

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2019.06.005

# 双干扰机 InISAR 微动调制干扰

唐峥钊, 赵国庆

(西安电子科技大学电子工程学院, 陕西西安 710071)

**摘要:** 为解决单干扰机无法对干涉逆合成孔径雷达(Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar, InISAR)产生三维干扰效果问题,结合雷达目标微多普勒效应提出了基于双干扰机的 InISAR 三维干扰方法。首先介绍了 InISAR 成像原理,同时分析了单站干扰无法对 InISAR 产生三维干扰效果的原因。随后根据微动假目标模板讨论了两部干扰机内干扰信号合成方法,计算了两干扰信号在 InISAR 各个天线通道内分别叠加产生的实时变化的干涉相位,并给出了微动假目标模板经成像处理后产生的虚假高程信息。最后通过仿真结果证明,该方法能够实现对 InISAR 的三维干扰。

**关键词:** 干涉逆合成孔径雷达; 三维干扰; 干涉相位; 微多普勒效应

中图分类号:TN974 文献标志码:A 文章编号:1672-2337(2019)06-0616-05

## A Micro-Doppler Modulation Jamming Method Against InISAR Based on Double Jammers

TANG Zhengzhao, ZHAO Guoqing

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that single jammer can't produce three-dimensional (3-D) jamming effect on interferometric inverse synthetic aperture radar (InISAR), a method capable of generating 3-D micro-Doppler modulation jamming of InISAR using double jammers is proposed based on the micro-Doppler effect of radar targets. Firstly, the principle of InISAR imaging is introduced, and the reason that why single jammer can't produce three-dimensional (3-D) jamming effect on InISAR is analyzed. Then the procedures of synthesizing jamming signals in two jammers are discussed according to the template of false micro-motion targets. After that, the real-time interferometric phase of two jamming signals produced in the InISAR antenna channels are superimposed, and the false elevation information of the false micro-motion targets can be generated after the image processing. Finally, the theoretical analysis and simulation results show that the method can realize the three-dimensional micro-Doppler modulation jamming of InISAR.

**Key words:** interferometric inverse synthetic aperture radar (InISAR); three-dimensional (3-D) jamming; interferometric phase; micro-Doppler effect

## 0 引言

逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)具有对非合作机动目标的二维高分辨成像能力,同时也存在以下缺陷:首先,二维 ISAR 图像是目标在距离-多普勒平面上的投影图像,不包含目标各散射中心的高程信息;其次,二

维 ISAR 图像多普勒维坐标不反映目标真实横向尺寸;此外,ISAR 成像对象多为非合作机动目标,成像效果依赖于目标运动状态,目标二维 ISAR 图像可能随时间变化而显著不同,这对非合作目标识别造成一定困难。

干涉逆合成孔径雷达(Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar, InISAR)是将干涉技术与逆合成孔径成像技术相结合的高分辨三维成

像雷达<sup>[1]</sup>。其基本思想是利用位置分布不同的多个天线获得具有一定视角差的多幅目标二维 ISAR 图像,再通过干涉相位处理<sup>[2]</sup>,恢复出目标各散射中心的高程信息,从而得到目标真实三维分布<sup>[3]</sup>。相比与传统 ISAR, InISAR 可以获得远距离运动目标的三维结构及真实尺寸<sup>[4]</sup>,且受目标姿态变化影响较小,为非合作目标识别提供了更加全面、稳定的信息,具有一定理论研究意义和工程应用价值。因此,开展针对 InISAR 的干扰技术研究也成为雷达电子对抗领域的一个热点和难点。

目前公开发表的文献资料中关于 InISAR 干扰技术的研究较少,对于干涉合成孔径雷达 (InSAR) 干扰技术的研究也尚处于起步阶段。文献[5]提出了利用多部干扰机对单航过 InSAR 产生场景欺骗干扰的干扰方法。文献[6]研究了常规噪声调制干扰和弹射式干扰对 InSAR 成像的影响。文献[7]指出单个天线任意波形调制干扰最终干涉相位都近似为常数。文献[8]研究了通过双(多)干扰机的合理配置实现对 InSAR 三维欺骗干扰的可能性。

此前研究表明,单部干扰机所发射干扰信号在 InISAR 成像期间具有近似恒定的干涉相位,导致其无法对 InSAR 产生具有高程信息的干扰效果,针对这一问题本文提出了基于双干扰机的 InISAR 微动调制干扰方法。雷达目标的微多普勒效应指由于目标部件旋转、进动、振动等微运动<sup>[9]</sup>导致成像雷达二维距离-多普勒图像方位向扩展进而使成像质量下降的现象<sup>[10]</sup>。两部干扰机通过发射带有微动调制信息的干扰信号,可在 InISAR 天线各通道内形成等效于真实微动假目标回波信号的干涉相位图,从而产生具有高程信息的三维干扰效果。文中首先给出了 InISAR 成像原理,并在此基础上推导了干扰信号合成方法,最后通过仿真验证方法的有效性。

## 1 InISAR 成像原理

InISAR 系统通常采用具有正交基线的多天线构型,包括 L 型和十字型天线结构等,前者因结构简单、相干性好等优点被较多使用,其几何结构如图 1 所示。收发天线 A 分别与接收天线 B、C

构成两对互相垂直干涉基线,基线长度都为 D。M、N 分别为 AB、AC 基线中点。以基线方向为 X、Z 轴建立如图三维坐标系 XYZA。目标点散射模型如图 2 所示,初始时刻目标散射中心 O 点坐标为  $(X_O, Y_O, Z_O)$ ,  $\theta$  为 OM 与 Y 轴正向夹角,目标上任意一散射点 P 坐标为  $(X_P, Y_P, Z_P)$ , O、P 两点与三天线及 M 点间距离分别为  $R_{AO}$ 、 $R_{BO}$ 、 $R_{CO}$ 、 $R_{OM}$ 、 $R_{AP}$ 、 $R_{BP}$ 、 $R_{CP}$ 、 $R_{PM}$ , 目标速度矢量为  $\mathbf{V}$ , 以 O 为中心、与 XYZA 坐标轴平行方向建立目标本地三维坐标系 xyzO。

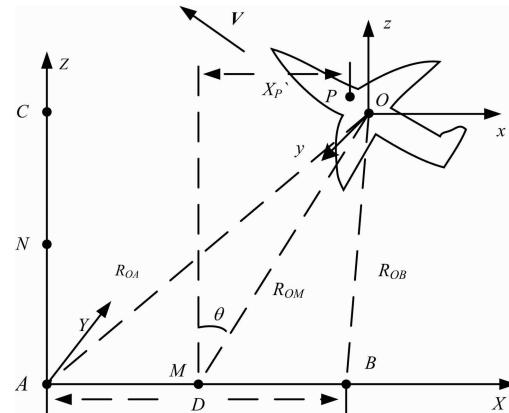


图 1 L 型三天线 InISAR 成像系统

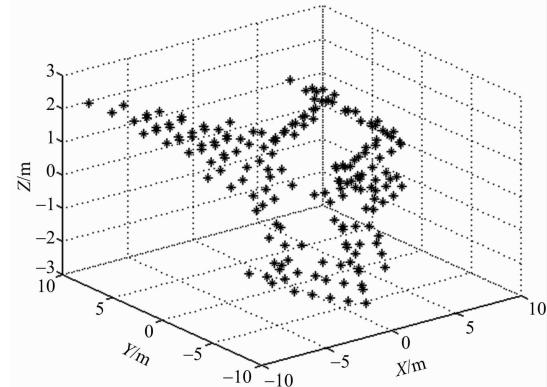


图 2 目标散射点模型

设天线 A 发射线性调频脉冲信号为

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{\gamma \hat{t}^2}{2}\right)\right) \quad (1)$$

式中,  $\text{rect}(\cdot)$  为矩形脉冲包络,  $f_c$  为发射中心频率,  $T_p$  为脉冲宽度,  $\gamma$  为调频斜率,  $\hat{t} = t - mT$  为快时间,  $T$  为脉冲重复周期,  $t_m = mT$  为慢时间,  $m = 0, 1, 2, \dots, M-1, M$  为脉冲总数。设 P 点散射系数为  $\sigma_P$ , 则天线 A 接收到 P 点回波信号为

$$S_A(\hat{t}, t_m) = \sigma_P \text{rect}\left(\frac{(\hat{t} - 2R_{AP}/c)}{T_p}\right) \cdot \\ \exp[j2\pi(f_c(t - 2R_{AP}/c) +$$

$$\gamma \frac{(\hat{t}-2R_{AP}/c)^2}{2} \Big] \quad (2)$$

设  $R_{refA}$  为参考距离, 对式(2)进行 dechirp 处理得

$$\begin{aligned} S_{rA}(\hat{t}, t_m) = & \sigma_P \operatorname{rect}\left(\frac{(\hat{t}-2R_{refA})}{T_p}\right) \cdot \\ & \exp\left[-j \frac{4\pi}{c} \gamma \left(\frac{\hat{t}-2R_{refA}}{c}\right) R_{\Delta AP}\right] \cdot \\ & \exp\left[-j \frac{4\pi}{c} f_c R_{\Delta AP}\right] \cdot \\ & \exp\left[j \frac{4\pi\gamma}{c^2} f_c R_{\Delta AP}^2\right] \end{aligned} \quad (3)$$

在距离向作傅里叶变换, 得一维距离像为

$$\begin{aligned} S_A(\hat{f}, t_m) = & \sigma_P T_p \operatorname{sinc}\left[T_p \left(\hat{f} + \frac{2\gamma}{c} R_{\Delta AP}\right)\right] \cdot \\ & \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R_{\Delta AP}\right] \exp\left(-j \frac{4\pi\hat{f}}{c} R_{\Delta AP}\right) \cdot \\ & \exp\left(j \frac{4\pi\gamma}{c^2} R_{\Delta AP}^2\right) \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\operatorname{sinc}(a) = \sin(\pi a)/(\pi a)$ ,  $\lambda$  为雷达信号波长,  $R_{\Delta AP} = R_{AP} - R_{refA}$ , 假设  $R_{\Delta AP}$  在成像时间内相对  $\hat{t}$  固定, 相对  $t_m$  线性变化, 即满足“停-走模型”,  $R_{\Delta AP} \approx R_{\Delta AP0} + V_{AP} t_m$ , 其中  $R_{\Delta AP0}$  为初始时刻  $P$  点与参考点间距离,  $V_{AP}$  为  $P$  点相对于雷达的径向速度, 则式(4)去除剩余视频相位和包络斜置项后可近似为

$$\begin{aligned} S_A(\hat{f}, t_m) = & \sigma_P T_p \operatorname{sinc}\left[T_p \left(\hat{f} + \frac{2\gamma}{c} R_{\Delta AP}\right)\right] \cdot \\ & \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_{\Delta AP0} + V_{AP} t_m)\right] \cdot \\ & \operatorname{rect}\left(\frac{t_m}{T_r}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

$T_r$  为相干积累时间, 将式(5)对慢时间作傅里叶变换可得二维 ISAR 距离-多普勒图像:

$$\begin{aligned} S_A(\hat{f}, f_m) = & \sigma_P T_p T_r \operatorname{sinc}\left[T_p \left(\hat{f} + \frac{2\gamma}{c} R_{\Delta AP}\right)\right] \cdot \\ & \operatorname{sinc}\left[T_r \left(f_m + \frac{2V_{AP}}{\lambda}\right)\right] \cdot \\ & \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_{\Delta AP}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

同理可得天线  $B$  接收回波经成像处理后的 ISAR 图像为

$$S_B(\hat{f}, f_m) = \sigma_P T_p T_r \operatorname{sinc}\left[T_p \left(\hat{f} + \frac{\gamma}{c} (R_{\Delta AP} + R_{\Delta BP})\right)\right] \cdot$$

$$\operatorname{sinc}\left[T_r \left(f_m + \frac{(R_{\Delta AP} + R_{\Delta BP})}{\lambda}\right)\right] \cdot$$

$$\exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_{\Delta AP} + R_{\Delta BP})\right) \quad (7)$$

则可得  $P$  点处干涉相位为

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{AB} = & \operatorname{Angle}[S_A^*(\hat{f}, f_m) S_B(\hat{f}, f_m)] = \\ & \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_{\Delta AP} - R_{\Delta BP})\right) \triangleq \\ & \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R_{AB}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $\operatorname{Angle}(\cdot)$  表示取复数值相位。InISAR 成像过程中, 通过对各天线接收回波的包络对齐及相位校正等运动补偿处理, 目标可等效为远场转台模型, 此时  $P$  点干涉相位可表示为

$$\Delta\phi_{AB} = \frac{2\pi}{\lambda} D \sin\theta = \frac{2\pi}{\lambda} D \frac{X_p}{R_{OM}} \quad (9)$$

可得  $P$  点在  $AB$  基线方向坐标为

$$X_p = \frac{\lambda R_{OM} \Delta\phi_{AB}}{2\pi L} \quad (10)$$

同理, 利用  $AC$  两天线接收回波数据干涉处理可得  $P$  点在  $AC$  基线方向坐标为

$$Z_p = \frac{\lambda R_{OM} \Delta\phi_{AC}}{2\pi L} \quad (11)$$

在远场条件下,  $P$  点在  $Y$  轴坐标  $Y_p$  与斜距  $R_{AP}$  近似相等, 可通过测距获得。则经过以上步骤, 可得  $P$  点三维空间坐标, 实现了对该散射点的三维干涉成像。

## 2 单站干扰分析

采用如图 1 所示系统模型, 假设单部干扰机位置坐标为  $J_1(X_{J1}, Y_{J1}, Z_{J1})$ , 干扰机与天线距离分别为  $R_{J1A}(t), R_{J1B}(t), R_{J1C}(t)$ 。则  $t_m$  时刻干扰信号在  $AB$  天线通道内相位差为

$$\Delta\phi_{AB}(t_m) = -j \frac{2\pi}{\lambda} (R_{J1A}(t_m) - R_{J1B}(t_m)) \quad (12)$$

式中,

$$\begin{aligned} R_{J1A}(t_m) - R_{J1B}(t_m) = & \sqrt{X_{J1}(t_m)^2 + Y_{J1}(t_m)^2 + Z_{J1}(t_m)^2} - \\ & \sqrt{(X_{J1}(t_m) - D)^2 + Y_{J1}(t_m)^2 + Z_{J1}(t_m)^2} \end{aligned} \quad (13)$$

将式(13)在  $X_{J1}$  处泰勒展开并忽略高次项得

$$R_{J1A}(t_m) - R_{J1B}(t_m) \approx \sqrt{D^2 - 2X_{J1}D^2} \quad (14)$$

由式(14)可知, 由于 InISAR 成像期间  $X_{J1}$  近

似不变,则单干扰机干涉相位近似为恒定值,因此无法对InSAR产生具有高程信息的干扰效果。

### 3 双干扰信号产生

干扰信号产生流程如图3所示。

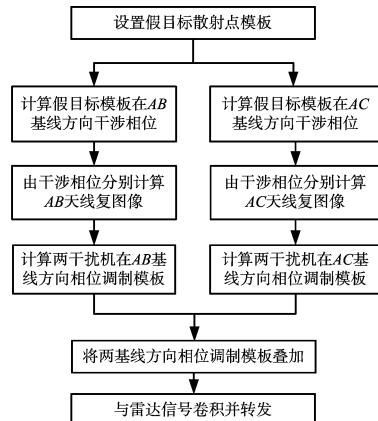


图3 干扰信号产生流程图

仍采用图1系统模型。设两干扰机位置坐标为 $J_1(X_{J1}, Y_{J1}, Z_{J1})$ , $J_2(X_{J2}, Y_{J2}, Z_{J2})$ ,两干扰机与天线距离分别为 $R_{J1A}$ , $R_{J1B}$ , $R_{J1C}$ , $R_{J2A}$ , $R_{J2B}$ , $R_{J2C}$ 。设假目标模板由N个散射点组成,各假目标点初始位置随机分布在O点周围半径 $R_p$ 范围内,且绕O点作角速度为 $\omega_p$ 的圆周运动。

设第*i*个假目标点在 $t_m$ 时刻三维坐标为 $P_i(x_i(t_m), y_i(t_m), z_i(t_m))$ ,与AB天线距离差为 $\Delta R_{ABP_i}(t_m)$ 。则由式(8)可得 $t_m$ 时刻假目标模板在AB天线对的干涉相位为

$$\Delta\phi_{AB}(t_m) = \sum_{i=1}^N \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R_{ABP_i}(t_m)\right) \quad (15)$$

设两干扰机发射的干扰信号分别为 $J_1$ 和 $J_2$ ,两干扰信号在A,B天线聚焦后的复图像分别为 $S_{AJ1}$ , $S_{AJ2}$ 和 $S_{BJ1}$ , $S_{BJ2}$ ,A天线聚焦后复图像 $S_A(x,y)$ 可表示为两干扰信号复图像的叠加,即

$$S_A(x,y) = S_{AJ1}(x,y) + S_{AJ2}(x,y) \quad (16)$$

设两干扰机自身在A,B天线对的干涉相位分别为 $\Delta\phi_{ABJ1}$ 和 $\Delta\phi_{ABJ2}$ ,由式(9)可知干涉相位由干扰机和天线相对位置决定,在本系统模型中为常数。

B天线复图像等效于由A天线复图像补偿假目标干涉相位得到,实际通过补偿两干扰机干涉相位后叠加得到,即

$$S_A(x,y) \exp(j\Delta\phi_{AB}(t_m)) =$$

$$S_{AJ1}(x,y) \exp(j\Delta\phi_{ABJ1}) + \\ S_{AJ2}(x,y) \exp(j\Delta\phi_{ABJ2}) \quad (17)$$

由式(16)、式(17)可得

$$S_{AJ1}(x,y) = S_A(x,y) \cdot \\ \frac{\exp(j\Delta\phi_{ABJ2}) - \exp(j\Delta\phi_{AB}(t_m))}{\exp(j\Delta\phi_{ABJ2}) - \exp(j\Delta\phi_{ABJ1})} \quad (18)$$

$$S_{AJ2}(x,y) = S_A(x,y) \cdot \\ \frac{\exp(j\Delta\phi_{AB}(t_m)) - \exp(j\Delta\phi_{ABJ1})}{\exp(j\Delta\phi_{ABJ2}) - \exp(j\Delta\phi_{ABJ1})} \quad (19)$$

即当 $J_1$ 和 $J_2$ 在A天线聚焦后图像 $S_{AJ1}(x,y)$ 和 $S_{AJ2}(x,y)$ 满足式(18)、式(19)时,可在AB基线方向产生等效于假目标模板的干涉相位。

$S_A(x,y)$ 等效于假目标模板在A天线成像效果,则由式(6)得其相位信息 $\phi_A(t_m)$ 为

$$\phi_A(t_m) = \sum_{i=1}^N \exp\left[T_r\left(f_m + \frac{2V_{AP}}{\lambda}\right) - j \frac{4\pi}{\lambda} R_{Ai}(t_m)\right] \quad (20)$$

式中, $R_{Ai}(t_m)$ 为 $t_m$ 时刻第*i*个假目标点到天线A的距离。 $S_A(x,y)$ 可表示为

$$S_A(x,y) = \sum_{i=1}^N \sigma_i \exp\left[T_r\left(f_m + \frac{2V_{AP}}{\lambda}\right) - j \frac{4\pi}{\lambda} R_i(t_m)\right] \quad (21)$$

式中, $\sigma_i$ 为第*i*个假目标点的散射系数。

由式(8)得两干扰机在AB天线对的干涉相位为

$$\Delta\phi_{ABJ1} = \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_{AJ1} - R_{BJ1})\right) \quad (22)$$

$$\Delta\phi_{ABJ2} = \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_{AJ2} - R_{BJ2})\right) \quad (23)$$

将式(15)、式(21~23)分别代入式(18)、式(19)可求得 $S_{AJ1}$ , $S_{AJ2}$ 。至此,将两干扰机在AB基线方向干扰问题转化为对天线A的两个二维干扰问题。根据传统欺骗调制干扰方法,可求得此时干扰信号相位模板,设为 $\Delta\phi_{J1AB}(t_m)$ , $\Delta\phi_{J2AB}(t_m)$ 。

同理,可求得AC基线方向,两干扰信号应满足的调制相位模板,记为 $\Delta\phi_{J1AC}(t_m)$ , $\Delta\phi_{J2AC}(t_m)$ 。

由于AB、AC两基线方向垂直,干扰信号在某一基线方向产生的高程信息在另一基线方向表现为同一分辨单元内,可相互叠加,则可得两干扰机实时调制相位模板为

$$\phi_{J1}(t_m) = \Delta\phi_{J1AB}(t_m) + \Delta\phi_{J1AC}(t_m) \quad (24)$$

$$\phi_{J2}(t_m) = \Delta\phi_{J2AB}(t_m) + \Delta\phi_{J2AC}(t_m) \quad (25)$$

最后将干扰信号与截获的雷达信号卷积并转发可得到三维微动调制干扰效果。

#### 4 仿真及结果分析

本仿真采用如图 1 所示场景, 目标点散射模型如图 2 所示。以天线 A 为坐标原点, 基线长度为 10 m, 目标散射中心坐标为 O(50 km, 20 km, 10 km)。目标在 XYO 及 XOZ 平面内正向旋转角速度均为 0.02 rad/s, 雷达信号载频为 10 GHz, 带宽为 200 MHz, 脉宽为 10 μs, 重频为 200 Hz, 脉冲积累个数为 512 个, 干扰机采样率为 480 MHz。

图 4 为无干扰时 InISAR 成像效果图。图 5 为附加单部干扰机射频噪声干扰的目标 InISAR 图像, 由图 5 可以看出单部干扰机的干扰效果具有恒定的高程信息, 无法有效对 InISAR 图像造成影响。

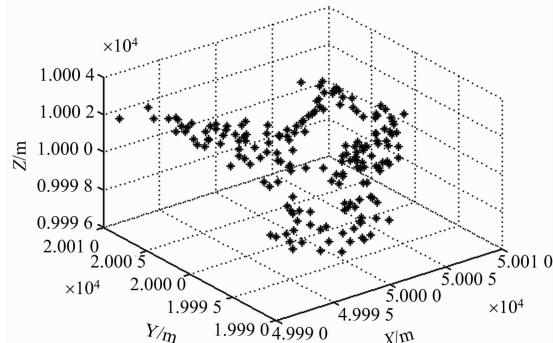


图 4 无干扰时 InISAR 图像

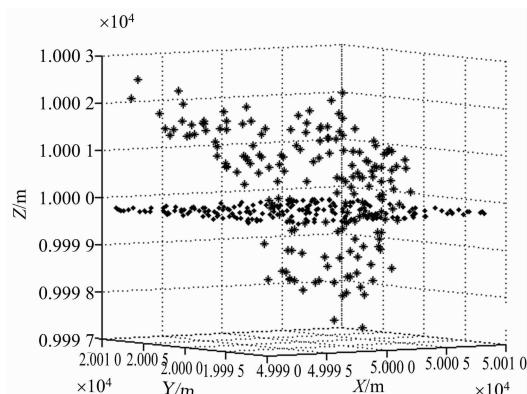
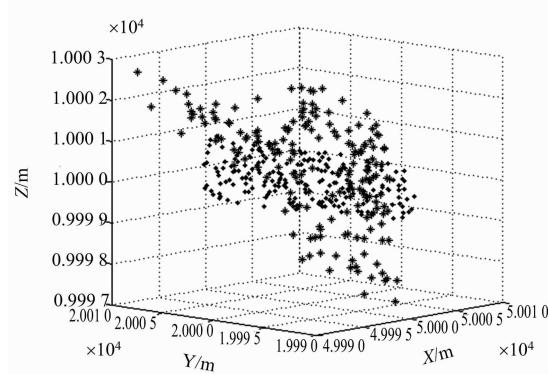


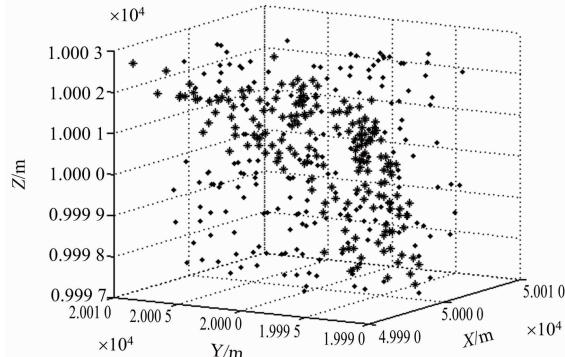
图 5 单干扰机射频噪声干扰

图 6 为双干扰机微动调制干扰效果图。设存在 10 个旋转微动假目标点, 其初始位置随机分布在目标散射中心周围半径  $r_p$  内, 同时各假目标点

绕目标散射中心以角速度 10 rad/s 进行圆周运动。图 6(a)和图 6(b)分别为  $r_p$  为 0.8 m 和 3 m 的干扰效果。可以看出, 旋转微动假目标点可在 InISAR 图像中产生具有高程信息的干扰条带, 且干扰条带高程范围与假目标点运动范围一致。根据需要设置假目标点运动模型, 可分别达到部分遮盖和完全遮盖真实目标 InISAR 图像的效果, 对 InISAR 目标识别及特征信息提取造成一定影响, 达到三维干扰的目的。



(a)  $r_p = 0.8$  m



(b)  $r_p = 3$  m

图 6 双干扰机微动干扰

#### 5 结束语

本文研究了双干扰机的 InISAR 微动调制干扰方法。根据旋转微动假目标散射点模板, 两部干扰机分别发射具有特定相位关系的干扰信号, 干扰信号在 InISAR 收发天线通道内叠加, 可产生等效于微动假目标散射点回波的干涉相位, 经过成像处理后可产生具有高程信息的干扰条带, 且干扰条带范围可根据假目标模板变化, 从而达到对 InISAR 的三维干扰效果。

(下转第 627 页)