

ISAR 雷达欺骗式干扰信号生成算法*

张旭峰¹, 唐宏斌², 徐少坤¹

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学 训练部, 湖南 长沙 410073)

摘要:宽带 ISAR 雷达能够从目标回波中计算得出众多目标特征, 对 ISAR 雷达的干扰信号必须高逼真地模拟目标的电磁散射特性和运动特性。从弹头目标电磁散射机理出发, 分析了干扰信号生成流程, 提出二维成像干扰的实现方案。针对虚假目标特性模拟问题, 提出基于一维距离像模板合成欺骗干扰信号的算法。算法采用距离像模板与实际宽带 ISAR 信号的卷积调制处理, 生成的干扰信号能较好地反映目标的电磁特性。通过多个脉冲的模拟, 生成的干扰信号也能够准确反映目标的运动特性。仿真实验对暗室测量数据和 HRRP 模板数据进行成像效果对比, 验证了算法的有效性。该算法对二维成像干扰机的工程设计具有指导意义。

关键词: ISAR 雷达; 欺骗干扰; 一维距离像模板

中图分类号: TP316 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)04-0049-06

A novel algorithm of deception jamming signal with ISAR radar

ZHANG Xufeng¹, TANG Hongbin², XU Shaokun¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Education Department, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Since many target characteristics can be extracted from the echoes by wideband inverse synthetic aperture radar (ISAR), the jamming signal on ISAR need to simulate the electromagnetic scattering characteristics and kinematics characteristics with high fidelity. According to the electromagnetic scattering mechanism of missile target, the generation process of jamming signal was analyzed and a scheme for two-dimensional imaging jamming was proposed. Concerning the false target characteristic simulation issues, an algorithm was presented, using high range resolution profile (HRRP) template to synthesize a deception jamming signal via convolution operation with actual ISAR signal. By multiple pulses simulations, the obtained jamming signal is capable of simulating the electromagnetic and kinematic characteristics accurately. In numerical experiments, the imaging results were compared by using dark room measurements and HRRP template data, and it verified the effectiveness of the proposed algorithm, which has guiding significance for the engineering design of two-dimensional imaging jammer.

Key words: ISAR radar; radar imaging; HRRP template

宽带雷达具有较高的距离分辨力, 通过脉冲压缩可以获得高分辨距离像 (High Resolution Range Profile, HRRP), 通过孔径合成还能够得到目标的二维逆合成孔径雷达 (Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR) 图像, 能够从目标回波中计算众多目标特征, 具有很强的识别能力^[1], 因此传统的生成虚假点目标的欺骗式干扰很难形成有效的欺骗干扰效果。根据宽带雷达信号处理方式及目标识别特征, 生成的干扰信号不仅要与雷达脉冲回波保持极高的相干性, 而且要与拟模拟目标的回波具有相似的时-频-空-极化域特征, 即干扰信号必须高逼真地模拟目标的电磁散射特性和运动特性。

针对宽带雷达干扰信号生成问题, 目前采用较多的是美国海军装备研究院提出数字图像合成 (Digital Image Synthesizer, DIS) 技术^[2-4], 选用虚假目标的距离-多普勒图像作为合成假目标的模板, 从图像中获取每一个散射点的散射强度、多普勒值和延迟量, 将这些信息作为虚假目标调制参数对干扰机截获的雷达脉冲进行幅相调制, 生成干扰信号。DIS 模拟的目标特性受图像模板的限制, 只能模拟一定视角范围内的目标回波, 无法准确模拟目标在成像角度以外的电磁散射特性, 而且干扰信号的成像分辨率受雷达图像分辨率的限制。文献[5-7]对 DIS 技术进行了跟踪研究, 并

* 收稿日期: 2013-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60025102, 60402032)

作者简介: 张旭峰 (1976—), 男, 湖南长沙人, 讲师, 博士, E-mail: apollozxf@sina.com

$$= p(t) \otimes_i \delta(t - 2 \frac{r_j}{c}) \otimes_i h(t) \quad (7)$$

要对雷达形成欺骗干扰,理想情况下要求干扰信号与拟模拟目标的回波信号相同,即 $s(t) = s_j(t)$ 。根据式(4)和式(7)可得干扰系统的响应函数为

$$\begin{aligned} h(t) &= g(t) \otimes_i^{-1} \delta(t - 2 \frac{r_j}{c}) \\ &= g(t + 2 \frac{r_j}{c}) \\ &= \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \sigma(r) \cdot \delta\left(t - \frac{2(r - r_j)}{c}\right) dr \quad (8) \end{aligned}$$

其中, \otimes_i^{-1} 表示卷积的逆运算。对于离散的散射单元,式(8)可改写为

$$h(t) = \sum_{i=1}^N \sigma(r_i) \cdot \delta\left(t - \frac{2(r_i - r_j)}{c}\right) \quad (9)$$

其中, $r_i = r_{\min} + (i - 1) \cdot dr$, dr 表示距离采样间隔(距离单元长度), $i = 1, 2, \dots, N$, $N = \frac{(r_{\max} - r_{\min})}{\Delta r} + 1$ 表示距离单元总数, $\sigma(r_i)$ 表示第 i 个距离单元的复散射系数。

综上所述,生成干扰信号的关键是在各个脉冲时刻根据拟模拟目标的散射特性确定干扰系统的响应函数 $h(t)$ 。与雷达发射信号对应起来,不妨将 $h(t)$ 记为 $h(\hat{t}, t_m)$, 其中 $\hat{t} = t - mT$ 为脉内时刻,称为“快时间”, m 为整数, T 为脉冲重复周期, $t_m = mT$ 为脉冲发射时刻,称为“慢时间”。需要注意的是,不同脉冲发射时刻目标的电磁散射特性不同,对应的系统响应函数也不相同。换言之,随着目标的运动,目标在距离向上所占据的散射单元数目和各单元的散射强度及位置均会发生变化,即式(9)中的 N 、 r_i 和 $\sigma(r_i)$ 都是随慢时间变化的。不考虑目标在单个脉冲时间内的运动,则

$$h(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^{N(t_m)} \sigma(r_i(t_m)) \cdot \delta\left(\hat{t} - \frac{2(r_i(t_m) - r_j)}{c}\right) \quad (10)$$

其中, $N(t_m)$ 表示 t_m 时刻目标距离向散射单元数目。

式(10)中, $h(\hat{t}, t_m)$ 是由 $N(t_m)$ 个不同幅度和延时的冲激脉冲组成的脉冲串,它与截获的雷达信号卷积,相当于将干扰机处的雷达信号加权移位至各个冲激脉冲的位置,等效于将雷达脉冲信号延时转发。每个延时脉冲都与回波信号具有相同的时频特性,通过脉压处理能够得到能量聚集的一维距离像,与目标产生一维距离像的机理相

同。不同 t_m 时刻各散射单元在雷达视线方向上的投影位置不同,各散射单元到干扰机的相对时延 $\tau_{im} = \frac{2(r_i(t_m) - r_j)}{c}$ 是变化的,这种变化由目标的运动引起,将导致干扰信号相位的变化,与目标运动产生多普勒的机理相同。虚假的多普勒信息可用于实现方位向的高分辨,也可用于提取虚假目标的运动信息。可见,每个脉冲时刻的 $h(\hat{t}, t_m)$ 反映了目标相应姿态下的电磁散射特性,而不同脉冲时刻 $h(\hat{t}, t_m)$ 随 t_m 的变化则体现了目标的运动特性。利用 $h(\hat{t}, t_m)$ 与干扰机截获的雷达信号进行卷积运算后发射,可对宽带雷达形成欺骗干扰。

值得注意的是,由于雷达接收到的回波信号能量与目标距离雷达的远近有关,生成干扰信号时,还需根据虚假目标的距离,对干扰信号进行增益控制。设 K 表示与目标到雷达的距离有关的常数,则式(10)可改写为

$$h(\hat{t}, t_m) = K \sum_{i=1}^{N(t_m)} \sigma(r_i(t_m)) \cdot \delta\left(\hat{t} - \frac{2(r_i(t_m) - r_j)}{c}\right) \quad (11)$$

信号与冲激脉冲串的卷积可等效为信号的延迟加权求和运算,因此,可根据图3所示的过程生成欺骗式干扰信号。

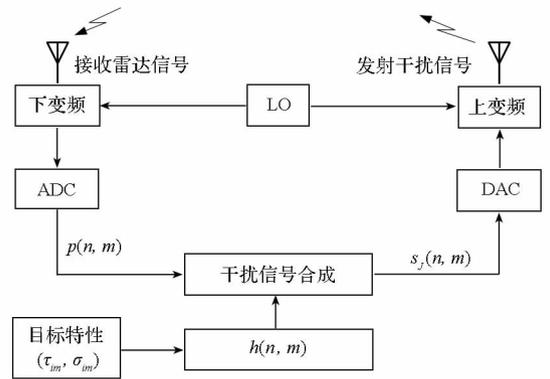


图3 基于二维像卷积的欺骗式 ISAR 干扰原理图

Fig. 3 Principle of ISAR jamming based on two-dimensional imaging.

图3中, $p(n, m)$ 、 $h(n, m)$ 和 $s_j(n, m)$ 分别表示干扰机截获的雷达信号、干扰系统响应函数和干扰机输出信号的离散采样。采用这种方式实现时域卷积时,可实时处理干扰机截获的雷达信号,即边接收边处理,使数据接收-处理-发射流动起来,无须对雷达信号进行存储,极大程度地降低了对干扰机存储能力的要求,也提高了数据处理效率,缩短了干扰机的系统延迟时间。

2 基于一维距离像模板的干扰信号生成

目标的 HRRP 是目标等效散射中心在雷达视线方向上的投影分布,也能够表征目标的电磁散射特性,因此也可用作生成干扰信号的模板。

2.1 干扰系统响应函数

目标的运动可分解为平动和转动两部分,平动过程中目标的 HRRP 形状不会变化,只是包络有平移,故此处暂不考虑平动。目标转动过程中,雷达不断发射信号并接收回波,将各次距离向回波分别沿纵向按距离分辨单元 dr 离散采样,并依次横向排列,横向(方位向)和纵向(距离向)的顺序分别以 m, n 表示。根据目标的散射中心模型,在不发生越距离单元徙动的情况下,任一距离单元内存在的散射中心不会改变,但目标的转动会使各散射中心发生径向移动。设第 n 个距离单元内有 L_n 个散射点,第 i 个散射中心在第 m 次回波中的径向位移为 $\Delta r_i(m)$ (以第 0 次回波为基准),则第 n 个距离单元的第 m 次回波数据为

$$\begin{aligned} s_n(m) &= p\left(t - \frac{2ndr}{c}\right) \cdot \sum_{i=1}^{L_n} \sigma_i e^{-j\left[\frac{4\pi f_c}{c}\Delta r_i(m) - \psi_{i0}\right]} \\ &= p\left(t - \frac{2ndr}{c}\right) \cdot \sum_{i=1}^{L_n} \sigma_i e^{j\varphi_{ni}(m)} \end{aligned} \quad (12)$$

其中,

$$\varphi_{ni}(m) = -\frac{4\pi f_c}{c}\Delta r_i(m) + \psi_{i0} \quad (13)$$

f_c 为雷达发射信号载频, c 为电磁波传播速度, σ_i 和 ψ_{i0} 分别为第 i 个子回波的幅度和起始相位。记 x_n

$(m) = \sum_{i=1}^{L_n} \sigma_i e^{-j\left[\frac{4\pi f_c}{c}\Delta r_i(m) - \psi_{i0}\right]}$, 表示第 n 个距离单元

的散射幅度,则冲激串 $s_{hrr}(m) = \sum_{n=1}^N \delta\left(t - \frac{2ndr}{c}\right) \cdot$

$x_n(m)$ 表示第 m 次回波沿距离向分布的复振幅像,可描述目标在相应姿态下的电磁散射特性。

设第 m 次脉冲到达时刻目标共包含 N 个距离单元,根据电磁散射机理,目标的第 m 次回波信号可表示为

$$\begin{aligned} s(m) &= \sum_{n=1}^N s_n(m) \\ &= \sum_{n=1}^N p\left(t - \frac{2ndr}{c}\right) \cdot \sum_{i=1}^{L_n} \sigma_i e^{-j\left[\frac{4\pi f_c}{c}\Delta r_i(m) - \psi_{i0}\right]} \\ &= p(t) \otimes s_{hrr}(m) \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)表明,目标的第 m 次回波可表示为雷达发射脉冲与目标对应姿态下复一维距离像的卷积。根据时域卷积欺骗式干扰原理,若利用目标的 HRRP 作为虚假目标模板,则干扰系统的响应

函数为

$$h(n, m) = K s_{hrr}(n, m) \quad (15)$$

由于信号处理过程中获得的复一维距离像是离散的,干扰机调制生成干扰信号的过程中,也是对离散信号进行处理,因此,式(15)描述的离散响应函数可直接用于干扰机系统。目标的复振幅像描述了目标复杂的散射规律,通过电磁计算或暗室测量获得目标不同姿态下的复振幅像序列,可直接用来构造干扰系统的响应函数。因此,基于 HRRP 生成干扰信号的关键就是获取拟模拟目标的 HRRP 序列,在干扰过程中根据目标的姿态信息查找相应的 HRRP,然后构造干扰系统响应函数。

2.2 HRRP 模板的获取及分析

对于成像雷达而言,成像期间目标的姿态都在一个较小的范围内变化,而欲生成的虚假目标都是干扰方设定的,属于“合作目标”,因此可直接对目标在某个姿态范围内进行电磁测量。测量雷达视线均匀变化,目标每转动角度 $\delta\theta$ 测量一次,相当于以 $\delta\theta$ 为间隔对目标姿态进行离散化采样,若测量范围为 $(\theta_{\min}, \theta_{\max})$,则共获得 $(\theta_{\max} - \theta_{\min})/\delta\theta + 1$ 个距离像数据。将测量数据变换到 HRRP 域并存储在干扰机系统中,根据目标姿态查找相应的 HRRP 来构造响应函数。由于拟模拟目标的运动过程是连续的,理论上,为利用 HRRP 生成逼真的干扰信号,需要事先获取目标在任意姿态下的 HRRP,但实际获取的目标 HRRP 在姿态域都是离散的,模拟的虚假目标姿态也将以 $\delta\theta$ 为间隔变化,即认为在每个脉冲重复周期内,目标的姿态变化是 $\delta\theta$ 的整数倍。当目标的姿态角不是 $\delta\theta$ 的整数倍时,就无法查找到相应姿态下的 HRRP,只能用临近姿态的 HRRP 代替。

根据 HRRP 的姿态敏感性,当相应距离单元中有多个散射点时,目标 HRRP 中尖峰的位置随视角缓慢变化,而尖峰的振幅可能是快变的,这种快变性由距离单元内子回波的相位关系变化引起。HRRP 的姿态敏感性为目标识别模板库的建立带来困难,同时也给欺骗式干扰利用 HRRP 作为虚假目标模板带来挑战。为提高目标特性的模拟精度,要求测量过程中 $\delta\theta$ 尽量小,但过小的 $\delta\theta$ 将给目标 HRRP 的测量和干扰系统的数据存储带来极大的负担,需要折中考虑。

当目标姿态变化一个较小的角度 $\Delta\theta$ 时,各距离单元中横向距离最远的两个散射点在雷达视线方向上的投影位置差变化最大,产生的相位差也最大。设雷达发射电磁波的波长为 λ ,某距离单元内散射点之间的最大横向距离差为 L ,则当姿态角变化 $\Delta\theta$

时,该距离单元内各散射点的最大相位差为

$$|\Delta\varphi| = \frac{4\pi}{\lambda}L\sin(\Delta\theta) = \frac{4\pi}{\lambda}L\Delta\theta \quad (16)$$

根据文献[1],当 $|\Delta\varphi| < \pi/2$,即 $\Delta\theta < \lambda/8L$ 时,相位变化引起的幅度变化可忽略不计。在获取拟模拟的弹头类目标的 HRRP 序列时,方位向每间隔 0.1° 测量一次即可。利用获取的 HRRP 序列生成虚假运动目标回波时,根据目标的姿态变化选取相应的 HRRP 构造干扰系统响应函数,当目标对应的姿态角不是 0.1° 的整数倍时,采取邻近姿态的 HRRP 代替,姿态角误差不超过 0.05° 。

另外,由式(15)可知,根据 HRRP 构造的响应函数是离散的,点与点之间的距离为一个距离分辨单元,记为 δ_r ,对应时间域的采样间隔是 $\delta_t = 2\delta_r/c = 1/B$, B 表示 HRRP 的测量带宽。若目标在距离向共占据 N_0 个分辨单元,则目标在雷达视线方向上的投影长度为 $N_0\delta_r$ 。设干扰系统的采样

率为 f_s ,即干扰机对雷达信号的采样时间间隔为 $1/f_s$ (对应延迟分辨单元),则生成的虚假目标一维距离像的尺寸为 $N_0c/2f_s$,即虚假目标在距离向的尺寸比拟模拟目标放大了 B/f_s 倍。因此,为了保证虚假目标成像尺寸与真实尺寸相同,获取目标 HRRP 序列时,选取的测量数据带宽应等于干扰机系统的采样率。

3 仿真实验及分析

假设雷达发射 LFM 信号,信号载频为 9GHz,带宽为 2GHz,脉宽为 $1\mu s$,脉冲重复频率为 100Hz;模拟的虚假目标即为暗室测量的弹头模型,目标做匀速圆周运动,每个脉冲周期内转动的角度为 0.2° ,与暗室测量角度间隔相同。利用 HRRP 作为虚假目标模板,生成干扰信号,与暗室测量结果进行对比。

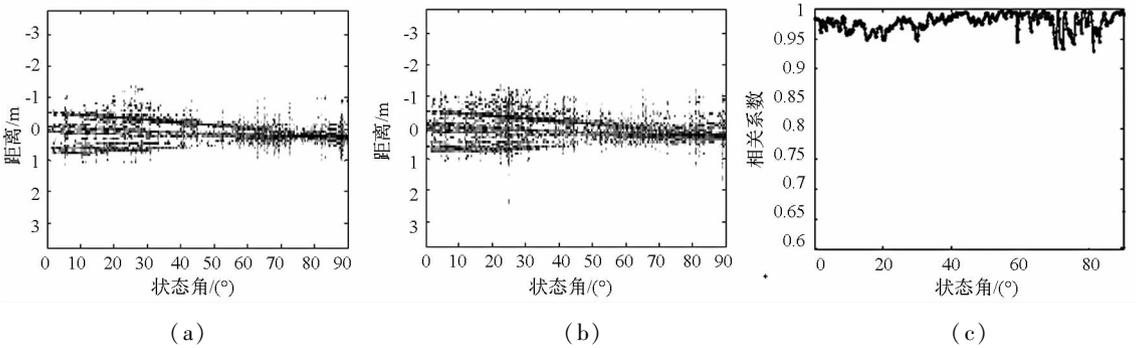
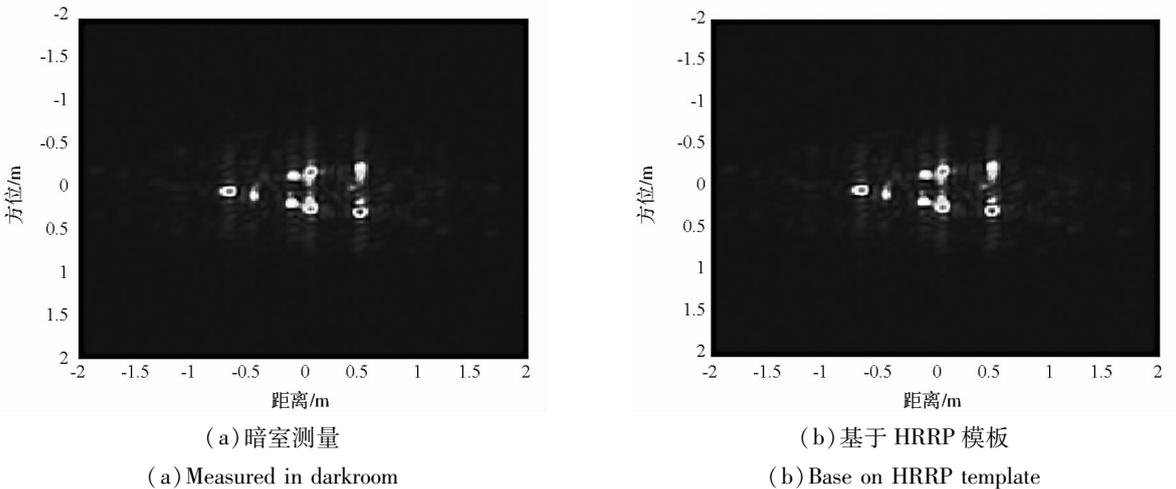


图4 暗室测量和基于 HRRP 模板的 HRRP 序列及相关系数

Fig.4 Correlation coefficient between data measured in darkroom and HRRP template

为了直观显示所提方法对虚假目标雷达回波的模拟性能,将合成的干扰信号和暗室测量数据变换到 HRRP 域,结果如图 4 所示。其中,图4(a)是暗室测量结果,图4(b)是基于 HRRP 模板生成的干扰信号的 HRRP 序列。对比可知,得到的 HRRP 序列变化趋势均与暗室测量结果较为吻合,表明该

方法对目标径向尺寸随姿态角的变化模拟精度较高,较好地模拟了目标的结构特性。图4(c)给出了 HRRP 与暗室测量 HRRP 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 姿态下的相关系数,对比可知,HRRP 模板方法得到的虚假目标 HRRP 与模型暗室测量结果具有较高的相关性,在任意姿态下的相关系数都达到 0.9 以上。



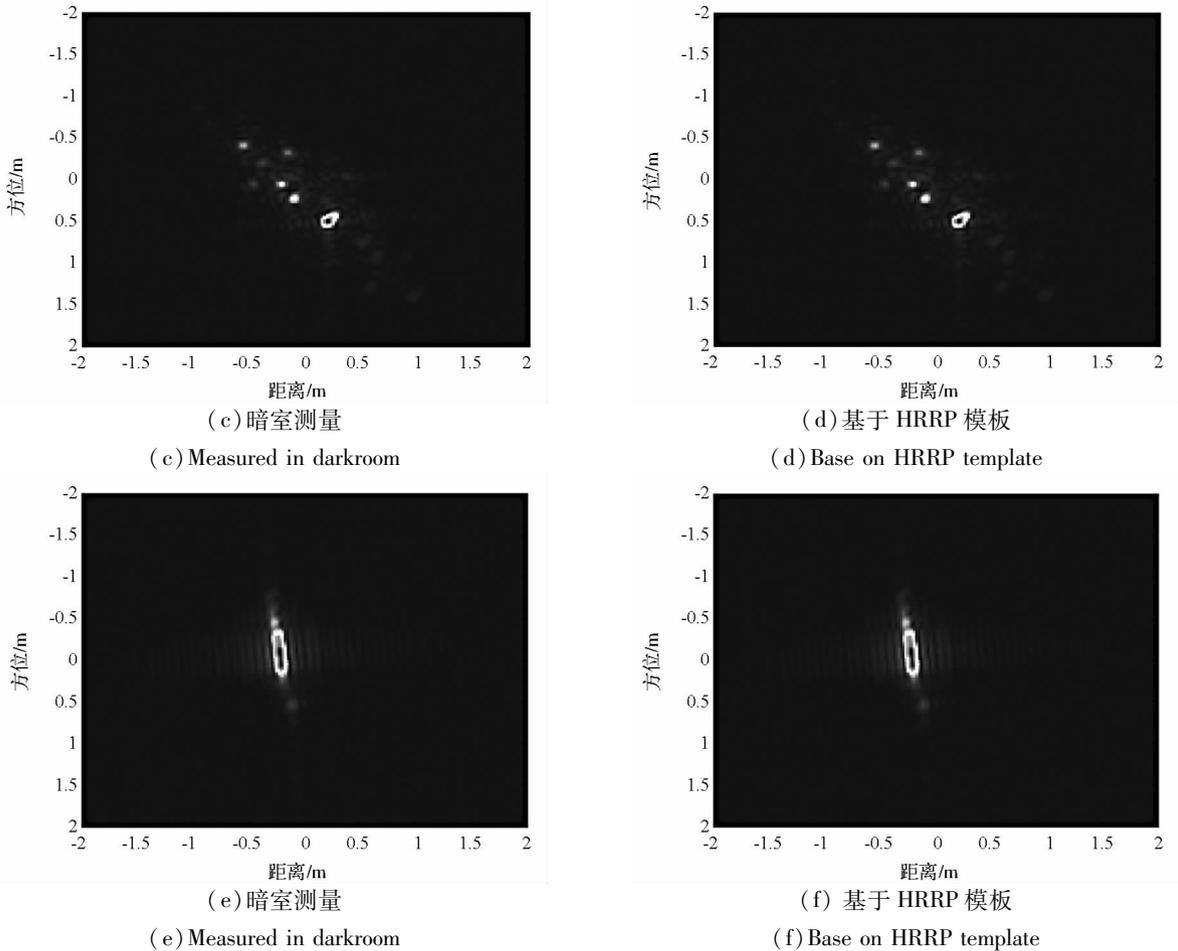


图 5 干扰信号与暗室测量数据 ISAR 像对比图

Fig. 5 ISAR images of signal measured in darkroom and jamming

图 5 给出了干扰信号和暗室测量数据的二维成像结果。其中,图 5(a)、(b)是姿态角为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 的成像结果,此时基本上不存在遮挡效应,成像结果反映了目标的几何结构;图 5(c)、(d)是姿态角为 $40^\circ \sim 50^\circ$ 的成像结果,由于存在遮挡效应,只有被电磁波照亮的部分对目标回波有贡献,成像结果中散射点近似分布在一条线上;图 5(e)、(f)是姿态角为 $70^\circ \sim 80^\circ$ 的成像结果,由于回波数据中包含电磁波垂直于锥体母线入射时的回波,目标的电磁散射主要表现为锥体目标的镜面反射,成像结果是一个在方位向展布的亮斑。从图 5 可以看出,干扰信号与暗室测量数据具有相似的二维成像结果,能较准确地模拟目标的几何结构特性。由于 HRRP 则能准确地反映目标在某一姿态下的电磁散射特性,并且 HRRP 的变化能很好地模拟目标姿态变化带来的强散射点属性的变化。因此,对于进行欺骗式干扰的工程应用来讲,其模拟精度能对成像雷达形成有效的欺骗干扰。

4 结束语

通过本文的研究与仿真可以看出,结合

HRRP 模板和卷积干扰算法,可对 ISAR 雷达实现二维像的欺骗式干扰。首先,生成的虚假目标特性具备实测目标的相似电磁特性,并能模拟目标的几何结构特性;其次,在干扰过程中根据目标的姿态信息查找相应的 HRRP,然后构造干扰系统响应函数,可实现连续的成像干扰,从而在成像序列上模拟目标的运动信息,增加干扰效果;最后,本文构建的干扰模型可实现实时信号处理,对机载、弹载干扰机的研制具有重要的工程指导意义。

参考文献 (References)

[1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. Radar imaging technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.

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

[3] Fouts D J, Pace P E, Karow C, et al. A Single-chip false target radar image generator for countering wideband image radar[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2001, 37(6): 751 - 758.

4 结论

高分辨率 UAV SAR 成像处理对运动补偿提出了更高的要求。本文提出了一种新的基于多普勒调频率参数的自聚焦处理算法。在处理过程中,算法考虑了包络误差对成像造成的影响,建立线性模型实现了视线方向加速度的分离,精确估计并校正了包络误差;考虑了相位误差沿斜距的空变性,建立了多普勒调频率随斜距变化的二阶模型,实现了相位误差的精确估计与补偿。实测数据验证显示,本文提出的算法具有很强的鲁棒性和很好的运动误差校正能力。

参考文献 (References)

- [1] Xing M D, Jiang X W, Wu R B, et al. Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2009, 47(8): 2870 - 2883.
- [2] 周峰, 邢孟道, 保铮. 一种无人机机载 SAR 运动补偿的方法 [J]. 电子学报, 2006, 34(6): 1002 - 1007.
ZHOU Feng, XING Mengdao, BAO Zheng. A method of motion compensation for unmanned aerial vehicles borne SAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 1002 - 1007. (in Chinese)
- [3] 黄源宝, 保铮, 周峰. 一种新的机载条带式 SAR 沿航向运动补偿方法 [J]. 电子学报, 2005, 33(3): 459 - 462.
HUANG Yuanbao, BAO Zheng, ZHOU Feng. A novel method for along-track motion compensation of the airborne strip-map SAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 459 - 462. (in Chinese)
- [4] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. The technique of SAR imaging [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [5] 安道祥. 高分辨率 SAR 成像处理技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学博士学位论文, 2011.
AN Daoxiang. Study on the imaging and motion compensation techniques for SAR systems with large integrated angle [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [6] Hubert M J, Nahum C. Airborne SAR-efficient signal processing for very high resolution [J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(3): 784 - 797.
- [7] Cantalloube H, Dubois-Fernandez P. Airborne X-band SAR imaging with 10cm resolution: technical challenge and preliminary results [J]. IEE Proc.-Radar Sonar Navigation, 2006, 153(2): 163 - 176.
- [8] Fabrizio B, Giovanni C. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization [J]. IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems, 1996, 32(3): 1185 - 1191.
- [9] Walter C G, Goodman R S, and Majewski R M. Spotlight synthetic aperture radar signal processing algorithms [M]. Artech House, Boston, London, 1995.
- [10] Zhang L, Qiao Z J, Xing M D, et al. A robust motion compensation approach for UAV SAR imagery [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2012, 50(8): 3202 - 3218.
- [11] Fornaro G. Trajectory deviations in airborne SAR: analysis and compensation [J]. IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems, 1999, 35(3): 997 - 1009.
- [12] Calloway T C, Donohoe G. Subaperture autofocus for synthetic aperture radar [J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1994, 30(2): 617 - 621.
- [13] Moreira J R. A new method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time motion compensation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(4): 620 - 626.
- [14] Wei Y, Yeo T S, Bao Z, Weighted least-squares estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1999, 37(5): 2487 - 2494.

(上接第 54 页)

- [4] Ekestorm R T, Karow C. An all-digital image synthesizer for countering high-resolution imaging radars [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2000.
- [5] LI Yuan, LV Gaohuan, CHEN Huilian. A new technology of multi-false targets deception against chirp waveform inverse synthetic aperture radar [C]//ICSP 2008 Proceedings, 2008: 2477 - 2480.
- [6] LI Yuan, CHEN Huilian. Deception jamming against stepped-frequency ISAR using image synthesis technology [C]//APMC 2005 Proceedings, 2005.
- [7] 李源, 蔡英武. 逆合成孔径雷达成像干扰仿真研究 [J]. 现代雷达, 2006, 28(3): 36 - 39.
LI Yuan, CAI Yingwu. Research on jamming simulation for countering ISAR imaging [J]. Modern Radar, 2006, 28(3): 36 - 39. (in Chinese)
- [8] 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 Chunxi, CUI Yanpeng, et al. Coherent jamming technique countering ISAR [J]. ACTA Electronica SINICA, 2006, 34(9): 1590 - 1594. (in Chinese)
- [9] 张煜, 杨绍全, 董春曦, 等. 对线性调频雷达的正弦加权调频干扰技术 [J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(4): 544 - 547.
ZHANG Yu, YANG Shaoquan, DONG Chunxi, et al. Sinusoidal weighted frequency modulation jamming technique countering LFM radar [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(4): 544 - 547. (in Chinese)
- [10] 张煜, 杨绍全. 对线性调频雷达的卷积干扰技术 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(6): 1408 - 1411.
ZHANG Yu, YANG Shaoquan. Convolution jamming technique countering LFM radar [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(6): 1408 - 1411. (in Chinese)