的干扰包括无源和有源干扰技术,其中有源干扰技术大多应用数字射频存储器

(DRFM)结构,对雷达信号进行存储并处理转发,实现对干扰样式的灵活控制^[8,9]。另一方面,通过对干扰信号的灵活设计可以得到丰富的干扰样式,针对包络对齐过程的压制干扰^[10],针对角反射器特点的无源干扰^[11],有源干扰中针对信号时延特性的乘积调制干扰^[12];针对信号频率特征的附加频率调制转发干扰^[13]、混沌噪声调频干扰^[14];针对信号相位特征的调相干扰等^[15,16]。其中,间歇采样转发干扰从设计思想上具有一定的独特性,其通过对雷达信号进行低速率的间歇采样处理,可以产生逼真的相干假目标串的干扰效果^[17-20],是一种有效的部分相干干扰方式。借鉴对 SAR 干扰的分段调制思想,通过对信号脉内和脉间的参数调制,可以产生局部区域的压制干扰^[21,22]。将该思想应用于 ISAR,可以在提高部分相干干扰功率利用率的同时,产生灵活可控的干扰效果。

收稿日期: 2016-04-22; 改回日期: 2016-09-09; 网络出版: 2016-11-14

*通信作者: 俞道滨 ydbaidy@163.com

本文在 ISAR 成像干扰特点的基础上, 借鉴间歇采样干扰的思想, 提出一种基于多相位分段调制的干扰技术, 能够摆脱 DRFM 结构的限制, 产生兼具压制干扰和欺骗干扰特点的干扰效果, 在一定范围内能够覆盖被保护目标的 2 维成像, 破坏 ISAR 对目标的成像识别。理论分析和计算机仿真证明了本文方法能以较小干扰功率干扰 ISAR 的成像。

2 多相位分段调制的基本原理

对雷达信号的多相位分段调制, 即在信号的不同时间分段上调制不同的相位值, 得到相应的干扰信号。对该干扰调制样式作如下限定:

(1) 无论雷达信号为何种样式, 调制后生成的干扰信号与原信号的时间长度相等。

(2) 多相位指代的调制相位值可以取 $[0, 2\pi]$ 上的任意值, 取值个数 ≥ 2 , 且数量为有限个。

(3) 分段指代的信号时间长度可以是小于原信号长度的任意值, 且对分段的规则可以是等分的, 也可以是非等分的。

在以上信号调制处理规则的限定下, 可以将该类信号调制视为一个在相位-时间平面上的 2 维赋值过程, 其中 X 轴表示调制相位值的大小, Y 轴表示信号分段的长度。以三相非等分调制为例, 在相位-时间 2 维平面上, 信号的多相位分段调制原理如图 1 所示。

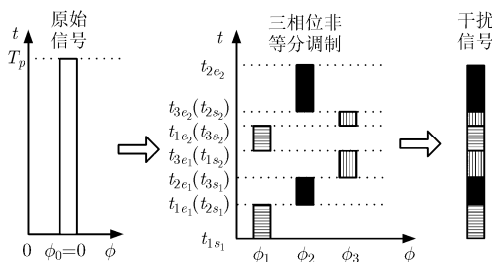


图 1 多相位分段调制原理示意图

设原信号为 $s(t)$, 调制相位值分别为 ϕ_1, ϕ_2 和 ϕ_3 , 设在整个信号调制过程中, 调制相位值为 ϕ_1 的所有信号分段的起始和截止时刻分别为 t_{1s_i} 和 t_{1e_i} , 其余信号分段起始和截止时间点定义方法与第 1 路的类似。在上述参数说明的基础上, 将分段信号间的调制相位值跳变用阶跃函数 $\varepsilon(t)$ 来表示, 得到的输出结果相当于原信号与复合函数相乘, 即

$$s_j(t) = s(t) \cdot p(t) \quad (1)$$

其中,

$$\begin{aligned} p(t) &= \exp \left\{ \phi_1 \sum_{i=1}^{n_1} [\varepsilon(t - t_{1s_i}) - \varepsilon(t - t_{1e_i})] + \dots \right. \\ &\quad \left. + \phi_p \sum_{i=1}^{n_p} [\varepsilon(t - t_{ps_i}) - \varepsilon(t - t_{pe_i})] \right\} \\ &= \text{rect} \left(\frac{t}{\tau} \right) \sum_{i=1}^{n_1} \delta \left(t - \frac{t_{1s_i} + t_{1e_i}}{2} \right) \exp(j\phi_1) + \dots \\ &\quad + \text{rect} \left(\frac{t}{\tau} \right) \sum_{i=1}^{n_p} \delta \left(t - \frac{t_{ps_i} + t_{pe_i}}{2} \right) \exp(j\phi_p) \quad (2) \end{aligned}$$

式中, n_1, n_2 和 n_3 分别表示调制相应相位值的信号分段数, 以图 1 为例, $n_1 = n_2 = n_3 = 2$ 。分段时间起始点和分段数量确定后, 即可得到最终的干扰信号表达式。

对 ISAR 而言, 可以把雷达接收回波信号看成是目标的散射系数通过 2 维线性系统, 在信号在距离向和方位向满足解耦的条件时, 可以将该 2 维系统的处理分解为两个 1 维处理的过程, 因此, 对干扰信号的多相位分段调制而言, 信号的脉内处理和脉间处理可以分别进行参数设计, 干扰信号的调制原理如图 2 所示。由多相位调制的原理可知, 多相位分段调制为由 2 维参数组合控制下的干扰样式, 干扰信号表达式与信号分段的长度和数量、调制相位值的大小和顺序有关。

在下文中的讨论中, 重点分析在调制相位值大

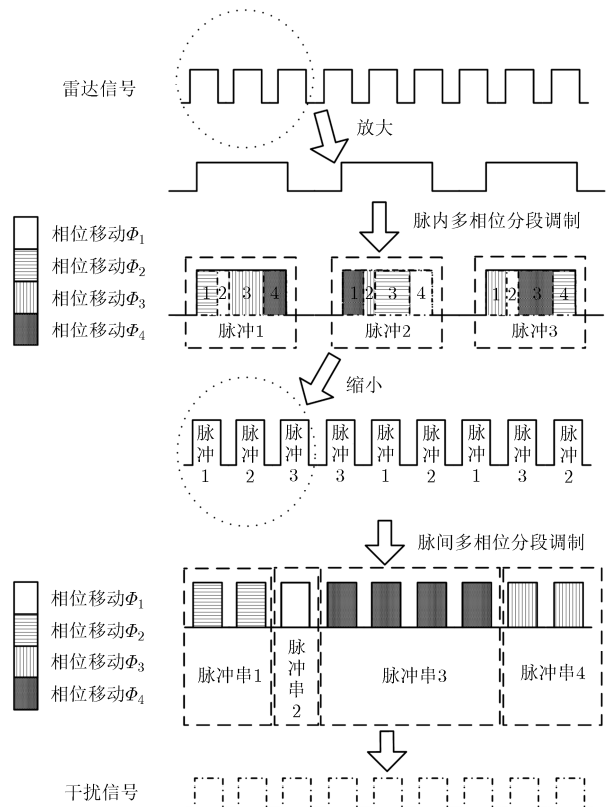


图 2 信号的脉内与脉间多相位分段调制示意图

小固定和信号分段长度相等的情况下，由分段长度与调制相位值顺序组合变化得到的干扰样式及其效果。设脉内分段长度为 τ ，脉冲宽度为 T_p ，则干扰信号2维调制后的表达式为

$$\begin{aligned} s_J(t) &= s(t) \cdot p_1(t) \cdot p_2(t) \\ p_1(t) &= \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \sum_{i=1}^{n_1} \delta\left(t - \frac{t_{1s_i} + t_{1e_i}}{2}\right) \exp(j\phi_1) + \dots \\ &\quad + \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \sum_{i=1}^{n_p} \delta\left(t - \frac{t_{ps_i} + t_{1e_i}}{2}\right) \exp(j\phi_p) \\ &= \text{rect}\left(\frac{t - \tau/2}{\tau}\right) \sum_{j=1}^p \sum_{i=0}^{N-1} \delta(t - i\tau) \exp(-j\phi_j), \\ p_2(t) &= \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \sum_{i=1}^{n_1} \delta\left(t - \frac{t_{1s_i} + t_{1e_i}}{2}\right) \exp(j\phi_1) + \dots \\ &\quad + \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \sum_{i=1}^{n_p} \delta\left(t - \frac{t_{ps_i} + t_{1e_i}}{2}\right) \exp(j\phi_p) \\ &= \text{rect}\left(\frac{t - T_p/2}{T_p}\right) * \sum_{j=1}^p \sum_{i=0}^{N-1} \delta(t - iT_p) \exp(-j\phi_j) \end{aligned} \quad (3)$$

其中， t_{js_i} 和 t_{je_i} 表示脉内调制时调制相位为 ϕ_j 的信号分段时间起始和终止点； t'_{js_i} 和 t'_{je_i} 表示脉间调制时调制相位为 ϕ_j 的信号分段时间起始和终止点。以上即为干扰信号的表达式。

3 多相位分段调制的干扰效果分析

下面分别针对距离向和方位向进行分析，得到最终干扰信号成像处理的结果。由于采用自卫式干扰，干扰机置于目标上，分析其在2维平面上的ISAR干扰结果等价于目标上一个点目标的成像结果，首先要将目标的直线运动模型转变为转台模型，模型的转化如图3所示。

假设目标以角速度 ω 匀速转动，用电磁散射中心模型来近似目标的运动模型。假设目标在 X - Y 平面内以均匀角速度 ω 绕坐标原点旋转，雷达与旋转中心距离为 $r_0(t_m)$ ，且 $r_0(t_m) = r_c + v_r t_m$ ，随着慢时间 t_m 从初始距离 r_c 变化， v_r 为径向速度。由于干扰

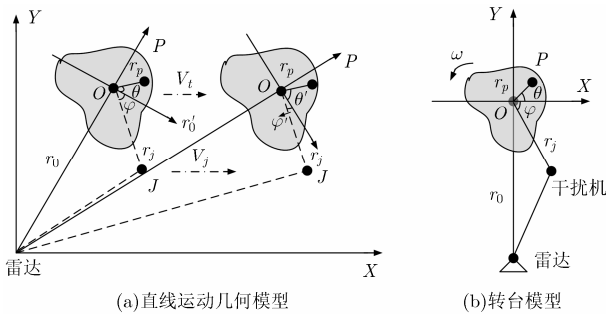


图3 ISAR成像几何示意图

设备置于目标上，其到雷达的距离与目标近似相等。设干扰机置于目标上的点 P 处，其到雷达的距离为

$$\begin{aligned} R_p &= [r_0(t_m)^2 + r_p^2 + 2r_0(t_m)r_p \sin(\theta + \omega t_m)]^{1/2} \\ &= [r_0(t_m)^2 + r_p^2 + 2r_0(t_m)y_p \cos(\omega t_m) \\ &\quad + 2r_0(t_m)x_p \sin(\omega t_m)]^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

其中， $r_p = (x_p^2 + y_p^2)^{1/2}$ ， (x_p, y_p) 为 P 点在成像平面的直角坐标。下面对距离向和方位向分别进行分析。

3.1 对距离向的分析

对距离向而言，设其参考距离为 R_{ref} (对应的参考时间为 τ_{ref})，干扰信号为式(3)经解线调处理后为

$$s_J(t_r, t_m) = A_j \left[\text{rect}\left(\frac{t - \tau/2}{\tau}\right) \sum_{j=1}^p \sum_{i=0}^{N-1} \delta(t - i\tau) \exp(-j\phi_j) \right] \cdot e^{j2\pi k(t_{\text{ref}} - \tau_{\Delta})t_r} \cdot e^{j2\pi f_0(t_{\text{ref}} - \tau_{\Delta})} \cdot p_2(t_m) \quad (6)$$

其中， A_j 表示干扰信号的包络幅度。在小转角情况下忽略产生的RVP项。由于信号脉内分段长度相等，设连续 α 个脉冲信号具有相同的调制相位值，将 $p_1(t)$ 变换的频域，可得

$$X(f) = \sum_{j=1}^p \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{N} \text{sinc}\left(\frac{i}{N}\right) \delta(f - if_r) \cdot e^{-j\pi(i/N + \phi_j)} \quad (7)$$

其中， $f_r = 1/\alpha\tau$ 。因此，干扰信号经过距离向脉冲压缩处理后得到的1维距离像为

$$\begin{aligned} s_J(f_r, t_m) &= A_j \sum_{j=1}^p \sum_{i=0}^{N-1} \frac{T_p}{N} \text{sinc}\left(\frac{i}{N}\right) \\ &\quad \cdot \text{sinc}\{T_p[f_r - if_r - k(\tau_{\Delta} - t_{\text{ref}})]\} \\ &\quad \cdot e^{-j\pi(i/N + \phi_j)} \cdot e^{j2\pi f_0(t_{\text{ref}} - \tau_{\Delta})} \cdot p_2(t_m) \end{aligned} \quad (8)$$

其中， k 为LFM信号的调频斜率。由于 $\tau_{\Delta} - t_{\text{ref}}$ 随方位向各次回波的变化而变化，在小转角模型下，假设不发生越距离单元徙动，进而不考虑包络走动带来的影响，则此时

$$\tau_{\Delta} - t_{\text{ref}} = \tau_p = 2R_p/c \quad (9)$$

如果雷达与目标之间的距离远大于目标的几何尺寸，照射于目标的电波可用平面波近似，且观测时间内转角 ωt_m 较小时，满足

$$\left. \begin{aligned} \cos(\omega t_m) &\approx 1 \\ \sin(\omega t_m) &\approx \omega t_m \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

因此，目标回波信号的时延为

$$\begin{aligned} \tau_p &= 2R_p/c = 2[r_0(t_m) + x_p \sin(\omega t_m) \\ &\quad + y_p \cos(\omega t_m)]/c \approx \frac{2}{c} [r_0(t_m) + y_p] \end{aligned} \quad (11)$$

其中，第1项 $(2/c)r_0(t_m)$ 为目标平动项，在同一方位时间，对于目标上的所有散射点，该项都是相同的，因而在平动补偿中可以较为方便的补偿。第2项为

目标在转台坐标系中 Y 轴的坐标, 作平动补偿后 $\tau_p \approx 2y_p/c$, 则距离向处理结果可近似写为

$$s_J(t, t_m) = A_j p_2(t_m) \sum_{j=1}^p \sum_{i=0}^{N-1} \tau \text{sinc}\left(\frac{i}{N}\right) \cdot \text{sinc}\left[B\left(t - \frac{i}{k\alpha\tau} - \frac{2y_p}{c}\right)\right] \cdot e^{-j\pi(i\tau/T_p + \phi_j - 2f_0(t_{\text{ref}} - \tau_\Delta))} \quad (12)$$

以上即为距离向处理结果。

3.2 对方位向的分析

对方位向而言, 从对多普勒频域分析入手, 引入小转角的假设, 易知 P 点相对雷达的多普勒频率为

$$\begin{aligned} f_d &= \frac{2}{\lambda} \frac{\partial R_p}{\partial t_m} \\ &= \frac{2}{\lambda} \left[\frac{\partial r_0(t_m)}{\partial t_m} + \omega x_p \cos(\omega t_m) - \omega y_p \sin(\omega t_m) \right] \\ &\approx \frac{2}{\lambda} \left[\frac{\partial r_0(t_m)}{\partial t_m} + \omega x_p \right] \end{aligned} \quad (13)$$

对于多相位分段调制信号而言, 信号与复合函数 $p_2(t_m)$ 相乘, 在进行包络对齐后, 方位向的脉冲压缩存在失配问题, 此时多相位调制产生的干扰项是一个随慢时间 t_m 变化的量, 进行相位对齐时无法消除, 进而在方位向上影响成像质量。由 $p_2(t_m)$ 的表达式可知, 当脉间信号分段长度相等, 设连续 β 个脉冲信号具有相同的调制相位值, 此时多普勒频移可写为

$$\begin{aligned} f_d' &= f_d + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t_m)}{dt_m} \\ &= \frac{2}{\lambda} \left[\frac{\partial r_0(t_m)}{\partial t_m} + \omega x_p \right] + \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\phi_i}{\beta T} \end{aligned} \quad (14)$$

其中, T 表示脉冲重复时间, $\Delta\phi_i$ 表示相邻两个脉冲间调制相位的差值, Δf_d 表示产生的多普勒频偏。式(14)中, 第 1 项为平动引入的多普勒频率, 该项对于同一方位时刻目标上的所有散射点都是相同的, 通过平动补偿中的相位校正可以去掉。而第 2 项为转动分量引入的多普勒值, 当目标转速均匀时, 该值与目标点的横向距离有关, 在完成平动补偿后, 直接通过方位向傅里叶变换便可实现 ISAR 方位向成像。第 3 项为由多相位调制产生的干扰项, 其附加的多普勒频移在方位向傅里叶变换后, 使点目标产生偏移。

当方位向信号分段数为 M 时, 此时计算 ISAR 的 2 维像为

$$\begin{aligned} s_J(t, f) &= A_j \sum_{j=1}^p \sum_{i=0}^{N-1} \tau \text{sinc}\left(\frac{i}{N}\right) \cdot \text{sinc}\left[B\left(t - \frac{i}{k\alpha\tau} - \frac{2y_p}{c}\right)\right] \cdot \text{sinc}\left[T_M\left(f - \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\phi_i}{\beta T} - \frac{2\omega}{\lambda} x_p\right)\right] \cdot e^{-j\pi(\phi_i - 2R_\Delta/\lambda)} \end{aligned} \quad (15)$$

以上即为干扰信号处理后的最终表达式

3.3 对干扰结果的分析

对回波信号作 ISAR 成像处理, 所得结果可表示为

$$s_r(t, f) = A_p \text{sinc}[B(t - 2y_p/c)] \cdot \text{sinc}\left[T_M\left(f - \frac{2\omega}{\lambda} x_p\right)\right] \quad (16)$$

其中, A_p 表示回波信号的包络幅度。对比式(15)和式(16)可知:

$$\Delta n_r = B \cdot \frac{i}{kp\tau} = i \cdot \frac{T_p}{\alpha\tau} \quad (17)$$

$$\Delta n_a = T_M \cdot \frac{j}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{\beta T} = j \cdot \frac{\Delta\phi}{2\pi} \frac{T_M}{\beta T} \quad (18)$$

对距离向而言, 偏移的距离单元数与脉冲宽度和脉内信号分段长度有关; 对方位向而言, 即偏移的方位单元数与成像时间和脉间信号分段长度有关。相位调制采用将以上 2 维参数进行组合, 即可得到多种干扰效果。

(1) 当脉内和脉间信号分段长度相等, 相邻信号分段间调制相位差值相等, 此时任一维上干扰点的间距相等, 可以得到 2 维的分散点干扰; α 或 β 变大时, 即脉内或脉间的信号分段长度提高, 则干扰点间距缩小, 可以得到 2 维的聚集点干扰。该干扰样式与间歇采样的干扰效果类似。

(2) 当脉内信号分段长度相等, 脉内信号分段上的调制相位值顺序变为随机, 此时距离向上各干扰点出现散焦, 出现线状干扰; 同理, 在脉间该变化亦可产生方位向上的散焦。

(3) 当脉内和脉间信号分段上的调制相位值顺序均为随机, 产生 2 维散焦, 出现遮盖干扰。脉内和脉间的信号分段长度决定了散焦区域的面积, 可产生局部遮盖和全局遮盖的效果。

(4) 在(3)中干扰样式的前提下, 当脉间信号分段变长而脉间信号分段长度不变时, 方位向散焦区域变窄, 产生距离向条状干扰。同理, 在脉内该变化亦可产生方位向条状干扰。

由此可知, 通过 2 维参数的变化, 可以产生多种干扰效果, 具有灵活可控的干扰样式。

4 仿真分析

针对已有的理论分析，以应用 ISAR 技术对 7 点目标模型进行成像为例，验证多相位分段调制干扰效果及其参数控制的正确性。模型及干扰点设置如图 4 所示，干扰参数设置如表 1 所示。

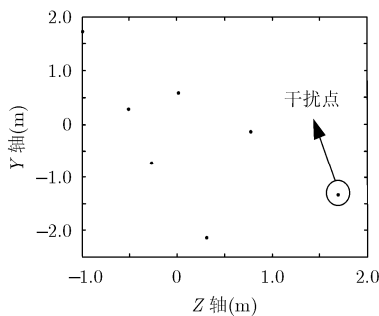


图 4 7 点模型及其干扰点设置

表 1 ISAR 仿真参数设置

参数名称	取值
雷达载频(GHz)	10
信号带宽(MHz)	1000
脉冲宽度(μs)	100
转动角速度(rad/s)	0.05
脉冲重复频率(Hz)	300
目标离雷达距离(km)	1000
目标飞行速度(km/s)	4
成像脉冲个数	600
分路数	3
调制相位值(rad)	0, $2\pi/3$, $4\pi/3$
脉内分段长度(μs)	3
脉内连续调制分段数量	3, 6
脉间连续调制分段数量	12, 24

上述参数中，转动积累角为 5.7° ，计算得到距离单元和方位单元均为 0.15 m。对多相位分段调制中的参数进行调节，对脉内和脉间的调制相位值排列分为顺序和随机两种，信号分段长度分为均匀长分段和短分段，对 2 维参数的变化进行不同的组合，验证得到的干扰效果。对不同控制参数的设置如表 2 所示，得到的干扰效果如图 5 所示。此处将干信比统一设为 5 dB。

对以上干扰效果进行分析：

(1)对于图 5(a)中的结果，其采用了顺序无延展的规律性逻辑，由公式计算可得距离向和方位向上的虚假点间距跨越的距离单元数和方位单元数分别为

表 2 不同控制参数设置

调制相位顺序	信号分段长度	干扰效果
脉内顺序+脉间顺序	均为短分段	图 5(a)
脉内顺序+脉间顺序	均为长分段	图 5(b)
脉内随机+脉间顺序	均为短分段	图 5(c)
脉内顺序+脉间随机	均为短分段	图 5(d)
脉内随机+脉间随机	均为短分段	图 5(e)
脉内随机+脉间随机	均为长分段	图 5(f)
脉内随机+脉间随机	脉内长分段+脉间短分段	图 5(g)
脉内随机+脉间随机	脉内短分段+脉间长分段	图 5(h)

$$\Delta n_r = \frac{T_p}{\alpha_1 \tau} = \frac{100e^{-6}}{3 \times 3e^{-6}} = 11.1 \quad (19)$$

$$\Delta n_a = \frac{\Delta \phi}{2\pi} \frac{T_M}{\beta_1 T} = \frac{1}{2\pi} \frac{2\pi}{3} \frac{2}{12 \times 1/300} = 16.7 \quad (20)$$

将 α 和 β 分别扩大 1 倍，可以得到图 5(b)中的结果，2 维上虚假点之间的间距缩小 1 倍。保持任一维上的规律性顺序相位调制，即可在该维上得到出现间歇的特征，而另一维上由于相位规律性被破坏，干扰点出现散焦而呈条状，如图 5(c)，图 5(d)中的结果所示。

(2)对于图 5(e)中的结果，其采用了脉内和脉间均采用了随机相位顺序的非规律性逻辑，2 维散焦而出现局部区域遮盖的压制效果，压制区域面积为 $\Delta S = 2\Delta n_r \times 2\Delta n_a$ 。将 α 和 β 分别扩大 1 倍，则信号分段长度变长，区域面积缩小，此时 $\Delta S' = \Delta S/4$ ，如图 5(f)所示。当脉内分段和脉间分段分别变短时，相应维上的遮盖长度变短，即可得到 2 维长短不同的条状干扰，此时 $\Delta S' = \Delta S/2$ ，如图 5(g)，图 5(h)中的结果所示。

需要指出的是，对局部区域遮盖干扰而言，面积的变化会导致遮盖区域亮度的变化，且面积越小遮盖区域亮度越高，干扰的总能量保持不变。

因此，通过多相位分段调制参数的灵活设置可以实现效果可控的成像干扰，可根据施加干扰保护的目标进行调整，可以对干扰的样式、区域、亮度等进行控制，避免了干扰能量在全区域的扩散，提高了干扰能量的利用率，对重点区域实现面积可控的遮盖，从而实现有效的成像干扰。

5 结论

本文提出了一种基于多相位分段调制的 ISAR 成像干扰技术，在基本处理流程的基础上给出相应的数学推导和系统实现，并对其能达到的干扰效果进行了详细的分析，得出信号分段长度和调制相位规律性可以影响 ISAR 成像 2 维相干性的结论。通

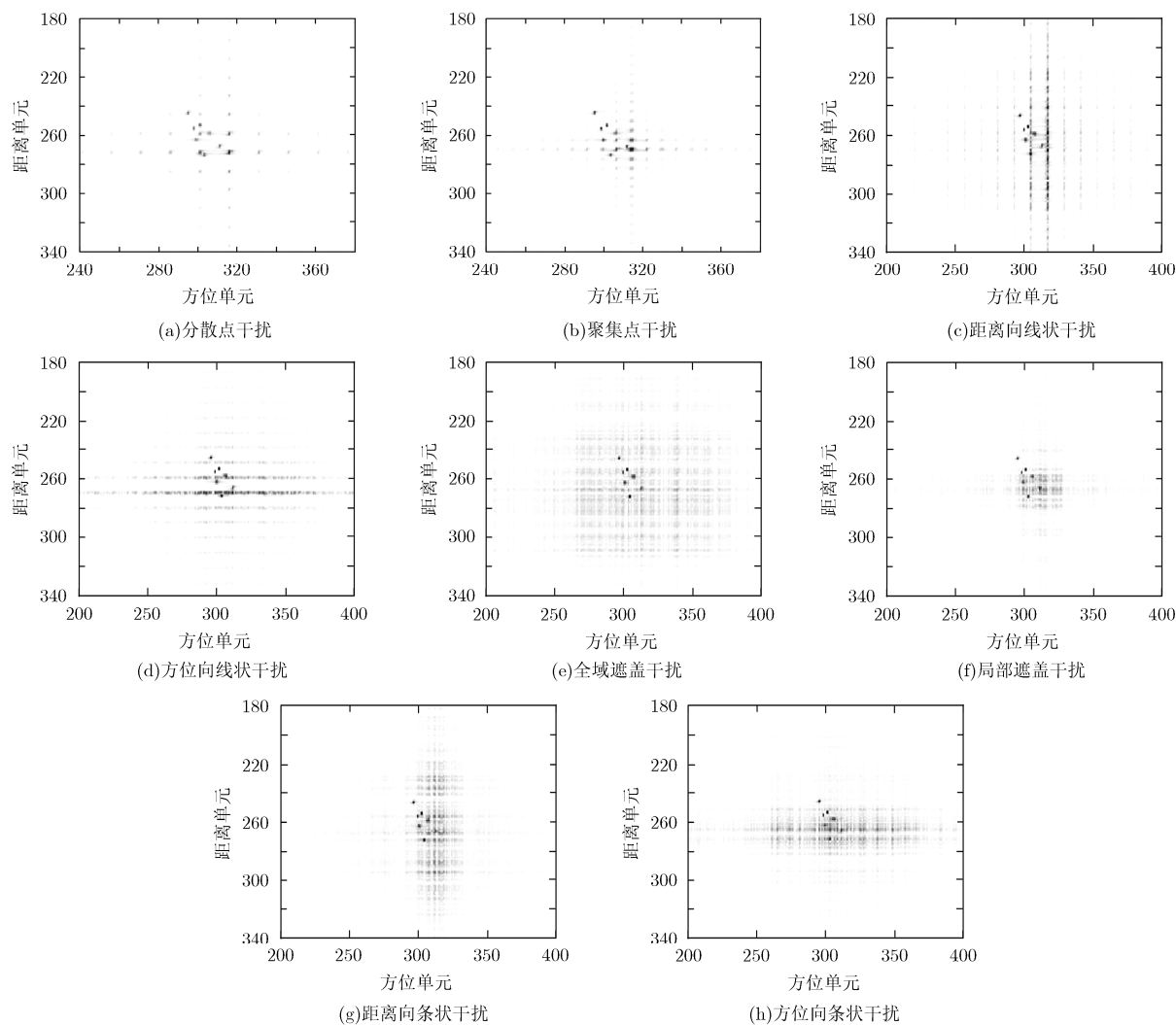


图5 干扰效果示意图

过参数设计可以实现对2维成像干扰效果的灵活控制,相关仿真实验验证了所得结论。该干扰系统对信号的处理是连续的,有效提高了干扰信号的功率利用率,能够实现多种自卫式干扰效果,破坏对目标重要特征的识别。

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, 2008: 1-20.
BAO Zheng, XING Mengdao, and WANG Tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry Press, 2008: 1-20.
- [2] 张锡祥. 现代雷达对抗技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 1-18.
ZHANG Xixiang. Countermeasure Technology of Modern Radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 1-18.
- [3] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000: 1-10.
ZHAO Guoqing. Principle of Radar Countermeasure[M]. Xi'an: Xi'dian University Press, 2000: 1-10.
- [4] 范录宏. 逆合成孔径雷达成像与干扰技术研究[D]. [博士学位论文], 电子科技大学, 2006.
FAN Luhong. Study on ISAR imaging and jamming technology[D]. [Ph. D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2006.
- [5] ZHU F, *et al.* A new method of camouflage jamming against ISAR based on compensating modulation[C]. 2008 8th IEEE International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Kunming, China, 2008: 422-425.
- [6] 和小冬, 李昀豪, 祝俊, 等. 合成孔径雷达二维失配压制干扰方法[J]. 电子信息对抗技术, 2014, 29(3): 24-28. doi: 10.3969/j.issn.1647-2230.2014.03.006.
HE Xiaodong, LI Yunhao, ZHU Jun, *et al.* A bi-dimensional mismatching suppressed jamming for countering SAR[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2014, 29(3): 24-28. doi: 10.3969/j.issn.1647-2230.2014.03.006.
- [7] HARNESS R S and BUDGE M C. A study on SAR noise

- jamming and false target insertion[C]. IEEE SoutheastCon Student Hardware Competition, Lexington, KY, USA, 2014: 1-8.
- [8] GAN R, LIU Y, and YI Z. Primary exploration on ISAR image deception jamming[C]. Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Huangshan, China, 2007: 83-86.
- [9] YANG Jing, LI Yunjie, and ZHANG Yixin. Realization of novel DRFM jamming source based on AFB-SFB[C]. International Congress on Image and Signal Processing, Beijing, China, 2012: 1841-1846.
- [10] 张宏伟, 俞静一, 何芳. 基于散射点模型的 ISAR 干扰技术研究[J]. 现代雷达, 2014, 36(4): 85-88. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2014.04.019.
- ZHANG Hongwei, YU Jingyi, and HE Fang. A study on ISAR jamming technology based on scattering point model[J]. *Modern Radar*, 2014, 36(4): 85-88. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2014.04.019.
- [11] 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): 867-872. doi: 10.3969/j.issn.1005-0388.2008.05.014.
- BAI Xueru, SUN Guangcai, ZHOU Feng, *et al.* A novel ISAR jamming method based on rotating angular reflector[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(5): 867-872. doi: 10.3969/j.issn.1005-0388.2008.05.014.
- [12] 徐乐涛, 冯德军, 刘庆富, 等. 对逆合成孔径雷达的乘积调制干扰方法[J]. 电子学报, 2014, 42(12): 2501-2508. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.12.024.
- XU Letao, FENG Dejun, LIU Qingfu, *et al.* ISAR decoy generation by utilizing coherent multiplication modulated jamming[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(12): 2501-2508. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.12.024.
- [13] 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. doi: 10.3321/j.issn:0372-2112. 2006.09.008.
- ZHANG Yu, DONG Chunxi, CUI Yanpeng, *et al.* Coherent jamming technique countering ISAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(9): 1590-1594. doi: 10.3321/j.issn:0372-2112. 2006.09.008.
- [14] 杨瑛, 邓鹏飞, 刘春泉. 混沌噪声调频信号对 UWB-SAR/ISAR 成像的干扰[J]. 电讯技术, 2008, 48(9): 75-78. doi: 10.3969/j.issn.1001-893X.2008.09.018.
- YANG Ying, DENG Pengfei, and LIU Chunquan. Chaotic noise FM signal jamming on UWB-SAR/ISAR imaging[J]. *Telecommunication Engineering*, 2008, 48(9): 75-78. doi: 10.3969/j.issn.1001-893X.2008.09.018.
- [15] 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. doi: 10.3969/j.issn.1003-0530.2007.01.022.
- LI Yuan, LIU Jianxin, and CHEN Huilian. A jamming method to ISAR based on sinusoidal phase modulation[J]. *Signal Processing*, 2007, 23(1): 101-105. doi: 10.3969/j.issn.1003-0530.2007.01.022.
- [16] 祝本玉, 薛磊, 毕大平. 基于合成等效微动点的 ISAR 干扰新方法[J]. 现代雷达, 2011, 33(1): 33-36. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2011.01.009.
- ZHU Benyu, XUE Lei, and BI Daping. A novel method of ISAR jamming based on synthesizing equivalent micro-motion point[J]. *Modern Radar*, 2011, 33(1): 33-36. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2011.01.009.
- [17] 冯德军, 徐乐涛, 王雪松. 间歇采样转发假目标的相位特性及其在角度欺骗干扰中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(3): 135-140. doi: 10.11887/j.cn.201403024.
- FENG Dejun, XU Letao, and WANG Xuesong. Phase signature of active decoy and its application in angular deception jamming using interrupted sampling repeater[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2014, 36(3): 135-140. doi: 10.11887/j.cn.201403024.
- [18] WANG Xuesong, LIU Jian, ZHANG Wenming, *et al.* Mathematic principles of interrupted-sampling repeater jamming[J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2007, 50(1): 113-123. doi: 10.3321/j.issn:1006-9275.2006.08.007.
- [19] 徐乐涛, 冯德军, 张文明, 等. 基于间歇采样转发干扰的 ISAR 群目标生成方法[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(5): 140-145. doi: 10.3969/j.issn.1001-2486.2013.05.024.
- XU Letao, FENG Dejun, ZHANG Wenming, *et al.* Group targets generation against ISAR based on intermittent-sampling repeater jamming[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2013, 35(5): 140-145. doi: 10.3969/j.issn.1001-2486.2013.05.024.
- [20] 潘小义, 王伟, 冯德军, 等. 对解线频调 ISAR 的间歇采样转发干扰[J]. 宇航学报, 2013, 34(9): 1274-1280. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2013.09.014.
- PAN Xiaoyi, WANG Wei, FENG Dejun, *et al.* Jamming dechirping ISAR based on intermittent sampling repeater[J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(9): 1274-1280. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2013.09.014.
- [21] 蔡幸福, 张雄美, 宋建社, 等. 基于脉间分段随机移频的合成孔径雷达干扰技术及其应用模型[J]. 兵工学报, 2015, 36(11): 2196-2202. doi: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.11.027.
- CAI Xingfu, ZHANG Xiongmei, SONG Jianshe, *et al.* A jamming approach to SAR based on inter-pulse subsection random frequency-shift technique and its application[J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(11): 2196-2202. doi: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.11.027.
- [22] 朱守保, 罗强, 童创明. 一种新的合成孔径雷达压制干扰方法[J]. 现代防御技术, 2012, 40(2): 104-108. doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2012.02.021.
- ZHU Shoubao, LUO Qiang, and TONG Chuangming. A new approach of blanket jamming to SAR[J]. *Modern Defence Technology*, 2012, 40(2): 104-108. doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2012.02.021.
- 俞道滨: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为空间信息对抗理论与技术.
- 吴彦鸿: 男, 1971 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为空间信息对抗理论与技术.
- 王宏艳: 女, 1978 年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理.
- 贾鑫: 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电子战系统信息处理.