

文章编号: 2095-4980(2018)03-0393-07

超宽带 SAR 虚假图像干扰技术

沈爱国

(国防科技大学 电子对抗学院, 安徽 合肥 230037)

摘要: 为了对低频超宽带合成孔径雷达(SAR)实施有效的图像欺骗干扰, 提出基于卷积技术的欺骗干扰方法。基于 SAR 目标回波特性和, 推导了干扰调制函数解析式。在产生干扰信号时, 需要对解析式进行近似处理, 针对低频超宽带 SAR 二维强耦合特性以及超宽带 SAR 成像处理算法, 将干扰调制函数精确到三次相位项, 并对各级系数进行分析和简化处理。最后通过仿真实例验证了对干扰产生函数改进的必要性及干扰的有效性。理论分析和仿真结果均表明, 改进后的干扰方法可以对超宽带 SAR 实施有效的图像欺骗干扰。

关键词: 超宽带; 合成孔径; 卷积; 干扰; 虚假图像

中图分类号: TN959.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201803.0393

Ultra wide band SAR false image jamming technology

SHEN Aiguo

(College of Electronic Countermeasures, National University of Defense Technology, Hefei Anhui 230037, China)

Abstract: A deceptive jamming method based on convolution technique is proposed in order to implement effective image deception jamming for low frequency ultra wideband Synthetic Aperture Radar(SAR). Based on the SAR target echo characteristic, analytic formula of the modulation function is derived. The approximate processing is required when the jamming signal generated. For a low frequency ultra wideband SAR, the echo signal is strongly coupled because of the wide beam. Considering the usual imaging algorithm used in ultra wideband SAR, the jamming modulation function is accurate to the cubic phase. And the coefficients of each term are analyzed and simplified. Finally, two simulation examples are given to show the necessity of improvement and the effectiveness of the jamming technology. Both the theoretical analysis and simulation results show that the improved method can effectively implement the false image jamming for ultra wide band SAR.

Keywords: ultra wide band; synthetic aperture; convolution; jamming; false image

当前有源相控阵技术和合成孔径雷达(SAR)技术为雷达的 2 个主要发展方向^[1-2]。SAR 利用合成孔径技术实现对地面目标的成像, 结合动目标指示技术还可以对地面运动目标进行检测和识别, 尤其是 P 波段 SAR 雷达利用其穿透特性, 可以对丛林和掩体中的军事目标进行探测和成像^[2]。由于 P 波段 SAR 的分数带宽往往大于 25%, 符合美国 Los Alamos 国家实验室召开的超宽带雷达会议上对超宽带雷达的定义, 因此称之为超宽带 SAR^[3-4]。

随着超宽带 SAR 在军事领域应用范围的扩大, 其对军事目标构成的威胁越来越大, 研究针对超宽带 SAR 的新型干扰技术具有重大军事意义。目前与超宽带 SAR 相关的干扰技术一般是针对常规 SAR 提出的, 并往往是从干扰功率的角度分析现有的噪声干扰、假目标欺骗干扰等技术针对高处理增益雷达时的战术运用问题^[5]。关于脉冲压缩信号干扰方法的研究较多, 主要侧重于欺骗干扰方法的研究^[6]。文献[7]以逆合成孔径雷达(Inverse SAR, ISAR)为对象研究了数字合成假目标干扰技术, 由于虚假目标的产生过程对干扰系统的计算能力和处理速度提出了较高要求, 为此关于假目标干扰技术的快速运算方法及快速实现问题的研究成为一个重要研究方向, 目前已有不少文献对此做了深入分析和研究^[8-9]。但这些研究主要是针对传统的窄带 SAR 进行分析和设计, 在 P 波段超宽带 SAR 中, 发射波束较宽, 多普勒中心对天线指向不敏感, 且具有低频、大处理角等特点, 距离迁徙更大, 二维信号耦合更强。关于超宽带雷达欺骗干扰技术的研究目前尚不多见, 虽然有利用数字射频存储器(Digital Radio

Frequency Memory, DRFM)与直接数字式频率合成器(Direct Digital Synthesizer, DDS)相结合的超宽带雷达干扰技术研究,但只讨论了距离向的干扰效果,没有深入讨论欺骗干扰信号的二维响应^[10]。

作者之前在线性调频雷达信号卷积干扰技术基础上^[11],分别探讨了噪声卷积干扰、脉冲卷积干扰等对超宽带 SAR 的干扰效果,主要分析了压制干扰,没有考虑干扰信号的方位特性^[12-13]。本文从欺骗干扰的角度出发,考虑虚假图像卷积干扰技术。首先根据 SAR 目标回波特性,分析干扰调制函数的解析式,阐述图像欺骗干扰的理论基础。在干扰信号产生部分,针对低频超宽带 SAR 的强耦合关系,进行三级相位近似,推导干扰调制函数的各级系数,重点探讨其简化处理技术和快速实现方法。最后通过仿真实例验证在低频超宽带 SAR 干扰中,考虑调制函数三次相位项的必要性和所提干扰方法的有效性。

1 干扰调制函数分析

SAR 目标回波是雷达发射信号以不同的地面反射强度、延时和多普勒频率混合而成。因此,要在 SAR 图像中形成虚假目标,必须针对每个虚假点目标进行幅度、延时和多普勒频率调制。为简化分析,将 SAR 投影到 R - X 平面进行分析,如图 1 所示,其中 R 表示目标与雷达之间的斜距, X 表示载机飞行方向,雷达沿 X 方向以速度 v 匀速直线飞行。波束内任意点目标 $T(r_i, x_i)$ 在 t_m 时刻与雷达之间的距离为:

$$R_i(t_m) = \sqrt{r_i^2 + (x_i - vt_m)^2} \quad (1)$$

那么该点的雷达回波时延为:

$$T_i(t_m) = \frac{2R_i(t_m)}{c} = \frac{2\sqrt{r_i^2 + (x_i - vt_m)^2}}{c} \quad (2)$$

设发射的雷达脉冲信号为 $p(\hat{t})$, 可得到基频回波信号为:

$$s_i(\hat{t}, t_m) = A_i p[\hat{t} - T_i(t_m)] \exp[-j2\pi f_c T_i(t_m)] \quad (3)$$

式中: A_i 为该点的反射强度; f_c 为雷达信号的中心频率。令 $P(\omega)$ 为 $P(\hat{t})$ 的傅里叶变换频谱,对上式进行快速傅里叶变换,可以得到:

$$S_i(\omega, t_m) = A_i P(\omega) \exp[-j\omega T_i(t_m)] \exp[-j\omega_c T_i(t_m)] = A_i P(\omega) \exp[-j(\omega + \omega_c) T_i(t_m)] = P(\omega) H_i(\omega) \quad (4)$$

式中 $H_i(\omega) = A_i \exp[-j(\omega + \omega_c) T_i(t_m)]$ 为该点目标的系统响应函数,包含了随载机运动该点的时延和多普勒频率变化情况。同样,可以得到在干扰机位置的点目标回波信号的频谱为:

$$S_j(\omega, t_m) = A_j P(\omega) \exp[-j(\omega + \omega_c) T_j(t_m)] = P(\omega) H_j(\omega) \quad (5)$$

式中 $T_j(t_m) = \frac{2R_j(t_m)}{c} = \frac{2\sqrt{r_0^2 + (x_0 - vt_m)^2}}{c}$ 和 $H_j(\omega) = A_j \exp[-j(\omega + \omega_c) T_j(t_m)]$ 分别为干扰机位置点目标的回波延迟时间和系统响应函数。比较式(4)和(5)可以看出,不考虑幅度因素,2个位置的目标回波频谱相差一个时间延迟: $\Delta T_i(t_m) = T_i(t_m) - T_j(t_m)$ 。2个回波之间的关系为:

$$S_i(\omega, t_m) = \frac{A_i}{A_j} S_j(\omega, t_m) \exp[-j(\omega + \omega_c) \Delta T_i(t_m)] = S_j(\omega, t_m) H_{ij}(\omega, t_m) \quad (6)$$

式中 $H_{ij}(\omega, t_m) = \frac{A_i}{A_j} \exp[-j(\omega + \omega_c) \Delta T_i(t_m)]$, 即在 t_m 时刻对干扰站位置的目标回波利用 $H_{ij}(\omega, t_m)$ 进行调制,得到的信号与点目标 $T(r_i, x_i)$ 所对应的回波信号一致。在整个合成孔径时间进行这样的处理,经雷达成像处理后,就可以在该位置形成对应的虚假目标图像。如需要在图像中产生由 N 个虚假目标组成的虚假图像干扰效果,由线性系统的叠加性原理,可以得到虚假图像所需要的调制函数频域形式为:

$$H_j(\omega, t_m) = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{A_j} \exp[-j(\omega + \omega_c) \Delta T_i(t_m)] \quad (7)$$

即干扰机利用式(7)对接收到的雷达信号进行调制后形成干扰信号再转发回雷达,经雷达成像处理后,能够在图像中叠加虚假图像,这就是虚假图像干扰的理论基础。

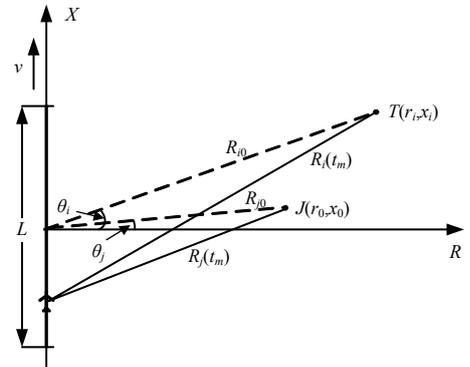


Fig.1 Schematic diagram of false target jamming
图 1 虚假目标干扰原理示意图

2 干扰信号产生方法

从上述分析可以看出,对 SAR 雷达进行欺骗干扰就是要利用式(7)的调制函数对干扰机所接收到的雷达信号进行调制后再转发,但由于每个点对应的反射强度、延时和多普勒频率不同,干扰机必须针对每个点进行幅度、延时和多普勒频率调制,否则不能形成虚假目标图像,达不到欺骗干扰的目的,因此过程非常复杂。在干扰设计时,需要对该解析式进行近似处理。

将式(1)对 t_m 进行泰勒级数展开,可以得到:

$$R_i(t_m) = R_{i0} - \frac{x_i v}{R_{i0}} t_m + R_{i0} \left(\frac{v^2}{2R_{i0}^2} - \frac{x_i^2 v^2}{2R_{i0}^4} \right) t_m^2 + R_{i0} \left(\frac{x_i v^3}{2R_{i0}^4} - \frac{x_i^3 v^3}{2R_{i0}^6} \right) t_m^3 + L = R_{i0} - v \sin \theta_i t_m + \frac{v^2 \cos^2 \theta_i}{2R_{i0}} t_m^2 + \frac{v^3 \sin \theta_i \cos^2 \theta_i}{2R_{i0}^2} t_m^3 + L \quad (8)$$

式中: $R_{i0} = \sqrt{r_i^2 + x_i^2}$ 为点目标与坐标原点的距离; θ_i 为该点到原点的连线与 R 坐标轴之间的夹角。

同样,可以得到干扰机与雷达之间的距离为:

$$R_j(t_m) = R_{j0} - v \sin \theta_j t_m + \frac{v^2 \cos^2 \theta_j}{2R_{j0}} t_m^2 + \frac{v^3 \sin \theta_j \cos^2 \theta_j}{2R_{j0}^2} t_m^3 + L \quad (9)$$

将式(2)和式(8)代入式(4),精确到三次相位项,可以得到雷达的目标回波信号频谱为:

$$S_i(\omega, t_m) \approx A_i P(\omega) \exp \left[-j(\omega + \omega_c) \left(\frac{2R_{i0}}{c} - \frac{2v \sin \theta_i}{c} t_m + \frac{v^2 \cos^2 \theta_i}{c R_{i0}} t_m^2 + \frac{v^3 \sin \theta_i \cos^2 \theta_i}{c R_{i0}^2} t_m^3 \right) \right] = A_i P(\omega) \exp \left[-j2\pi f_c \left(1 + \frac{\omega}{\omega_c} \right) \left(\frac{2R_{i0}}{c} - \frac{2v \sin \theta_i}{c} t_m + \frac{v^2 \cos^2 \theta_i}{c R_{i0}} t_m^2 + \frac{v^3 \sin \theta_i \cos^2 \theta_i}{c R_{i0}^2} t_m^3 \right) \right] \quad (10)$$

类似可以得到干扰机位置点目标的回波信号频谱为:

$$S_j(\omega, t_m) = A_j P(\omega) \exp \left[-j2\pi f_c \left(1 + \frac{\omega}{\omega_c} \right) \left(\frac{2R_{j0}}{c} - \frac{2v \sin \theta_j}{c} t_m + \frac{v^2 \cos^2 \theta_j}{c R_{j0}} t_m^2 + \frac{v^3 \sin \theta_j \cos^2 \theta_j}{c R_{j0}^2} t_m^3 \right) \right] \quad (11)$$

传统的 SAR 有源欺骗干扰只考虑到回波的二次相位项,在超宽带 SAR 中,由于大波束角特性,距离迁移和空变特性对图像质量都有较大的影响,在成像处理中需要对三次相位项进行补偿^[14]。为了提高干扰图像的聚集性能,在设计干扰调制函数时需要考虑时间函数的三次项。假定对第 i 点目标设计的干扰调制函数为:

$$H_{ij}(\omega, t_m) = B_i \exp \left[-j2\pi \left(1 + \frac{\omega}{\omega_c} \right) \left(f_c \tau_i - f_{di} t_m + k_i t_m^2 + \gamma_i t_m^3 \right) \right] \quad (12)$$

式中 B_i 表示幅度系数,利用该函数对干扰机接收信号进行调制后发射回雷达,可以得到干扰信号频谱为:

$$S_{ji}(\omega, t_m) = A_j B_i P(\omega) \exp \left\{ -j2\pi \left(1 + \frac{\omega}{\omega_c} \right) \left[f_c (\tau_0 + \tau_i) - (f_{d0} + f_{di}) t_m + (k_0 + k_i) t_m^2 + (\gamma_0 + \gamma_i) t_m^3 \right] \right\} \quad (13)$$

式中: $\tau_0 = \frac{2R_{j0}}{c}$; $f_{d0} = f_c \frac{2v \sin \theta_j}{c}$; $k_0 = f_c \frac{v^2 \cos^2 \theta_j}{c R_{j0}}$; $\gamma_0 = f_c \frac{v^3 \sin \theta_j \cos^2 \theta_j}{c R_{j0}^2}$ 。

比较式(10)和式(13),为了使干扰信号与点目标的回波信号一致,需要满足:

$$\begin{cases} \tau_i = \frac{2(R_{i0} - R_{j0})}{c} \\ f_{di} = \frac{2v(\sin \theta_i - \sin \theta_j)}{\lambda} \\ k_i = \frac{v^2}{\lambda} \left(\frac{\cos^2 \theta_i}{R_{i0}} - \frac{\cos^2 \theta_j}{R_{j0}} \right) \\ \gamma_i = \frac{v^3}{\lambda} \left(\frac{\sin \theta_i \cos^3 \theta_i}{R_{i0}^2} - \frac{\sin \theta_j \cos^3 \theta_j}{R_{j0}^2} \right) \end{cases} \quad (14)$$

式中 λ 为中心频率对应的波长。从上式可以看出,为了得到干扰信号,调制函数中 t_m 的各阶系数决定于假目标点与干扰机之间的位置关系和雷达载机的速度以及雷达发射信号的载频。因此,为了得到良好的欺骗干扰效果,首先必须对受干扰雷达的参数进行测量,其中载频和载机速度的测量,对干扰函数的产生具有决定作用。至于虚假目标与干扰机之间的坐标关系,则需要对雷达载机的航迹具有较好的先验知识。由于 SAR 系统响应函数在方位

向具有平移不变性, 因此对于正侧视工作的超宽带 SAR, 可以将干扰机到航线的垂直方向作为 R 轴, 此时干扰机的方位坐标为 0, θ_j 也为 0, 那么式(14)可简化为:

$$\begin{cases} \tau_i = \frac{2(R_{i0} - r_0)}{c} \\ f_{di} = \frac{2v \sin \theta_i}{\lambda} \\ k_i = \frac{v^2}{\lambda} \left(\frac{\cos^2 \theta_i}{R_{i0}} - \frac{1}{r_0} \right) \\ \gamma_i = \frac{v^3}{\lambda} \left(\frac{\sin \theta_i \cos^2 \theta_i}{R_{i0}^2} \right) \end{cases} \quad (15)$$

上面的讨论是对成像区域中的任意点目标进行的, 如果要在成像区域中形成由 N 个反射强度不同的点目标组成的虚假图像干扰, 需要的干扰调制函数为:

$$H_j(\omega, t_m) = \sum_{i=1}^N H_{ij}(\omega, t_m) = \sum_{i=1}^N B_i \exp \left[-j2\pi \left(1 + \frac{\omega}{\omega_c} \right) \left(f_c \tau_i + f_{di} t_m + k_i t_m^2 + \gamma_i t_m^3 \right) \right] \quad (16)$$

式中的系数由式(15)确定。

从上面的分析可以看出, 为了确定欺骗干扰调制函数, 获取敌方雷达参数是进行相参干扰的必要前提, 因此在进行欺骗干扰之前需要做许多前期工作, 包括对雷达发射信号载频的测量, SAR 运行轨迹的估计以及载机运行速度的测量等。在知道这些参数之后, 利用式(15), 确定假目标的响应函数, 这些响应函数事先形成并存储, 当干扰机接收 SAR 信号时, 通过下混频, 经傅里叶变换得到 SAR 信号的频谱, 再与存储的响应函数在频域相乘(即时域卷积), 并进行逆傅里叶变换就可以得到欺骗干扰信号, 然后再上混频发射。考察式(11), 将 $x_m = vt_m$ 作为独立变量代入该式中可以得到:

$$S_j(\omega, t_m) = A_j P(\omega) \exp \left[-j2\pi f_c \left(1 + \frac{\omega}{\omega_c} \right) \left(\frac{2R_{j0}}{c} - \frac{2 \sin \theta_j}{c} x_m + \frac{\cos^2 \theta_j}{cR_{j0}} x_m^2 + \frac{\sin \theta_j \cos^2 \theta_j}{cR_{j0}^2} x_m^3 \right) \right] \quad (17)$$

从上式可以看出, 对干扰信号回波相位产生影响的实际上是载机的方位向位置 x_m , 如果以 x_m 作为变量, 那么欺骗干扰函数中的所有系数将只决定于干扰机与期望的欺骗干扰位置之间的几何关系, 因此可以事先设定干扰函数系数矩阵以提高程序的运行效率。

3 干扰效果仿真分析

根据干扰调制函数特征及干扰信号产生过程可以看出雷达信号参数的准确测量以及对雷达系统航迹的先验知识在欺骗干扰中具有重要作用。文献[15]以星载 SAR 为例, 对欺骗干扰中参数测量精确度需求进行了详细分析, 讨论了参数估计对欺骗干扰效果的影响, 验证了欺骗干扰算法的可行性和有效性。本文仿真实验将重点对超宽带 SAR 干扰的特殊性进行说明, 通过仿真实验讨论对传统欺骗干扰技术进行改进的必要性, 并对干扰效果进行定量分析。

仿真实验以点目标模型为基础, 分析在超宽带 SAR 和传统 SAR 中欺骗干扰图像质量指标的变化情况, 通过计算实例说明改进后的欺骗干扰方法可以对超宽带 SAR 实现较好的欺骗干扰效果。仿真中, 设定成像区域为一个 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的区域, 干扰机位于该区域的中心位置, 雷达航线距离该区域的中心斜距为 10 km 。采用自卫干扰方式, 真实目标与干扰机位置重合。在成像区域中模拟产生 3 个虚假点目标, 位置关系如图 2 所示, 图中 A 点为干扰机以及真实点目标所在的中心位置, B 点与 A 点距离向位置相同, 方位向偏离 25 m 。 C 点与 A 点方位向位置一致, 距离向与 A 相距 25 m 。 D 点相对 A 点在距离向和方位向均偏离 25 m 。

首先利用传统方法产生的欺骗干扰信号^[6], 经雷达成像系统后的输出结果如图 3 所示, 其中横坐标为距离向位置, 纵坐标为方位向位置。仿真图中雷达信号带宽为 200 MHz , 脉宽为 $1 \mu\text{s}$, 脉冲重复频率(Pulse Repeat Frequency, PRF)为 200 Hz , 载机速度 100 m/s , 设定的方位向分辨力均为 1 m 。2 幅图像参数设置唯一的区别是中心频率, 图 3(a)对应的信号中心频率为 500 MHz , 图 3(b)为 5 GHz 。

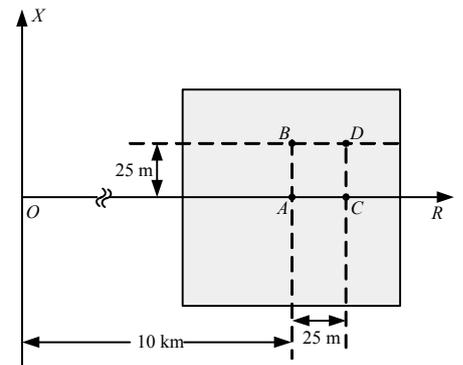


Fig.2 Sketch map of false target setting
图 2 虚假目标设置示意图

从图 3 可以看出,图 3(a)中虚假目标的图像出现了明显的散焦现象,而图 3(b)几个点目标图像基本一致。表 1 给出了图中目标图像和虚假图像几个表征图像质量的指标峰值旁瓣比(Peak Sidelobe Ratio, PSLR)、积分旁瓣比(Integral Sidelobe Ratio, ISLR)和分辨力(resolution)的计算结果,分析比较 2 幅图像的指标可以看出,图 3(b)中的假目标图像指标与真实目标的图像基本接近,而在载频为 500 MHz 时,即超宽带条件下虚假图像的指标明显要比真实目标差,从欺骗干扰的角度来说,其干扰效果明显要比对高频 SAR 的干扰效果差。分析原因,其实 2 个图像载频差异直接导致波束角的变化,进而影响到距离迁移空变特性的变化。综合图 3 和表 1 的仿真结果可以得出,传统的欺骗干扰方法对常规窄波束 SAR 具有较好的欺骗干扰效果,但对大空变特性的低频超宽带 SAR 欺骗效果不理想,需要加以改进。

利用式(16)的调制函数,重复上面的仿真实验,得到图 4 和表 2 的仿真计算结果。从图中可以明显看出,低频超宽带 SAR 中的虚假点目标的图像聚焦性能得到了很大程度的提高。对表 2 的数据进行进一步分析也可以看出,利用改进的欺骗干扰信号产生方法后,虚假目标图像指标与目标回波的图像指标之间的偏差已经减小到了可以容忍的范围,因此可以得出结论,考虑了三次相位项后的虚假目标干扰函数可以对超宽带 SAR 形成良好的欺骗干扰效果。

为了进一步验证该干扰方法的有效性,基于二维快速傅里叶算法^[16],利用预设的图像信息进行反演,根据式(16)产生欺骗干扰信号,对分布目标图像进行干扰,研究干扰后 SAR 图像与原始图像之间相关性相对于干信比(Jamming to Signal Ratio, JSR)的变化情况,用于产生目标回波和干扰信号的原始图像,如图 5 所示。

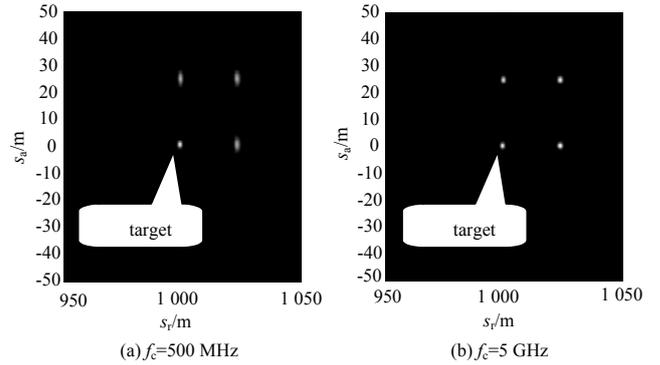


Fig.3 False image with traditional method
图 3 传统虚假干扰信号图像输出结果

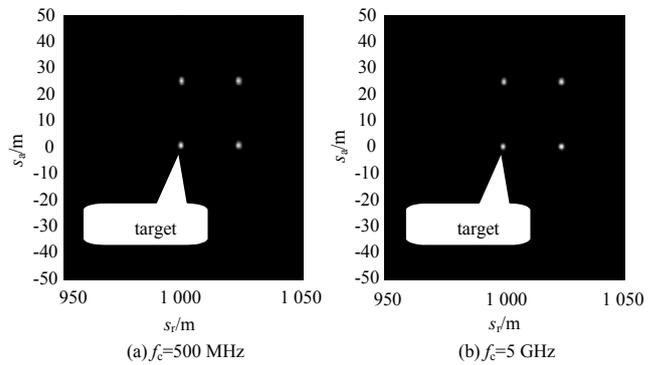
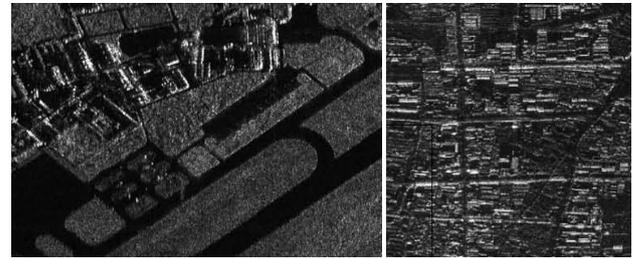


Fig.4 False image with modified method
图 4 改进虚假干扰信号图像输出结果



(a) original image of true target (b) original image of false target
Fig.5 Original images of the true and false area
图 5 目标区域和干扰场景原图

表 1 传统干扰方法虚假目标图像指标

Table1 Index of false target image with traditional jamming method

center frequency/GHz	target	PSLR/dB		ISLR/dB		resolution/m	
		range	azimuth	range	azimuth	range	azimuth
5.0	A	-32.85	-34.73	-24.19	-12.94	1.10	1.33
	B	-31.98	-34.67	-23.56	-12.68	1.11	1.33
	C	-32.67	-33.87	-24.01	-12.03	1.10	1.34
	D	-31.92	-33.85	-23.54	-11.99	1.11	1.34
0.5	A	-33.84	-42.96	-24.61	-13.08	1.10	1.32
	B	-25.39	-40.84	-18.22	-11.69	1.70	1.42
	C	-31.56	-32.71	-22.15	-8.27	1.11	2.44
	D	-25.36	-31.99	-18.14	-8.27	1.71	2.46

表 2 改进后的虚假目标图像指标

Table2 Index of false target image with modified jamming method

center frequency/GHz	target	PSLR/dB		ISLR/dB		resolution/m	
		range	azimuth	range	azimuth	range	azimuth
5.0	A	-32.85	-34.73	-24.19	-12.94	1.10	1.33
	B	-32.42	-34.71	-23.97	-12.91	1.10	1.33
	C	-32.76	-34.25	-24.08	-12.49	1.10	1.34
	D	-32.77	-34.22	-23.95	-12.36	1.11	1.34
0.5	A	-33.84	-42.96	-24.61	-13.08	1.10	1.32
	B	-33.19	-42.27	-24.12	-12.98	1.11	1.33
	C	-33.38	-42.18	-24.35	-12.59	1.10	1.34
	D	-33.16	-42.20	-24.11	-12.61	1.11	1.34

仿真中,假定干扰机位于成像区域的中心位置,期望的干扰图像也以干扰机为中心。将干扰信号加入目标回波中,得到的输出图像如图 6 所示。可见,在目标图像上明显叠加了一层干扰图像,并且随着干扰信号强度的增加,在干扰图像覆盖的区域,目标图像越显模糊。进一步增大干信比,输出图像将会发生变化,主要反映用于产生干扰信号的原始虚假图像的特征。

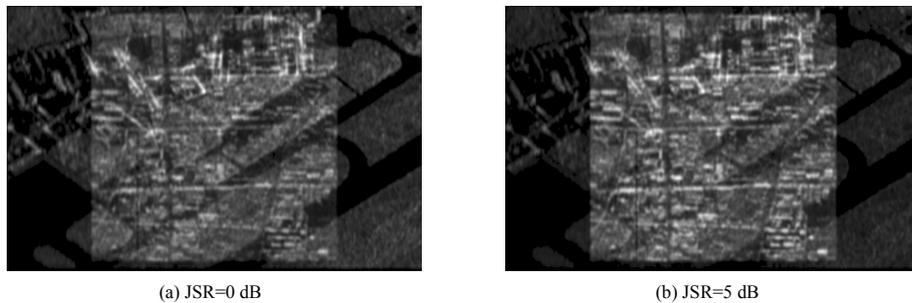


Fig.6 Effect of false imaging jamming
图 6 虚假图像干扰效果示意图

为了对分布目标的欺骗干扰效果进行定量分析,计算了干扰图像与原始目标图像及原始干扰图像之间的相关系数(correlation coefficient)、等效视数差(Equivalent Number of Looks, ENL)和欧氏距离(Euclidean distance)随干信比的变化曲线,如图 7 所示。从相关系数变化曲线可以看出,随着干扰信号增加,输出图像与目标图像之间的相关性呈单调下降趋势,而与干扰图像之间的相关性则呈单调上升趋势。当干信比大于 12 dB 时,输出图像与目标图像的相关系数小于 0.75,而与干扰图像的相关性大于 0.95,可以认为此时的图像主要体现了干扰信号的特征,即达到了欺骗干扰的目的。从欧氏距离的变化曲线同样可以看出,随着干信比的增加,输出图像与干扰图像之间的相关性越大,越能体现干扰图像的特征,从而掩盖真实目标特征。等效视数实际上反映的是图像灰度的对比度,等效视数越大,图像的对比度越小,说明图像越模糊。本文给出的是输出图像与目标图像及干扰图像之间的等效视数差。从图中可以看出,在刚开始加入干扰时,目标图像对输出图像起主要作用,此时干扰对输出图像的对比度造成影响,因此等效视数增加,随着干扰进一步增强,干扰信号与目标回波共同作用,当干扰信号达到一定程度后,干扰信号将对图像的对比度起主导作用,因此输出图像的等效视数趋近于干扰图像的等效视数,此时两者的等效视数差越来越小,而与原始目标图像的等效视数差越来越大。可见,从 3 个参数的变化关系,都可以看出欺骗干扰信号对分布目标形成了有效的干扰作用。

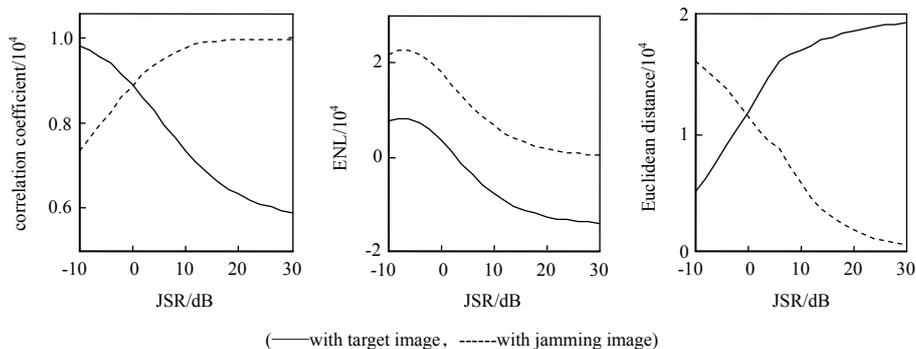


Fig.7 Correlation curves between false image and true image
图 7 欺骗干扰图像与目标图像及干扰图像相关性曲线

4 结论

本文根据超宽带 SAR 信号特征,提出利用虚假图像卷积干扰技术,重点讨论了该技术针对传统 SAR 与超宽带 SAR 的区别,对干扰调制函数和干扰信号产生方法进行了详细论述,特别探讨了干扰调制函数的简化模型。最后,通过仿真实例分析了对干扰调制函数进行改进的必要性,并对改进后的干扰效果进行了定量分析。理论分析和仿真实例均表明,所提出的虚假图像卷积干扰技术可以对超宽带 SAR 实施有效的欺骗干扰。

参考文献:

- [1] FARINA A,HOLBOURN P,KINGHORN T,et al. AESA radar—pan-domain multi-function capabilities for future systems[C]//

- 2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology. Waltham,MA,USA:IEEE,2014:4-11.
- [2] SANDBERG G,ULANDER L M H,WALLERMAN J,et al. Measurements of forest biomass change using P-band synthetic aperture radar backscatter[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2014,52(10):6047-6061.
- [3] TAYLOR J D. Introduction to ultra-wideband radar system[M]. USA:CRC Press, 1995.
- [4] TAYLOR J D. Ultra-wideband radar technology[M]. USA:CRC Press, 2001.
- [5] HARNESS R S,BUDGE M C. A study on SAR noise jamming and false target insertion[C]// IEEE Southeastcon 2014. Lexington,KY,USA:IEEE, 2014:1-8.
- [6] LIU Y,LI T,GU Z. Research on SAR active deception jamming scenario generation technique[C]// 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control(IMCCC). Qinhuangdao,China: IEEE, 2016:152-156.
- [7] PACE P E,FOUTS D J,EKESTORM S,et al. Digital false-target image synthesizer for countering ISAR[J]. IEE Proceedings -Radar, Sonar and Navigation, 2002,149(5):248-257.
- [8] SUN Qingyang,SHU Ting,ZHOU Shicheng,et al. A novel jamming signal generation method for deceptive SAR jammer[C]// IEEE Radar Conference. Cincinnati,OH,USA:IEEE, 2014:1174-1178.
- [9] LIN Xiaohong,LIU Peiguo,XUE Guoyi. Fast generation of SAR deceptive jamming signal based on inverse range Doppler algorithm[C]// 2013 IET International Radar Conference. Xi'an,China:IET, 2013:1-4.
- [10] 任明秋,朱元清,李欣,等. 超宽带 SAR 的欺骗干扰技术研究[J]. 火力与指挥控制, 2007,32(9):76-79. (REN Mingqiu, ZHU Yuanqing,LI Xin,et al. An approach to deceptive jamming on ultra-wideband radar[J]. Fire Control and Command Control, 2007,32(9):76-79.)
- [11] 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.)
- [12] 沈爱国,姜秋喜. 基于复卷积的超宽带 SAR 干扰技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009,4(3):278-282. (SHEN Aiguo,JIANG Qiuxi. UWB SAR jamming technique based on complex convolution[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2009,4(3):278-282.)
- [13] 沈爱国,姜秋喜. 超宽带 SAR 脉冲卷积干扰效果分析[J]. 现代防御技术, 2010,38(1):94-98. (SHEN Aiguo,JIANG Qiuxi. Effect analysis of pulse convolution jamming technique countering UWB SAR[J]. Modern Defence Technology, 2010,38(1):94-98.)
- [14] 王亮,王建,黄晓涛,等. Chirp Scaling 算法中的相位补偿因子研究[J]. 电子与信息学报, 2007,29(1):6-11. (WANG Liang,WANG Jian,HUANG Xiaotao,et al. Research on phase compensating factors in chirp scaling algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007,29(1):6-11.)
- [15] 甘荣兵,王建国. 改进的对星载 SAR 的应答式欺骗干扰[J]. 电子科技大学学报, 2005,35(5):614-617. (GAN Rongbing, WANG Jianguo. Improvement of the responsive deception for spaceborne SAR[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2005,35(5):614-617.)
- [16] 张玉宪,袁常顺. 合成孔径雷达回波模拟器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(4):541-544. (ZHANG Yuxian, YUAN Changshun. Simulator of the SAR echo based on FPGA[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(4):541-544.)

作者简介:



沈爱国(1975-),男,安徽省肥东县人,副教授,博士,主要研究方向为信号与信息处理、雷达干扰技术.email:shenaiguo_405@sina.com.