第36卷第1期 电 子 与 信 息 学 报 Vol.36 No.1
2014年1月 Journal of Electronics & Information Technology Jan. 2014

基于电磁散射模型的ISAR空中目标欺骗干扰方法

赵 博 周 峰* 保 铮
(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要：该文提出一种基于目标电磁散射模型的逆合成孔径雷达(ISAR)空中目标欺骗干扰算法，利用目标电磁散射模型对雷达回波进行调制，能够模拟遮挡、多次散射等目标散射特征，并包含目标的平动、姿态等运动特性，保证了虚假目标的逼真性。该算法计算量小，具有较强的实时性。通过仿真试验验证了欺骗干扰算法的有效性，并对算法的计算复杂性进行了分析。

关键词：逆合成孔径雷达(ISAR)；欺骗干扰；姿态调制；实时性
中图分类号：TN958 **文献标识码**： A **文章编号**：1009-5896(2014)01-0194-08
DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00264

Deception Jamming for ISAR Aerial Target Based on Electromagnetic Scattering Model

Zhao Bo Zhou Feng Bao Zheng
(*Key Laboratary of Radar Signal Processing*, *Xidian University*, *Xi'an* 710071, *China*)

Abstract: Based on the electromagnetic scattering model, an algorithm of deception jamming for Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) aerial target is proposed. The simulated data of electromagnetic model is utilized to modulate the ISAR echoes, and thus the scattering characteristics of the target, such as shading and multiple scattering, can be simulated. Besides, the motion characteristics, such as translation and attitude, are also included. These ensure the fidelity of the false target. The proposed method requires less computation amount and is capable of real-time realization. Simulation results verify the effectiveness of the algorithm, and the computation complexity of the algorithm is also analyzed.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR); Deception jamming; Attitude modulation; Real-time

1 引言

逆合成孔径雷达(ISAR)具有全天时、全天候、远距离、高分辨等优点[1,2]。ISAR通过对目标进行2维高分辨成像，可以精确地描述目标的结构特性和散射中心分布特性[1]，进而提高目标的识别能力。随着ISAR在军事与民用领域的应用越来越重要，针对ISAR的电子干扰与电子抗干扰也逐渐成为研究的热点。针对ISAR的干扰可分为压制式干扰和欺骗式干扰[3−16]。压制式干扰是采用大功率随机噪声对真实的ISAR信号进行覆盖，降低回波信噪比，达到保护目标的目的。压制式干扰原理简单，但由于ISAR成像具有较高的2维积累增益，因此需要较大的干扰功率才能够获得较好的干扰效果。欺骗式干扰则是通过电子侦察等手段获得ISAR的中心频率、信号带宽、调频率等关键参数，对ISAR信号进行储频调制或重新生成转发，能够很好地模拟ISAR信号特征。欺骗式干扰信号能够获得与真实ISAR回波接近的高相干积累增益，大大降低了对干扰功率的要求，但算法复杂度也会相应增加。欺骗干扰能够形成聚焦良好的2维假目标成像结果，达到真假难辨的干扰效果，使得对方ISAR雷达无法对虚假目标和真实目标的ISAR图像做出正确的分析和辨识，实现对真实目标的隐藏与保护。

传统的ISAR欺骗干扰方法是基于点阵目标模型提出的。点阵目标模型是将目标简化为按照其形状轮廓排列的点阵，对不同位置的虚假点分别进行调制从而在ISAR中形成虚假目标的2维图像[8−11]。考虑到目标在空中是不断运动的，目标在雷达视线下的姿态也随着目标的运动发生变化，且刚体目标的游离部件及空间碎片等目标在平动的同时，还存在旋转、翻滚等微动变化[12,13]，对于这一问题，文献[14]进行了相关的研究。文献[8,9]中采用的点目标能够在一定程度上反映目标的轮廓、外形等部分信息，但并未考虑目标姿态变化引起的目标形状变化，

2013-03-04收到，2013-07-02改回
国家自然科学基金(11176022，61201283)，基本科研业务费(K5051302047, K5051202001)， 新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0916)和中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金(CAEPTHZ 201212)资助课题
*通信作者：周峰 fzhou@mail.xidian.edu.cn

文献[14]虽然考虑了不同姿态下的目标形状变化，但未考虑由此带来的目标的内部结构及不同部件之间的遮挡、多次散射等散射特性的变化，因此存在较大的局限性，难以达到逼真的欺骗干扰效果。文献[15,16]采用了根据目标散射特性设计的点阵目标模型，并在试验中获得了较好的欺骗干扰效果。但当虚假目标姿态发生变化时，虚假目标模型就需要进行相应的调整。且随着雷达工作频段的不同，目标的散射点个数及分布会发生较大变化，因此也需要多个目标模型以适应不同频段的欺骗干扰需求，建立虚假目标模型的工作量较大。并且随着方位向成像积累点数的增加，方位分辨率提高，由点阵构成的虚假目标模型在较高的方位分辨率下会出现目标点离散的现象，大大降低了欺骗干扰的有效性。

由于点目标的局限性，使其不能够很好地满足不同运动状态、不同姿态、不同频段的 ISAR 欺骗干扰需求，因此需要采用能够更逼真地反映目标特性的虚假目标模型。考虑到目标的宽带雷达回波是雷达发射的电磁波在目标表面发生散射形成的，文献[17,18]基于电磁波散射理论对目标的电磁散射特性进行了分析，文献[19-24]在雷达回波仿真中充分考虑了目标的电磁散射特性，弥补了点目标模型的不足，使仿真模拟的雷达回波更加接近真实回波。文献[25~27]则根据目标电磁特性对宽带雷达成像结果进行特征提取及目标识别等处理，获得了较好的处理结果。可见，目标的电磁特征是目标识别的重要依据，它已经被广泛应用于雷达目标的归类、识别等领域。因此 ISAR 欺骗干扰也需要考虑虚假目标的电磁散射特性，才能在目标识别等成像的后处理中达到以假乱真的目的。

本文首先对 ISAR 欺骗干扰原理进行分析，讨论了目标平动的调制方法。在此基础上，利用目标电磁散射模型对平动调制后的雷达回波进行动态调制并转发，使欺骗干扰回波能够较好地模拟目标的运动及雷达散射特性，从而达到逼真的干扰效果。文中通过对典型ISAR目标进行欺骗干扰仿真试验，验证了本文算法的有效性，并对算法的实时运算量进行了分析。

2　欺骗干扰调制原理

2.1　虚假目标姿态计算

如图 1 所示，点 I 为 ISAR 所在位置。真实目标质心位于 T 点，以 T 点零时刻所在的位置为原点建立真实目标本地坐标系 $Txyz$，x 轴以 T 运动的方向为正，z 轴垂直于 x 轴且以向上为正，y 轴根据右手定则确定。ISAR 在该坐标系下的坐标为 (x_I, y_I, z_I)，I_T 为点 I 在平面 xTy 内的投影，坐标为 $(x_I, y_I, 0)$。假设 I 点坐标已知，则可得真实目标相对于 ISAR 的零时刻瞬时斜距 R_{T0} 为

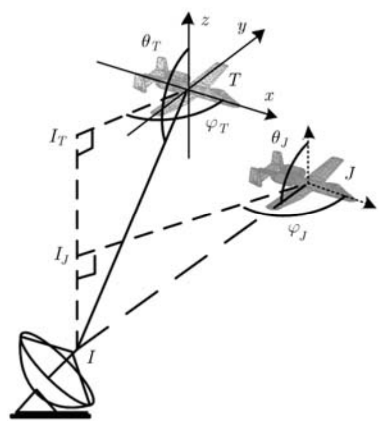


图 1　目标姿态计算示意图

$$R_{T0} = |\mathbf{TI}| = \sqrt{x_I^2 + y_I^2 + z_I^2} \tag{1}$$

图 1 中 θ_T 表示真实目标相对于雷达视线(LOS)的俯仰角，定义为 LOS 与 z 轴正方向的夹角，即

$$\theta_T = \operatorname{acos}\frac{\mathbf{TI}\cdot\mathbf{e}_z}{|\mathbf{TI}||\mathbf{e}_z|} = \operatorname{acos}\frac{z_I}{\sqrt{x_I^2 + y_I^2 + z_I^2}} \tag{2}$$

φ_T 表示真实目标相对于LOS 的方位角，定义为

$$\varphi_T = \operatorname{acos}\frac{\mathbf{TI_T}\cdot\mathbf{e}_x}{|\mathbf{TI_T}||\mathbf{e}_x|} = \operatorname{acos}\frac{x_I}{\sqrt{x_I^2 + y_I^2}} \tag{3}$$

其中 $\mathbf{e}_z$ 与 $\mathbf{e}_x$ 分别表示 z 轴与 x 轴方向的单位向量。而在实际干扰中，对于干扰机而言，I 点的坐标 (x_I, y_I, z_I) 是未知的，因此在欺骗干扰调制前，首先需要对 ISAR 进行定位。ISAR 相对于真实目标的距离参数(R_{T0})及角度参数(θ_T 与 φ_T)可通过已有的电子侦察手段获得[28]。联立式(1)，式(2)，式(3)，可得

$$\left.\begin{aligned} x_I &= R_{T0}\sin\theta_T\cos\varphi_T \\ y_I &= R_{T0}\sin\theta_T\sin\varphi_T \\ z_I &= R_{T0}\cos\theta_T \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

由式(4)可以通过电子侦察参数计算出 ISAR 在 $Txyz$ 下的位置坐标，利用该坐标可以实时计算虚假目标相对于 ISAR 的斜距、姿态等干扰调制参数。

对于 ISAR 而言，其观测目标通常为非合作目标，运动状态未知。故假设真实目标在任意时刻的位置为 $(x_T(t_m), y_T(t_m), z_T(t_m))$，其中 t_m 为慢时间。该位置坐标虽然不能用确定的表达式表示，但可以由目标搭载的惯性导航及卫星定位等设备实时获得。则任意时刻下真实目标与 ISAR 之间的瞬时斜距为

$$R_T(t_m)=|\mathbf{TI}| =\sqrt{\left(x_I-x_T(t_m)\right)^2+\left(y_I-y_T(t_m)\right)^2+\left(z_I-z_T(t_m)\right)^2} \tag{5}$$

假设虚假目标与真实目标进行编队飞行，即二者具有相同的运动状态。虚假目标的位置J点相对于T点的真实目标本地坐标预先定义为(x_J,y_J,z_J)。当ISAR 位置(x_I,y_I,z_I)已知时，可以得到任意时刻ISAR 到虚假点J的瞬时斜距为

$$\begin{aligned}R_J(t_m)&=|\mathbf{JI}|\\&=\Big(\left(x_I-x_J-z_T(t_m)\right)^2+\left(y_I-y_J-z_T(t_m)\right)^2\\&\quad+\left(z_I-z_J-z_T(t_m)\right)^2\Big)^{1/2}\end{aligned} \tag{6}$$

根据俯仰角与方位角的定义，可以得到虚假目标相对于 LOS 的俯仰角与方位角分别为

$$\begin{aligned}\theta_J&=\operatorname{acos}\frac{\mathbf{JI}\cdot\mathbf{e}_z}{|\mathbf{JI}||\mathbf{e}_z|}=\operatorname{acos}\Big\{z_I-z_J-z_T(t_m)\\&\quad\Big/\Big[\left(x_I-x_J-x_T(t_m)\right)^2+\left(y_I-y_J-y_T(t_m)\right)^2\\&\quad+\left(z_I-z_J-z_T(t_m)\right)^2\Big]^{1/2}\Big\}\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}\varphi_J&=\operatorname{acos}\frac{\mathbf{JI_J}\cdot\mathbf{e}_x}{|\mathbf{JI_J}||\mathbf{e}_x|}\\&=\operatorname{acos}\frac{x_I-x_J-x_T(t_m)}{\sqrt{(x_I-x_J-x_T(t_m))^2+(y_I-y_J-y_T(t_m))^2}}\end{aligned} \tag{8}$$

虚假目标相对与ISAR的运动可以分为两部分：由式(6)所示瞬时斜距决定的平动，以及由式(7)和式(8)共同决定的目标电磁散射特性及姿态变化。因此，虚假目标欺骗干扰信号的调制也相应地分为平动调制和目标电磁散射特性及姿态调制两步进行研究。

2.2 平动调制

假设真实目标点T与虚假目标点J均为理想点目标，首先介绍由真实点T处回波调制产生虚假点J干扰回波的平动调制原理。假设 ISAR 发射信号为

$$s(t_r)=\operatorname{rect}\left(\frac{t_r}{T_p}\right)\exp\left\{j2\pi f_c t_r+j\pi\gamma t_r^2\right\} \tag{9}$$

其中t_r为快时间，T_p为信号脉冲宽度，f_c为载频，γ为调频率，$\operatorname{rect}(u)=\begin{cases}1, & |u|\le 1/2\\ 0, & |u|>1/2\end{cases}$。干扰机位于真实目标$T$处，则干扰机截获的真实目标点$T$处的回波为

$$\begin{aligned}s_T(t_r,t_m)&=\operatorname{rect}\left(\frac{t_r-2R_T(t_m)/c}{T_p}\right)\\&\quad\cdot\exp\left\{j2\pi f_c\left(t_r-\frac{2R_T(t_m)}{c}\right)\right\}\\&\quad\cdot\exp\left\{j\pi\gamma\left(t_r-\frac{2R_T(t_m)}{c}\right)^2\right\}\end{aligned} \tag{10}$$

其中c表示光速。

为实现有效的欺骗干扰，需要在点J处产生虚假目标点。即需要获得的位于J处的虚假点目标的回波信号可表示为

$$\begin{aligned}s_J(t_r,t_m)&=\operatorname{rect}\left(\frac{t_r-2R_J(t_m)/c}{T_p}\right)\\&\quad\cdot\exp\left\{j2\pi f_c\left(t_r-\frac{2R_J(t_m)}{c}\right)\right\}\\&\quad\cdot\exp\left\{j\pi\gamma\left(t_r-\frac{2R_J(t_m)}{c}\right)^2\right\}\end{aligned} \tag{11}$$

比较式(11)与式(10)可知，为得到欺骗干扰信号$s_J(t_r,t_m)$，需要对干扰机截获信号$s_T(t_r,t_m)$进行延时与相位调制。调制量由$R_J(t_m)$与$R_T(t_m)$决定。令

$$\Delta R(t_m)=R_J(t_m)-R_T(t_m) \tag{12}$$

则有

$$\begin{aligned}s_J(t_r,t_m)&=\left[s_T(t_r,t_m)*\delta\left(t_r-\frac{2\Delta R(t_m)}{c}\right)\right]\\&\quad\cdot\exp\left\{-j2\pi f_c\frac{2\Delta R(t_m)}{c}\right\}\end{aligned} \tag{13}$$

其中*表示卷积运算。通过式(13)的延时与相位调制，即可将真实目标点T处的回波调制至虚假点J处，实现虚假目标的平动调制。

2.3 目标散射特性模型及姿态调制

由于空中目标通常具有较复杂的结构，在不同的姿态下其散射特性是不同的。因此需要根据不同的姿态参数，选择与之相对应的目标电磁散射模型，对平动调制后的干扰回波进行调制，使干扰回波中包含目标散射特性及姿态信息，达到预期的欺骗干扰效果。

目标电磁散射模型数据的获取一般有两种途径：一是建立目标的缩比模型，通过微波暗室试验获得；另一种方法是利用 3D 建模软件建立目标模型，并通过电磁计算软件(Feko 等)计算获得。前者需要微波暗室场地和测试设备等作为保障，且模型制作及内部部件变动不方便，效费比低。而后一种方法则是通过计算机实现目标散射特性计算，不受试验场地等条件的限制，并且目标建模可以通过计

算机辅助建立，目标内部部件可以灵活变更。根据不同的计算精度和计算效率需要，可以选择不同的电磁特性计算方法，如适用于精确计算的矩量法(MoM)，时域有限差分法(FDTD)，及适用于高频近似计算的几何光学法(GO)，物理光学法(PO)，几何绕射理论(GTD)，物理绕射理论(PTD)等[29]。考虑到 ISAR 所观测目标的尺寸通常远大于雷达工作波长，ISAR 一般工作在高频区。因此，本文采用 PO 法计算目标电磁模型。

目标电磁散射模型的建立需要计算目标在不同频率、不同方位角、不同俯仰角下的电磁散射特性，因此通过电磁计算得到的目标电磁散射数据库可以按照计算参数设置的不同，排列成 3 维矩阵形式，如图 2 所示。

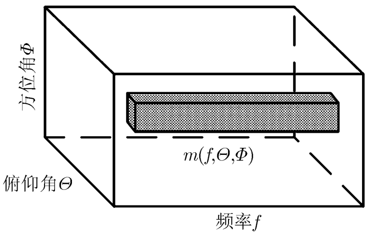


图 2 目标散射模型数据库

其中 f 表示频率，Θ 表示俯仰角，Φ 表示方位角。在确定的俯仰角和方位角下，目标的宽带散射响应可表示为 $m(f,\Theta,\Phi)$，如图中阴影区域所示。目标的 1 维距离像可以通过对 $m(f,\Theta,\Phi)$ 进行逆傅里叶变换(IDFT)获得

$$M\left(t_r,\Theta,\Phi\right) = \mathrm{IDFT}\left\{m\left(f,\Theta,\Phi\right)\right\} \tag{14}$$

与 ISAR 工作频段及带宽相关的参数 f 可通过电子侦察获得，虚假目标的姿态参数可由式(7)与式(8)计算得到。将式(7)和式(8)代入式(14)，可以得到虚假目标所需姿态下的 1 维距离像为 $M_J\left(t_r,\theta_J,\varphi_J\right)$。将包含目标模型及其姿态信息的 1 维距离像与式(13)所示点目标欺骗干扰信号进行卷积调制可得

$$\begin{aligned} s_{MJ}\left(t_r,t_m\right) = & M_J\left(t_r,\theta_J,\varphi_J\right) \\ & * \left\{\left[s_T\left(t_r,t_m\right) * \delta\left(t_r - \frac{2\Delta R\left(t_m\right)}{c}\right)\right]\right. \\ & \left. \cdot \exp\left\{-j2\pi f_c \frac{2\Delta R\left(t_m\right)}{c}\right\}\right\} \end{aligned} \tag{15}$$

式(15)所示即为目标电磁散射模型及姿态调制后的虚假目标欺骗干扰信号。至此，完成了空中目标 ISAR 欺骗干扰精细调制，对目标的运动特征、电磁散射特性及姿态变化都进行了精确的模拟，从而达到以假乱真的灵巧式欺骗干扰效果。

2.4 算法流程

综上所述，基于电磁散射模型的 ISAR 欺骗干扰方法流程如图 3 所示。

根据图 3，空中目标精细 ISAR 欺骗干扰调制算法流程可概述为以下步骤：

(1)电子侦察模块对干扰机截获的 ISAR 信号进行分析，获取 ISAR 信号的带宽等关键参数，并对 ISAR 进行定位；

(2)根据 ISAR 位置参数计算虚假目标的瞬时斜距以及俯仰角、方位角等姿态信息；

(3)利用虚假目标瞬时斜距对截获的 ISAR 信号进行平动调制；

(4)根据虚假目标的俯仰角、方位角等姿态信息，以及 ISAR 信号的频率参数，在预先建立的目标电磁模型数据库中选取相对应的目标电磁散射模型；

(5)利用目标电磁散射模型对平动调制后的干扰信号进行目标电磁散射模型及姿态调制，获得虚假目标欺骗干扰信号；

(6)对虚假目标欺骗干扰信号进行转发，完成欺骗干扰。

3　仿真试验

3.1　点目标模型与电磁散射模型欺骗干扰结果对比

电磁散射模型能够更好地反映目标的结构特征，包括典型部件在不同姿态下的散射中心分布差

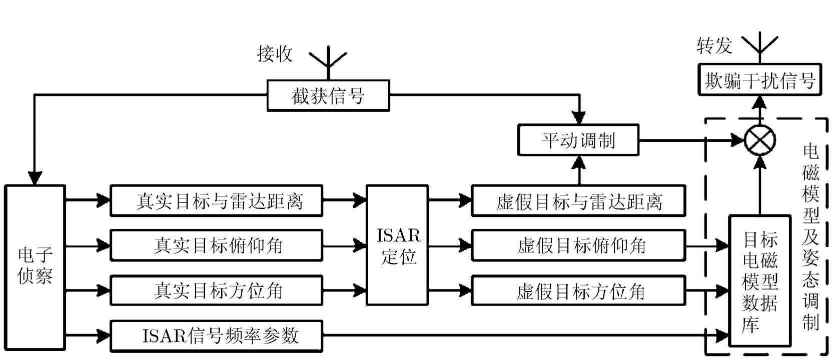


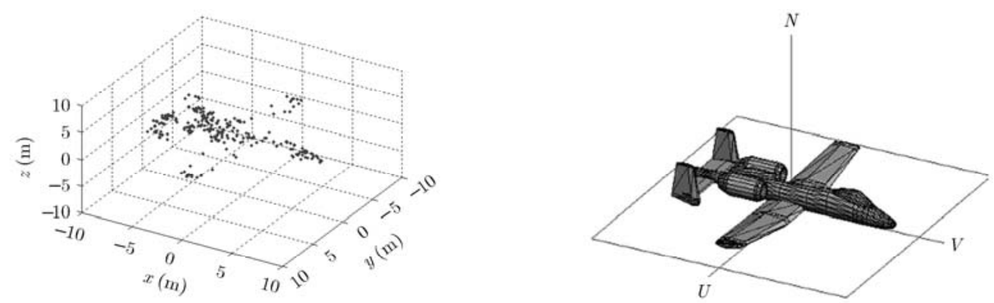
图 3 ISAR 欺骗干扰算法流程

异以及目标不同结构之间的遮挡效应、多次散射等特性。而点阵目标难以反映这些特性。因此电磁散射模型相对于点阵模型具有更大的优势。

以 A-10 飞机作为仿真目标模型。分别建立点阵模型与电磁散射模型如图 4 所示。

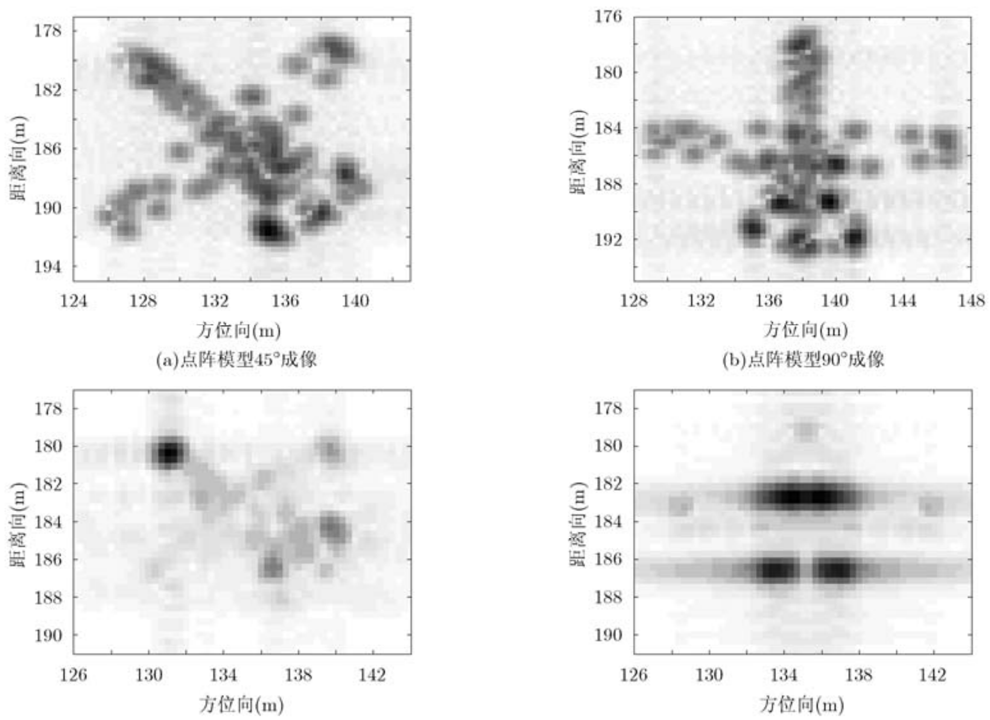
图 4(a)所示点阵模型是通过点阵排列构造出目标的基本结构，图 4(b)则是通过建立目标的精细 3D 模型，然后通过电磁计算获得目标的电磁散射特征数据库。采用距离-多普勒算法[1]对由不同模型仿真得到的回波数据进行成像处理，结果如图 5 所示。图 5(a)和图 5(b)分别为点阵目标模型在 45°和 90°方位角下的成像结果，图 5(c)和图 5(d)为电磁散射模型在 45°和 90°方位角下的干扰成像结果。比较各成像结果可知，不同姿态下的点阵目标模型成像结果仅为图像的简单旋转，不能正确反映因目标姿态旋转而引起的目标散射特性变化，即图 5(a)和图 5(b)中的目标各部分散射特性基本保持不变，无法有效描述目标的姿态变化和飞机部件之间的遮挡效应及其典型部件间的多次散射效应，通过不同姿态的连续观测很容易实现对该虚假目标的识别。

而图 5(c)和图 5(d)所示电磁散射模型成像结果在不同姿态下的强散射中心分布则存在较大差异，能够较好地反映因目标旋转而引起的遮挡效应，且能够反映机翼、引擎等典型散射部件在不同姿态下的散射特征差异。相比于点阵目标模型而言，电磁散射模型能够更好地反映目标的结构及姿态信息，更逼真地模拟 ISAR 目标的姿态旋转等特征，以达到更好的欺骗干扰效果。



(a)点阵目标模型 (b)用于电磁计算的目标3D模型

图 4 目标模型



(a)点阵模型45°成像 (b)点阵模型90°成像

(c)电磁散射模型45°成像 (d)电磁散射模型90°成像

图 5 不同姿态下点阵模型与电磁散射模型干扰成像结果对比

3.2 基于目标电磁散射模型的欺骗干扰仿真

利用目标电磁散射模型对欺骗干扰回波进行调制，以验证欺骗干扰算法的有效性。仿真参数及场景设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

带宽	300 MHz
采样率	420 MHz
脉冲重复频率	300 Hz
观测时间	2.7 s
目标运动速度	100 m/s
零时刻 ISAR 位置	(0,4.3,1.0) km
干扰点位置	(20,30,0) m

ISAR 工作在 C 波段。真实目标点沿 x 轴正向匀速运动，虚假目标点与真实目标点保持相同的运动状态。根据表 1 所示参数，对真实目标回波及干扰机调制后的干扰回波信号进行仿真，得到真实目标点与虚假目标点的 ISAR 原始回波数据。对各目标分别进行自聚焦[30]，并采用距离-多普勒算法进行成像处理，结果如图 6 所示。

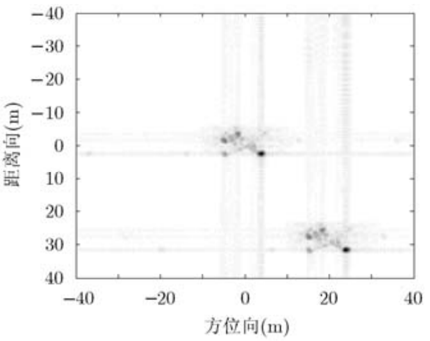


图 6 编队目标欺骗干扰结果

图 6 中场景中心处为真实目标，虚假目标位于真实目标右下方。真实目标与虚假目标均能够获得聚焦良好的成像结果。目标的头部和尾翼由于其结构特征，形成较明显的强散射中心。而机翼主要为平板结构，散射较弱。本文提出的基于电磁散射模型的 ISAR 欺骗干扰方法能够更真实有效地模拟目标的精细结构特征，使欺骗干扰结果更逼真更具有欺骗性。图中真实目标与虚假目标具有相同的运动轨迹及运动姿态，具有编队飞行的特征，能够有效地扰乱对 ISAR 成像结果的分析和解读，达到真假难辨的欺骗干扰目的。虚假目标相对于真实目标的位置可以根据不同的需要进行调整，从而对真实目标形成有效的保护。

4　算法性能分析

欺骗干扰算法的复杂性及实时可实现性是在实际工程应用中比较关注的问题。本节对基于点阵目标模型的欺骗干扰算法与本文算法的实时运算量进行对比分析。

欺骗干扰算法的算法复杂度与虚假目标的模型序列长度有关。假设目标最大尺寸为 L，ISAR 采样频率为 F_s，则 ISAR 距离向采样单元为 c/F_s。则相应的目标电磁散射模型采样点数为

$$N_T = \frac{LF_s}{c} \tag{16}$$

即式(15)中 $M_J(t_r,\theta_J,\varphi_J)$ 为 $N_T\times 1$ 的向量。假设 ISAR 信号 $s_T(t_r,t_m)$ 采样长度为 N_s 点，根据式(15)所示的欺骗干扰调制原理，进行 1 次干扰回波的调制需要完成 1 次 $N_T\times 1$ 向量与 $N_s\times 1$ 向量的卷积运算和 1 次延时。若卷积后信号长度仍截取为 N_s 点，则完成 1 次卷积调制需要 $N_T\times N_s$ 次复数乘法和 N_s 次 N_T 点的复数加法运算。

而对于基于点阵目标模型的欺骗干扰算法，假设目标模型由 N_P 个点组成，则需要对 N_P 个点分别进行如式(13)所示的延时与相位调制，然后叠加得到欺骗干扰信号。因此基于点阵目标的欺骗干扰算法完成 1 次干扰回波的调制，需要进行 N_P 次单点与 $N_s\times 1$ 向量的相乘和 N_P 次延时和 N_s 次 N_P 点的复数加法。

仍以 A-10 飞机为例，目标尺寸约为 18 m，由表 1 所示参数可得，$N_T=50$，信号采样点数 $N_s=1024$，完成一次欺骗干扰回波信号的调制需要进行 51200 次复数乘法，51200 次复数加法和 1 次延时。而如图 4(a)所示点阵目标模型，为了有效地描述目标的主要特征，模型点数 $N_P=262$，采用该模型进行一次欺骗干扰回波的调制需要进行 268288 次复数乘法，268288 次复数加法和 262 次延时。因此基于电磁散射模型的欺骗干扰算法相对与基于点阵目标的干扰算法而言运算量较小，实现本文算法所需的硬件资源较少，能够更好地保证欺骗干扰算法的实时性。

5　结束语

本文针对点阵目标模型不能模拟目标不同结构间的遮挡、多次散射等特征的问题，提出了采用电磁散射模型代替点阵目标模型的 ISAR 欺骗干扰算法。该算法能够在模拟虚假目标平动的同时，包含目标的姿态变化等信息，使虚假目标的成像结果更接近于真实目标，达到以假乱真的欺骗干扰效果。对虚假目标进行的精细延时与相位调制能够很好地

保证虚假目标的欺骗干扰质量。本文提出的欺骗干扰算法比基于点阵目标模型的 ISAR 欺骗干扰算法运算量小，具有更好的实时性。文中算法具有一定的工程应用价值，并可作为共性技术推广至 ISAR 空间目标等目标的欺骗干扰应用领域。

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, 2006: 1–18.
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Techniques[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 1–18.

[2] 周万幸. ISAR成像系统与技术发展综述[J]. 现代雷达, 2012, 34(9): 1–7.
Zhou Wan-xing. Development and prospect of ISAR imaging system and imaging technique[J]. *Modern Radar*, 2012, 34(9): 1–7.

[3] 朱守保, 罗强, 童创明. SAR压制干扰二维扩展方法研究[J]. 火控雷达技术, 2011, 40(3): 42–46.
Zhu Shou-bao, Luo Qiang, and Tong Chuang-ming. Study on a method of 2-D expending barrage jamming against SAR[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2011, 40(3): 42–46.

[4] 徐声海, 周传晟, 许炎义. 对SAR噪声压制干扰仿真与干扰效果评估[J]. 舰船电子对抗, 2012, 35(1): 90–92, 120.
Xu Sheng-hai, Zhou Chuan-sheng, and Xu Yan-yi. Simulation of noise blanket jamming on SAR and jamming effect evaluation[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2012, 35(1): 90–92, 120.

[5] 朱守保, 罗强, 童创明. 一种复合的SAR压制干扰方法研究[J]. 飞行器测控学报, 2011, 30(6): 91–94.
Zhu Shou-bao, Luo Qiang, and Tong Chuang-ming. A composite SAR barrage jamming method[J]. *Journal of Spacecraft Tracking Telemetry & Command Technology*, 2011, 30(6): 91–94.

[6] 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.
Zhu Shou-bao, Luo Qiang, and Tong Chuang-ming. A new approach of blanket jamming to SAR[J]. *Modern Defence Technology*, 2012, 40(2): 104–108.

[7] 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): 737–745.
Li Song, He Jin, Feng You-qian, *et al.*. A novel jamming method for dechirping ISAR based on micro-Doppler effect[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(6): 737–745.

[8] Li Yuan, Lü Gao-huan, and Luo Xue-mei. A method for synthesizing multi-false-targets signal for countering stepped-frequency ISAR[C]. Proceedings of Global Symposium on Millimeter Waves, Nanjing, 2008: 1–4.

[9] Li Xiao-han and Wang Jian-guo. Analysis of deception jamming to ISAR imaging system[C]. Proceedings of 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Huangshan, 2007: 68–70.

[10] 李海强. 宽带ISAR实时干扰技术及实现[D]. [硕士论文], 国防科学技术大学, 2011.
Li Hai-qiang. Research and realization of real-time ISAR jammer[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2011.

[11] 刘天鹏. 宽带DRFM相参性分析与对抗技术研究[D]. [硕士论文], 国防科学技术大学, 2010.
Liu Tian-peng. Research on the coherence and countermeasure of wideband DRFM[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2010.

[12] 王琦, 邢孟道, 保铮. 基于单距离匹配滤波的太空碎片雷达成像[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(5): 1037–1040.
Wang Qi, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. Single range matching filtering based space debris radar image[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(5): 1037–1040.

[13] 张群, 罗迎, 何劲. 雷达目标微多普勒效应研究概述[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2011, 12(2): 22–26.
Zhang Qun, Luo Ying, and He Jin. Review of the researches on micro-Doppler effect of radar targets[J]. *Journal of Air Force Engineering University* (*Natural Science Edition*), 2011, 12(2): 22–26.

[14] Peng Shi-rui, Liu Yong-chun, Li Xin, *et al.*. Study on target pose and deception jamming to ISAR[C]. 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar(APSAR), Xi'an, 2009: 526–530.

[15] Douglas J F, Phillip E P, Christopher K, *et al.*. A signal-chip false target radar image generator for countering wideband imaging radars[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2002, 37(6): 751–759.

[16] Pace P E, Fouts D J, Ekestorm S, *et al.*. Digital false-target image synthesiser for countering ISAR[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Naving*, 2002, 149(5): 248–257.

[17] Li Jie, Guo Li-xin, He Qiong, *et al.*. Characterization of 3D electromagnetic scattering from PEC man-made target above rough surface[C]. Proceedings of International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, Shenzhen, 2012: 1–4.

[18] Narayanan R M. Ultrawideband normalized radar cross sections of distributed clutter[C]. Proceedings of the IEEE Radar Conference, Atlanta, 2012: 796–800.

[19] Zhu Jie-hao, Zhou Jian-jiang, and Xia Wei-jie. High resolution radar cross section imaging based on complex target backscattering simulation[C]. Proceedings of the 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Kunming, 2008: 577–580.

[20] Zhang Peng, Liu Chun-yang, and Li Nan-jing. The simulation of SAR echo-wave signals for natural target[C]. Proceedings of the 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Kunming, 2008: 672–674.

[21] 鲍庆龙, 湛蓝, 陈曾平. 基于实测数据的宽带雷达回波半实物仿真方法[J]. 航天电子对抗, 2009, 25(2): 45–47.
Bao Qing-long, Zhan Lan, and Chen Zeng-ping. Method of HWIL simulation for wideband radar echo based on measured data[J]. *Space Electronic Counterwork*, 2009, 25(2): 45–47.

[22] 莫翠琼, 刘文术, 陈秋菊. 基于散射中心模型的ISAR回波仿真方法[J]. 航天电子对抗, 2008, 24(4): 62–64.
Mo Cui-qiong, Liu Wen-shu, and Chen Qiu-ju. ISAR echo simulation method based on scattering center model[J]. *Space Electronic Counterwork*, 2008, 24(4): 62–64.

[23] 姬伟杰, 童创明. 二维海面上舰船目标电磁散射及合成孔径雷达成像技术研究[J]. 物理学报, 2012, 61(16): 1–8.
Ji Wei-jie and Tong Chuang-ming. Research on electromagnetic scattering computation and synthetic aperture radar imaging of ship located on two-dimensional ocean surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(16): 1–8.

[24] 林世阳. 导弹目标ISAR成像仿真及对ISAR的干扰技术研究[D]. [硕士论文], 哈尔滨工业大学, 2007.
Lin Shi-yang. Simulation of ISAR imaging for a misile target and research on interference techniques on ISAR[D]. [Master dissertation], Harbin Institute of Technology, 2007.

[25] Chang Y L, Chiang C Y, and Chen K S. SAR image simulation with application to target recognition[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2011, 119: 35–57.

[26] 金添, 宋千, 孙晓坤, 等. 地表穿透合成孔径雷达浅地表金属地雷二维电磁特征研究[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2246–2249.
Jin Tian, Song Qian, Sun Xiao-kun, *et al*.. Study of subsurface metallic landmine 2-demensional electromagnetic signature in ground penetrating synthetic aperture radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(12): 2246–2249.

[27] 张波, 张红, 王子玮, 等. 电磁散射模型应用于单景高分辨率SAR影响建筑物高度反演的解算方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(12): 1460–1463, 1499.
Zhang Bo, Zhang Hong, Wang Zi-wei, *et al*.. Electromagnetic model used for building height retrieval by single high resolution SAR image[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(12), 1460–1463, 1499.

[28] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 44–69.
Zhao Guo-qing. Radar Counterwork Theory[M]. Xi'an: Publishing House of Xidian University, 2005: 44–69.

[29] Knott E F, Shaeffer J F, and Tuley M T. Radar Cross Section[M]. Raleigh: Science Technique Publishing, 2004: 63–113.

[30] Zhu Dai-yin, Zhang Wei, and Zhu Zhao-da. Phase autofocusing algorithm for compressed inverse synthetic aperture radar imaging[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 29(3): 245–253.

赵　博：　男，1986 年生，博士生，研究方向为雷达成像和雷达对抗.

周　峰：　男，1980 年生，副教授，博士生导师，主要研究方向为雷达成像和雷达对抗.

保　铮：　男，1927 年生，教授，博士生导师，中国科学院院士，主要研究领域为雷达信号处理和现代信号处理等.