

SAR-GMTI 匀速运动虚假场景干扰信号快速生成方法*

林晓烘, 薛国义, 刘培国

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 静止虚假场景覆盖干扰无法有效对抗 SAR-GMTI 雷达系统。基于此, 本文提出了一种能将静止虚假场景干扰信号快速转换为匀速运动虚假场景干扰信号的方法。文中通过对运动目标和静止目标回波模型的分析, 推导出了两者之间的关系表达式; 根据这个表达式, 给出了实现该方法的三个步骤: 沿距离向时域进行延迟操作, 沿方位向时域进行伸缩变换, 相位补偿; 分析了该方法的计算量; 仿真实验表明该方法可对 SAR-GMTI 形成匀速运动虚假场景的干扰效果, 能同时保护静止场景和运动目标。

关键词: SAR-GMTI; 欺骗干扰; 匀速运动; 虚假场景

中图分类号: TN958 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)06-0082-06

A fast jamming method for false uniformly-moving scene against SAR-GMTI

LIN Xiaohong, XUE Guoyi, LIU Peiguo

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The deceptive stationary scene jamming is not effective for countering synthetic aperture radar (SAR) and ground moving target indication (GMTI) radar systems. To solve this deficiency, a method which transforms the stationary scene jamming signals to uniformly-moving scene jamming signals in real time is proposed. First, the echo models of moving target and stationary target were analyzed. Then, a formula which describes the relationship between moving target echo signal and stationary target echo signal was derived. Based on this formula, a three-implementation-step of this method was presented as delay operation in range time domain, stretching transformation in azimuth time domain and phase compensation. Next, the computational complexity was analyzed. Finally, the simulation results indicate that the proposed method is effective to produce false uniformly-moving scene, through which the stationary scene and important ground moving targets can be protected against SAR-GMTI.

Key words: SAR-GMTI; deception jamming; uniformly-moving; false scene

合成孔径雷达地面动目标指示技术(SAR-GMTI)雷达系统具有对固定目标进行高分辨成像和对地面运动目标进行检测的功能,可获取全面详尽的战场态势图^[1]。国外主要军事大国现已拥有多种 SAR-GMTI 雷达系统,可配备在无人机、战斗机、侦察机、导弹和卫星等平台上,这将对我方地面重要军事目标的军事部署、作战状态和战场生存能力构成极大的威胁^[2]。因此,研究有效对抗 SAR-GMTI 系统的干扰方法具有重要意义。

SAR 和 GMTI 是两种不同的工作模式,要有效对抗 SAR-GMTI,需同时针对这两种模式设计干扰信号。目前,国内外研究人员在对 SAR 实施相干干扰方面开展了大量的研究,而关于 GMTI 干扰的公开文献却较少。在 SAR 干扰方面,虚假点目标干扰^[3-4]一般利用点目标合成法生成干扰

信号,虚假场景干扰则在点目标合成法或逆成像算法生成法的基础上,通过牺牲一定精度来确保干扰的实时性^[5-10]。在 GMTI 干扰方面,李伟等在距离频域-方位时域对 SAR 接收信号调制不同的延迟相位来合成多个假目标信号^[11];徐少坤等将各假动目标对应的响应函数和作为干扰机系统的响应函数,再结合 SAR 发射信号生成干扰信号^[12];吴晓芳等提出了微动、匀速运动和匀加速运动假目标有源调制干扰方法,通过对接收到的 SAR 信号调制不同的方位信号来形成不同运动形式的假目标^[2,13-14]。由于实时性的限制,这些方法只能形成多个虚假动目标,而敌方有可能利用某些先验信息或者信号处理手段剔除掉虚假动目标^[15-16],更为有效的保护方法是形成运动虚假场景以实现重要目标的覆盖,从而使对方无法

* 收稿日期:2013-04-15

基金项目:国家部委资助项目;国家重大科技专项(2012ZX03006003-004)

作者简介:林晓烘(1984—),男,广东普宁人,博士研究生,E-mail:linxiaohong2011@yeah.net;

刘培国(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:pg731@126.com

检测到我方目标,这也是本文的出发点。

对于静止场景的覆盖干扰而言,一般先以一个合成孔径时间为单位生成存储二维矩阵数据^[9-10],再按方位时刻次序依次发射干扰信号。由于卫星的飞行轨道和工作参数比较稳定,存储的二维数据可以重复使用,这种方式对于星载 SAR 干扰更为有利。为了充分利用这些已生成的静止场景干扰信号,本文将从静止目标回波与匀速运动目标回波的相互关系入手,实现一种可以将静态虚假场景干扰信号快速转换为匀速运动虚假场景干扰信号的新方法。

1 静止目标回波与匀速运动目标回波的转换关系

图 1 为 SAR 与地面运动目标在斜距平面上的几何关系图。在该图中,以 SAR 飞行方向为 X 轴正向,以垂直于航线方向为 Y 轴正方向建立直角坐标系,原点 O 为方位向时刻为零时 SAR 所处位置; v 表示载机飞行速度; x 和 y 分别表示方位慢时间为零时匀速运动目标 P 在方位向和距离向上的坐标, v_x 、 v_y 分别为 P 在对应方向上的速度; R_0 和 $R_m(x, y; t_m)$ 分别表示方位零时刻和 t_m 时刻 P 与 SAR 之间的距离,其中 $R_m(x, y; t_m)$ 可近似表示为

$$\begin{aligned} R_m(x, y; t_m) &= \sqrt{(vt_m - (x + v_x t_m))^2 + (y + v_y t_m)^2} \\ &\approx R_0 - \frac{x(v - v_x) - yv_y}{R_0} t_m + \frac{(v_x - v)^2}{2R_0} t_m^2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $R_0 = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。当 $v_x = 0, v_y = 0$ 时,由上式可得静止目标的斜距表达式:

$$R_s(x, y; t_m) = R_0 - \frac{xv}{R_0} t_m + \frac{v^2}{2R_0} t_m^2 \quad (2)$$

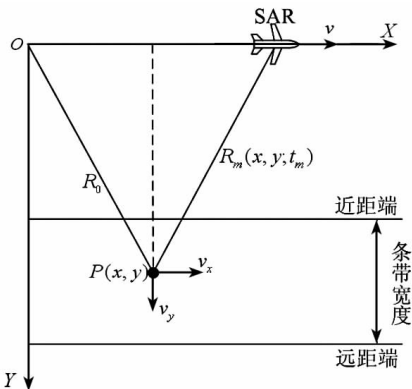


图 1 斜距平面 SAR 数据接收示意图

Fig. 1 Geometry of SAR in the slant range plane

假设 SAR 发射的线性调频信号为

$$s(\tau, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\tau}{T_p}\right) \exp\left\{j2\pi\left(f_c t + \frac{\mu_r}{2}\tau^2\right)\right\} \quad (3)$$

其中 $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数, μ_r 为调频斜率, f_c 为载频, T_p 为脉宽, $t = t_m + \tau$ 表示全时间。

经混频处理后,运动目标 P 的回波可表示为

$$\begin{aligned} s_m(\tau, t_m) &= \sigma \text{rect}\left[\frac{\tau - 2R_m(x, y; t_m)/c}{T_p}\right] \\ &\cdot \exp\left\{j\pi\mu_r\left[\tau - \frac{2R_m(x, y; t_m)}{c}\right]^2\right\} \\ &\cdot \text{rect}\left[\frac{t_m - (x + v_x t_m)/v}{T_L}\right] \\ &\cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda}R_m(x, y; t_m)\right\} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 c 为光速, σ 为目标 P 的复散射系数, T_L 为合成孔径时间。对应的静止目标回波为

$$\begin{aligned} s_s(\tau, t_m) &= \sigma \text{rect}\left[\frac{\tau - 2R_s(x, y; t_m)/c}{T_p}\right] \\ &\cdot \exp\left\{j\pi\mu_r\left[\tau - \frac{2R_s(x, y; t_m)}{c}\right]^2\right\} \\ &\cdot \text{rect}\left(\frac{t_m - x/v}{T_L}\right) \\ &\cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda}R_s(x, y; t_m)\right\} \end{aligned} \quad (5)$$

设 $u(x, y) = y/R_0$, 则 u 的变化量可表示为

$$\Delta u = -\frac{xy}{R_0^3}\Delta x + \frac{x^2}{R_0^3}\Delta y \quad (6)$$

式中, Δx 、 Δy 分别表示测绘带内方位向和距离向坐标的变化量。一般情况下, $x \ll R_0$, $\Delta x \ll R_0$, $y < R_0$, $\Delta y < R_0$, 此时 $\Delta u \approx 0$, 测绘带内各个点目标对应的 u 值可以近似为一个常数。假设测绘带中心点坐标为 (x_0, y_0) , 可将 u 值取为

$$u \approx \frac{y_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \quad (7)$$

令 $v_r = uv_y$, 联立式(1)、式(2)、式(7)可得

$$R_m(x, y; t_m) = R_s\left(x, y; \left(1 - \frac{v_x}{v}\right)t_m\right) + v_r t_m \quad (8)$$

将式(8)代入式(4)可得

$$\begin{aligned} s_m(\tau, t_m) &= \sigma \text{rect}\left(\frac{\tau' - 2R_s(x, y; t'_m)/c}{T_p}\right) \\ &\cdot \exp\left(j\pi\mu_r\left(\tau' - \frac{2R_s(x, y; t'_m)}{c}\right)^2\right) \\ &\cdot \text{rect}\left(\frac{t'_m - x/v}{T_L}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}R_s(x, y; t'_m)\right) \\ &\cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}v_r t_m\right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\tau' = \tau - 2v_r t_m/c$, $t'_m = (1 - v_x/v)t_m$ 。

则由式(5)、式(9)可推出

$$s_m(\tau, t_m) = s_s(\tau', t'_m) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} v_r t_m\right) \quad (10)$$

由该式可知,运动目标回波可以由其静止时的回波沿距离时域进行延迟操作,沿方位向进行伸缩变换,并补偿一个线性相位来获得。

2 匀速运动虚假场景干扰原理

由式(10)可看出,动静目标回波之间的关系与点目标的位置无关,即整个静态场景的回波信号可以通过统一的变换来得到匀速运动场景的回波信号。这个变换分为三个步骤。

步骤 1: 在每个方位时刻 t_m , 将静态场景干扰信号 $s_s(\tau, t_m)$ 沿距离向时域延迟 $2v_r t_m/c$ 。

为了提高运算效率,这个步骤可以通过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)来实现:

$$\begin{aligned} s_{m1}(\tau, t_m) \\ = \text{IFFT}_\tau\left(\text{FFT}_\tau(s_s(\tau, t_m)) \cdot \exp\left(-j4\pi f_r \frac{v_r t_m}{c}\right)\right) \end{aligned} \quad (11)$$

式中, FFT_τ , IFFT_τ 分别表示对干扰信号沿着距离向进行傅里叶变换和逆傅里叶变换操作, f_r 表示距离向频率, $s_{m1}(\tau, t_m)$ 为进行延迟操作后得到的信号。

假设 SAR 的采样时间间隔为 Δt , 当 $v_r \ll c\Delta t/(2t_m)$ 时, 即延迟量远小于一个采样间隔时, 此步骤可以忽略。

步骤 2: 在每个距离快时间 τ , 将 $s_{m1}(\tau, t_m)$ 沿着方位向进行伸缩变换。

一般情况下, 这个步骤需要利用插值方法来实现。sinc 插值方法是一种高效的插值方法, 在 SAR 成像处理中得到了广泛的应用。假设 sinc 插值点数为 $Q+1$ (不妨设 Q 为偶数), $s_{m1}(\tau, t_m)$ 离散化后为 $s_{m1}(p, q)$, 则伸缩变换后的信号 $s_{m2}(\tau, t_m)$ 离散形式为

$$s_{m2}(p, q) = \sum_{k=-Q/2}^{Q/2} [s_{m1}(p, k+q+l) \cdot \text{sinc}(g-k)] \quad (12)$$

式中 $l = \text{fix}(-v_x t_m f_p / v)$, f_p 为 SAR 的脉冲重复频率, $\text{fix}(\cdot)$ 表示取整运算, $g = -v_x t_m f_p / v - l$, $\text{sinc}(\cdot)$ 为 sinc 函数。

当 $v_x \ll v$ 时, 此步骤可以忽略。

步骤 3: 根据下式对伸缩变换后的信号进行相位补偿, 即可得匀速运动虚假场景干扰信号。

$$s_m(\tau, t_m) = s_{m2}(\tau, t_m) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} v_r t_m\right) \quad (13)$$

本文方法计算量集中在前两个步骤。假设静态虚假场景干扰信号距离向的采样点数为 M , 方位向采样点数为 N , 则步骤 1 需要进行 $2N$ 次 M 点 FFT 运算, 步骤 2 需要 $MN(Q+1)$ 次乘法, MNQ 次加法。一般情况下, Q 与 $\log_2(M)$ 在同一量级上, 即步骤 2 的运算量约为 N 次 M 点 FFT 运算。由此可知, 本文干扰方法的计算量约为 $3N$ 次 M 点 FFT 运算。可见, 在已有静止场景干扰信号的基础上, 利用本文方法可以将这些干扰信号快速转换为匀速运动场景干扰信号。

如果敌方 SAR 仅利用动目标和杂波在多普勒域上的差别来检测动目标^[1], 那么只要采用合适的 v_r , 确保转换后的多普勒带覆盖住真实动目标对应的多普勒带, 此时即使省略步骤 1 和 2, 也可实现有效干扰。值得注意的是, 目标的匀速运动会使得方位向信号的多普勒质心和调频率发生规律性变化^[2]。如果敌方 SAR 利用多种先验信息来检测动目标^[15], 那么不符合变化规律的动目标将被剔除, 此时, 必须根据所保护动目标的速度和步骤 1~3 进行干扰信号转换。

3 仿真实验

仿真实验将分两方面进行: (1) 通过比较真实运动点目标回波与静止转换后的回波, 来考察本文转换算法的精度; (2) 通过三孔径干涉对消处理^[2], 来考察本文方法对抗 SAR-GMTI 的效果。

3.1 点目标仿真实验

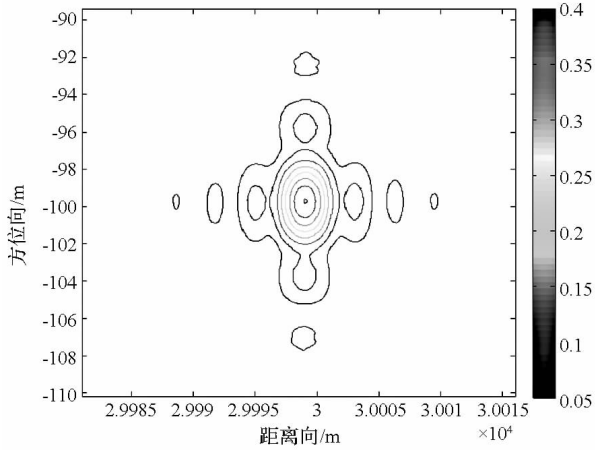
本次仿真参数设置如下: 载频 $f_c = 9.4\text{GHz}$, 带宽 $B = 50\text{MHz}$, 载机平台速度 $v = 250\text{m/s}$, 中心斜距 $R_c = 30\text{km}$, 方位分辨率 $\rho_a = 3\text{m}$, 脉冲重复频率 $f_p = 600\text{Hz}$ 。首先分别仿真一个静止目标回波 S_e 和一个匀速运动目标回波 M_e , 其中静止目标位置坐标为 $(0\text{m}, 30\ 000\text{m})$, 匀速运动目标的方位向速度为 $v_x = 4\text{m/s}$, 距离向速度为 $v_y = 3\text{m/s}$, 其起始点坐标为 $(-2.0766\text{m}, 29\ 998\text{m})$, 当慢时间为零时, 其位置坐标刚好为 $(0\text{m}, 30\ 000\text{m})$ 。

按照本文相关结论, M_e 和 S_e 应存在如式(10)所示的关系。按照第 2 节所述变换方法, 将 S_e 转换为方位向速度 $v_x = 4\text{m/s}$, 距离向速度 $v_y = 3\text{m/s}$ 的运动目标回波 SM_e 。

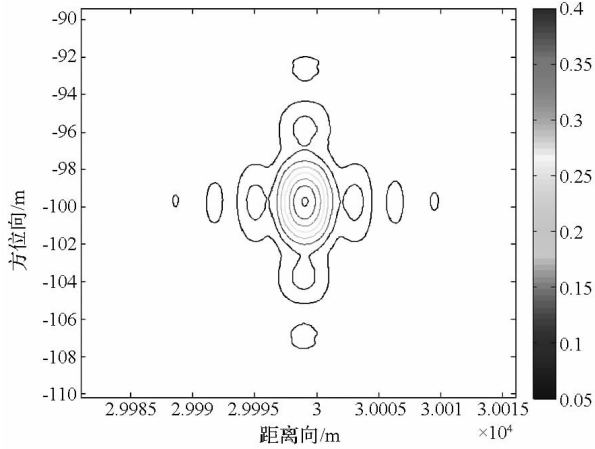
定义 SM_e 和 M_e 的均方根误差 RMSE 为

$$\text{RMSE} = \frac{\sum_m \sum_n [\text{real}(SM_e(m, n)) - \text{real}(M_e(m, n))]^2}{MN} \quad (14)$$

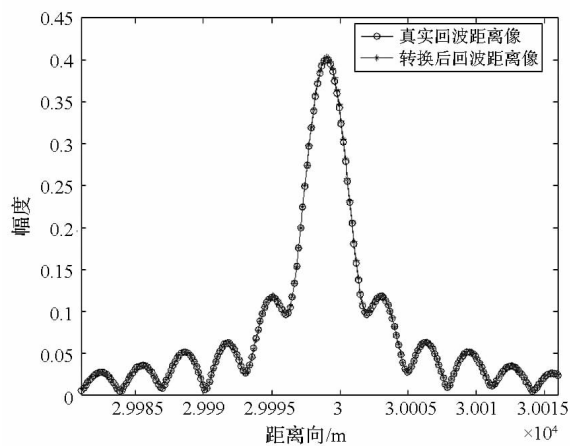
式中 $real(\cdot)$ 表示取实部操作, m 和 n 分别表示方位向和距离向上的采样时刻序号, M 和 N 为对应的采样点数。由本次仿真数据求得 RMSE 为 0.0061, 可见 SM_e 与 M_e 十分接近。对 SM_e 与 M_e 进行成像处理, 结果如图 2 所示。图 2 (a)、(b) 分别为回波 M_e 和 SM_e 的成像结果, 图 2 (c)、(d) 分别为两者距离像和方位像的对比图, 由图可见, 两者成像点的位置和形状是一致的。



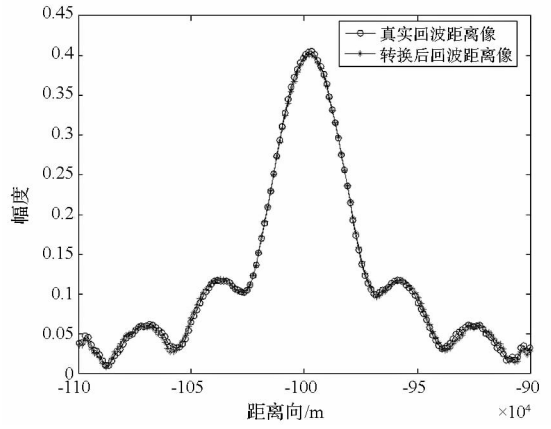
(a) 真实运动目标回波成像图



(b) 转换后回波成像图



(c) 距离像对比图



(d) 方位像对比图

图 2 真实运动目标回波与转换后回波成像对比图

Fig. 2 A comparison between the radar images of real moving target echo and transformed echo

本次实验的结果说明式(10)所描述的关系是正确的, 第 2 节中的转换步骤也是合理的。

3.2 三孔径干扰对消处理下的 SAR-GMTI 干扰效果仿真实验

雷达基本参数设置同点目标实验, 三个孔径沿方位向均匀排列, 孔径间隔为 0.833m。实验场景设置如图 3 所示, 公路上设置五个动目标, 其坐标分别为 (-43.95m, 29.95km)、(-39.37m, 29.97km)、(-33.95m, 30km)、(-30.2m, 30.02km) 和 (-25.2m, 30.05km), 所有运动目标均沿箭头所示方向做匀速行驶, 速度为 23.05km/h, 其回波信号幅度峰值为场景杂波幅度峰值的 2 倍。

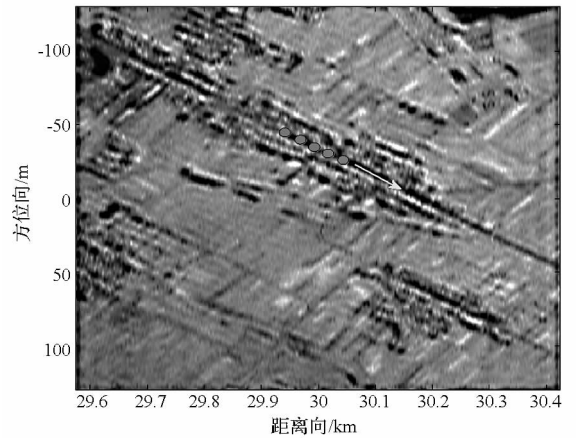
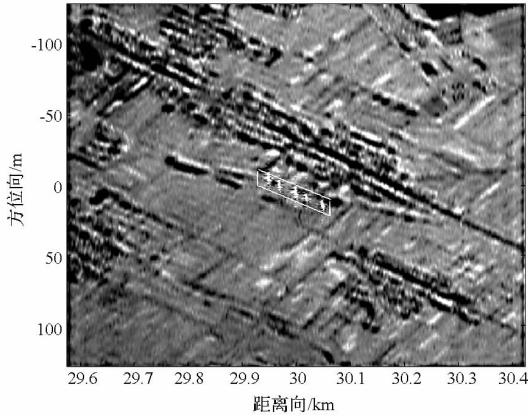


图 3 仿真场景设置

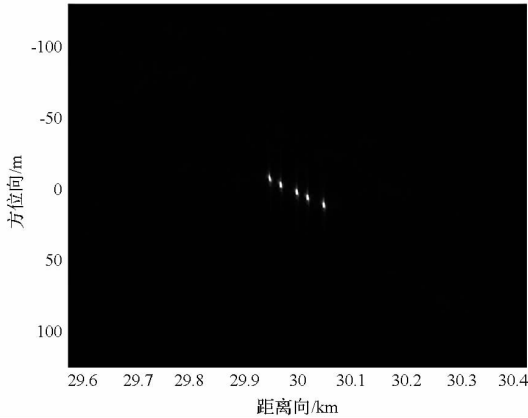
Fig. 3 Simulation scene

在未实施匀速运动虚假场景干扰的情况下, 对上述场景的 SAR 中间孔径回波采用距离多普勒算法进行处理, 结果如图 4(a) 所示, 由图可见静止场景图像清晰, 并有五个强散射目标; 利用前

两个孔径所接收回波进行干涉对消处理^[2]后,成像结果如图4(b)所示,五个运动目标可以完全检测出来,SAR-GMTI系统可以进一步估计这五个运动目标的距离向和方位向速度,并将其校正到正确位置。



(a) 三孔径干涉对消处理前成像图



(b) 三孔径干涉对消处理后成像图

图4 未加干扰信号时 SAR 成像图

Fig.4 SAR imaging without jamming

为了破坏敌方对我方交通路线的侦测,干扰机已事先生成覆盖整个成像场景的干扰信号,干扰信号的成像图如图5所示,干信比为10dB。

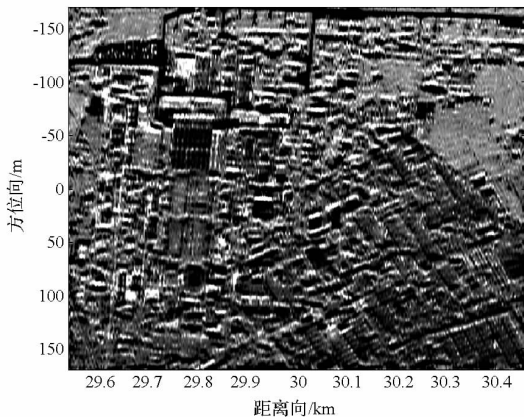
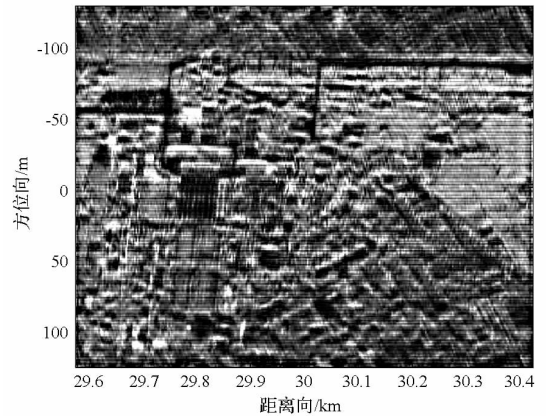


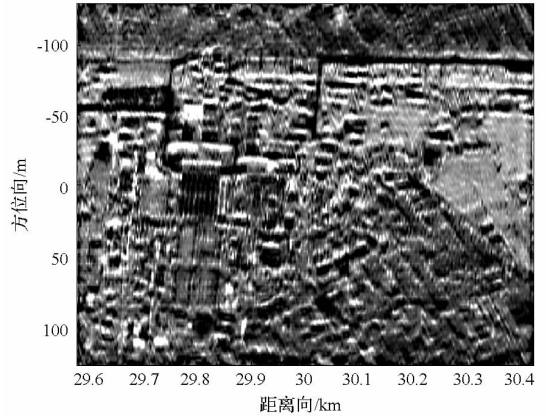
图5 静止场景干扰信号成像图

Fig.5 SAR imaging with deceptive stationary scene

由于静止场景干扰信号与真实静止场景回波信号相似,因此经过三孔径干涉对消处理后,其能量将会被大大削弱,从而无法保护运动目标。根据本文方法,将该静止场景干扰信号转换为匀速运动场景干扰信号,速度与真实目标相同。在三孔径干涉对消处理前,SAR的成像结果如图6(a)所示,图中成像场景体现出与图5类似的特征,只是在方位向发生了移位和模糊,这是由虚假场景的运动造成的,此时SAR已无法正确检测出我方的交通路线和强散射目标;在SAR采取三孔径干涉对消技术后,干扰信号和运动目标回波一样,能量都得到了保留,SAR-GMTI将无法检测到真实运动目标。



(a) 三孔径干涉对消处理前成像图



(b) 三孔径干涉对消处理后成像图

图6 匀速运动虚假场景干扰下的 SAR 成像图

Fig.6 SAR imaging with deceptive moving scene

4 结束语

本文推导了静止目标回波和匀速运动目标回波之间的对应关系,根据这个关系,提出了一种将静止虚假场景干扰信号转换为匀速运动虚假场景干扰信号的方法,该方法实现的步骤简单,运算量低,转换后的干扰信号与真实运动目标回波十分相似,能同时实现对静止场景和运动目标的覆盖

保护,对提高以导弹发射车、坦克、军用车辆等为代表的地面运动型目标的战略隐蔽性和战时生存能力,具有重要的军事应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 梁甸农,蔡斌,王敏,等. 星载 SAR-GMTI 研究进展[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(4): 87-92.
LIANG Diannong, CAI Bin, WANG Min, et al. Research process of spaceborne SAR-GMTI systems [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(4): 87-92. (in Chinese)
- [2] 吴晓芳,王雪松,梁景修. SAR-GMTI 高逼真匀速运动假目标调制干扰方法[J]. 宇航学报, 2012, 33(10): 1472-1479.
WU Xiaofang, WANG Xuesong, LIANG Jingxiu. Modulation jamming method for high-fidely false uniformly-moving targets against SAR-GMTI [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(10): 1472-1479. (in Chinese)
- [3] 王盛利,于立,倪晋麟,等. 合成孔径雷达的有源欺骗干扰方法研究[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1900-1902.
WANG Shengli, YU Li, NI Jinlin, et al. A study on the active deception jamming to SAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1900-1902. (in Chinese)
- [4] 甘荣兵,王建国. 对 SAR 的几何目标欺骗干扰的快速算法[J]. 现代雷达, 2006, 28(2): 40-42, 73.
GAN Rongbing, WANG Jianguo. Fast generation algorithm of geometric target deceptive jamming signal to SAR [J]. Modern Radar, 2006, 28(2): 40-42, 73. (in Chinese)
- [5] 孙光才,周峰,邢孟道,等. 虚假场景 SAR 欺骗式干扰技术及实时性分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(5): 813-818, 866.
SUN Guangcai, ZHOU Feng, XING Mengdao, et al. Deception-jamming technology against the SAR based on the deceptive scene and real-time analyses [J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(5): 813-818, 866. (in Chinese)
- [6] 赵博,杨军,孙光才,等. 一种虚假大场景 SAR 快速转发式欺骗干扰方法研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 964-968.
ZHAO Bo, YANG Jun, SUN Guangcai, et al. A method of SAR fast repeater deception jamming for large false scene [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(4): 964-968. (in Chinese)
- [7] Yu M C, Zhang Z M, Li G T, et al. SAR interfering based on fast simulation of SAR raw signal [C]//Proceedings of 7th international conference on system simulation and scientific computing, Beijing, 2008, 652-654.
- [8] 李伟,梁甸农,董臻. 基于双站定位的 SAR 场景欺骗干扰技术研究[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(4): 53-56.
LI Wei, LIANG Diannong, DONG Zhen. A study of SAR deceptive scene jamming technique based on bistatic location [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2005, 27(4): 53-56. (in Chinese)
- [9] 张宏荣,唐月生. SAR 干扰信号产生系统设计[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(1): 20-25.
ZHANG Hongrong, TANG Yuesheng. Design of SAR jamming signal generating system [J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(1): 20-25. (in Chinese)
- [10] 刘国满,郑坤,高梅国. 一种欺骗式 SAR 干扰信号发生器的设计与实现[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(2): 184-188.
LIU Guoman, ZHENG Kun, GAO Meiguo. Design and implementation of deception jamming signal generator against SAR [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(2): 184-188. (in Chinese)
- [11] 李伟,梁甸农,董臻. 基于欺骗式动目标的 SAR 干扰技术研究[J]. 遥感学报, 2006, 10(1): 71-75.
LI Wei, LIANG Diannong, DONG Zhen. SAR jamming technique based on deceptive moving target [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(1): 71-75. (in Chinese)
- [12] 徐少坤,李亚楠,付耀文. 欺骗式动目标 SAR 干扰技术研究[J]. 现代雷达, 2008, 30(7): 94-98.
XU Shaokun, LI Yanan, FU Yaowen. A study on SAR jamming technique based on deceptive moving target [J]. Modern Radar, 2008, 30(7): 94-98. (in Chinese)
- [13] 吴晓芳,梁景修,王雪松,等. SAR-GMTI 匀加速运动假目标有源调制干扰方法[J]. 宇航学报, 2012, 33(6): 761-768.
WU Xiaofang, LIANG Jingxiu, WANG Xuesong, et al. Modulation jamming method of active false uniformly-accelerating targets against SAR-GMTI [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(6): 761-768. (in Chinese)
- [14] 吴晓芳,代大海,王雪松,等. 基于微动调制的 SAR 新型有源干扰方法[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 954-959.
WU Xiaofang, DAI Dahai, WANG Xuesong, et al. A novel method of active jamming for SAR based on micro motion modulation [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 954-959. (in Chinese)
- [15] Stefan V B, Gerhard K. Fast GMTI algorithm for traffic monitoring based on a priori knowledge [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(11): 4626-4641.
- [16] 杨延光,周智敏,王建,等. 车载 UWB SAR 干扰自适应抑制新方法[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(5): 80-85.
YANG Yanguang, ZHOU Zhimin, WANG Jian, et al. A novel adaptive suppression method of interferences in the vehicle-mounted UWB SAR system [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(5): 80-85. (in Chinese)