基于微动调制的SAR新型有源干扰方法

吴晓芳,代大海,王雪松,卢焕章
(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘 要: 借鉴微动调制思想,提出了一种SAR新型有源干扰方法.详细确定了各关键干扰参数,分析了干扰信号的成像结果,给出了一种基于数字射频存储技术的干扰实施方案,讨论了侦察误差对干扰效果的影响,并进行了基于实测数据的实验分析.结果表明,该干扰样式具有距离向相干处理、方位向部分相干处理的特点,可实现方位向多假欺骗的目的,是一种有效稳健的干扰方法.配合已装备或研制中的各类SAR干扰设备,可增强重要目标的防御能力和生存能力.

关键词: SAR;微动;有源干扰;多假目标;数字射频存储;误差分析
中图分类号: TN985 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2010)04-0954-06

A Novel Method of Active Jamming for SAR Based on Micro Motion Modulation

WU Xiao-fang, DAI Da-hai, WANG Xue-song, LU Huan-zhang
(*School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan* 410073, *China*)

Abstract: Using the idea of micro motion modulation for reference, a novel active jamming method is proposed for Synthetic Aperture Radar (SAR). Several key jamming parameters are determined, the jamming image result is analyzed, an implementation procedure based on Digital Radio Frequency Memory, as well as the influence of reconnaissance errors on jamming performance, is put forward. Furthermore, simulation experiments have been done based on the raw data. The result shows that, this jamming signal is processed coherently in the range direction and partially coherently in the azimuth direction, which can produce multiple false targets in the azimuth direction. As an effective and sound jamming, this method, along with multiple equipped or developing jamming equipments, can enhance the defense and survivability for important targets.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); micro motion; active jamming; multiple false targets; digital radio frequency memory (DRFM); error analysis

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种先进的微波对地探测设备,是战场侦察系统中的重要组成部分[1].近几十年进行的高技术局部战争(如海湾战争、科索沃战争、阿富汗战争、伊拉克战争等)中,各样的机载/星载SAR系统已逐渐成为信息战中获取情报的重要传感器.目前已经部署的各国高分辨星载SAR以及美国在亚太地区部署的"全球鹰"和E-8C所搭载的机载SAR,对我地面重要军事目标——特别是大型战略目标的军事部署、作战状态、战时生存等构成了极为严重的威胁.必须针对SAR的系统特点,研究出有效的对抗措施和干扰手段.

现有的SAR有源噪声干扰极易被通过信号处理的方式剔除掉[2,3];逼真的有源假目标欺骗干扰对雷达信号侦察精度及发射信号的相干性有很高的要求,需要复杂的侦察设备和干扰设备[4,5];箔条、角反射器、等离子体[6,7]等无源干扰在形成、布置、产生时都有一定的时空限制;以上干扰措施很少考虑目标的动态特性.而目前先进的SAR系统基本都具有地面动目标指示(GMTI)功能,经过GMTI处理后普通干扰信号和地面静止目标回波可能会一起被滤除,而地面运动目标仍极易被SAR探测出来[8].

目标或目标的组成部分除质心平动以外,具有的振动、旋转和加速等微小运动称为微动.目标的微运动会造成SAR图像在方位向上的扩展,使得成像质量下降[9~12];同时目标的微动具有复杂的运动分量,难以直接通过GMTI剔除.把这种微动调制用于干扰的目的,再配合一定的距离向欺骗干扰方法,如移频干扰[13]、间歇采样转发干扰[14]等,则有望实现复杂的二维欺骗干扰效果,同时又能兼顾目标的运动特性,使得SAR难以简单地利用GMTI技术剔除干扰.

受SAR微动目标成像特点的启示,本文将微动调

收稿日期:2008-11-20;修回日期:2009-07-09
基金项目:国家自然科学基金(No.60672033);"十一五"武器装备预先研究(No.513040305)

制用于干扰的目的,提出一种基于微动调制的 SAR 新型有源干扰方法.第二节对旋转微动目标的 SAR 成像特性进行分析,建立相应的几何模型和信号模型,从中得到微动目标的成像输出结果和微动参数的关系;第三节建立基于微动调制的 SAR 有源干扰模型,确定干扰关键参数、信号回波和输出形式,给出一种基于 DRFM 技术的干扰实施方案,分析侦察误差对干扰效果的影响;第四节进行仿真实验验证;第五节总结全文.

2　旋转微动目标的 SAR 成像特点

微动通常具有复杂的运动分量,会造成 SAR 回波的慢时间多普勒调制,简称微动调制.不同规律的微动目标在 SAR 回波中会形成不同的微多普勒调制.当微动形式为匀速旋转运动时,目标的微多普勒特性如图 1.

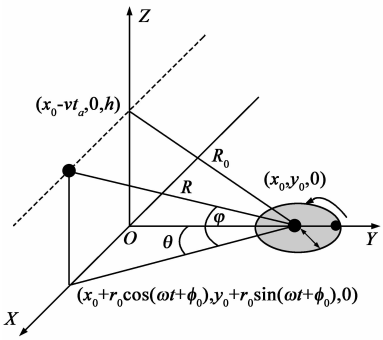

图1　旋转微动目标的SAR成像场景

以机载 SAR 为例,在观察坐标系中(见图 1),载机以速度 v 运动,平台高度为 h,点目标以垂直斜距为 R_0 的固定点$(x_0,y_0,0)$为圆心匀速旋转,旋转半径为 r_0,角速度为 ω(逆时针方向为正),旋转点初始位置与 X 轴正方向夹角为ϕ_0,φ 为俯仰角,θ 为方位角.任意时刻 SAR 相位中心到固定点目标的斜距为 $R_0(t_a)=\sqrt{y_0^2+(x_0-vt_a)^2+h^2}$,其中 t_a 代表方位向慢时间,取 t_r 为距离向快时间.

因 $vt_a \ll R_0$,故旋转点目标到 SAR 的斜距为

$$R(t_a)\approx R_0(t_a)+r_0'\sin[(\omega-v/y_0)t_a+\phi_0+x_0/y_0] \tag{1}$$

其中 $r_0'=r_0\cos\varphi$,在一个合成孔径时间内 $\varphi=\arccos\left[\sqrt{y_0^2+(x_0-vt_a)^2}\Big/R_0(t_a)\right]$可近似认为保持不变,方位向多普勒调频率 $\mu_a=-2v^2/(\lambda R_0)$.则对载频为 f_0,调频斜率为 μ_r,脉冲宽度为 τ 的 SAR 线性调频信号而言,该旋转微动目标的回波相位相对于发射信号相位的变化为(忽略微小交叉项的影响)

$$\begin{aligned}\Delta\varphi(t_a)=&-2kR_0-k(vt_a)^2/R_0\\&-2kr_0'\sin[(\omega-v/y_0)t_a+\phi_0+x_0/y_0]\end{aligned} \tag{2}$$

其中 $k=2\pi/\lambda$ 为距离波数.不妨设旋转中心的 SAR 成像结果为 $s(t_r,t_a)$,并将上式的正弦相位项展开成以贝塞尔函数为系数的三角级数,得到旋转微动目标经 SAR 二维成像处理后的结果为

$$\begin{aligned}s_r(t_r,t_a)\approx A\cdot\sum_{-\infty}^{+\infty}\{&J_n(2kr_0')\\&\cdot\exp[-jn(\phi_0+x_0/y_0)]\\&\cdot s\left[t_r,t_a+\frac{nR_0}{2kv^2}(\omega-v/y_0)\right]\}\end{aligned} \tag{3}$$

其中旋转目标的散射强度 A 为缓慢变换函数,$J_n(\cdot)$为第一类 n $(n\in Z)$阶贝塞尔函数.

从中可以看出旋转微动目标的 SAR 成像输出为沿方位向等间隔分布的多个目标图像(不妨称为虚假目标像),其幅度受贝塞尔函数调制.这说明在距离向上,旋转微动目标图像位于同一距离分辨单元内,基本实现了相干脉压处理;而在方位向上,由于旋转运动引起的目标回波相当于对静止目标回波进行正弦相位调制,故经过正常的成像处理不能实现同相相加,最终出现了多个成对的虚假目标像.

多个虚假目标像的方位向间隔距离为

$$\Delta x=\frac{R_0}{2kv}\left(\omega-\frac{v}{y_0}\right) \tag{4}$$

由卡森公式[15]知调制信号的带宽为

$$B_m=\frac{1}{\pi}(2kr_0'+1)\left(\omega-\frac{v}{y_0}\right) \tag{5}$$

计算表明大于$(2kr_0'+2)$次的边频分量其幅度小于未调制波幅度的 10%,对大于$(2kr_0'+2)$次的边频输出忽略不计.另外考虑到微动调制频率需在$[-B_d,B_d]$ $(B_d=|\mu_aT_s|=2v^2T_s/(\lambda R_0))$内,则当 $B_m\leqslant 2B_d$ 时的虚假目标的个数为

$$N=4kr_0'+5 \tag{6}$$

假目标在方位向上的跨度为

$$L_a=(N-1)\cdot\Delta x=\frac{\lambda R_0}{\pi v}(kr_0'+1)\left(\omega-\frac{v}{y_0}\right) \tag{7}$$

当 $B_m>2B_d$ 时,虚假目标的个数为

$$N=\frac{4kv^2T_s}{R_0(\omega-v/y_0)}+1 \tag{8}$$

假目标在方位向上的跨度为

$$L_a=2vT_s=2L \tag{9}$$

其中 L 为合成孔径长度.因大部分情况下 $B_m\leqslant 2B_d$,故后面的讨论多将基于该情况展开.

可见,当微动形式为匀速旋转运动时,目标的 SAR 回波会在慢时间域受到正弦相位调制,在 SAR 方位向图像上形成多个逼真的虚假目标像.

3　基于微动调制的 SAR 有源干扰

旋转微动目标因能够形成多个方位向等间隔分布的目标像,且具有复杂的运动分量而不易被 GMTI 剔除,故对 SAR 静止目标和运动目标成像均有着特殊的破坏能力.把这种微动调制思想用于产生干扰信号,则可产生良好的干扰效果.利用旋转微动目标的 SAR 成像模型,通过对干扰机截获的SAR信号经正弦相位调

制后进行转发,即可实现对 SAR 的微动调制有源干扰,达到方位向多假欺骗的目的.参照式(2),建立旋转微动调制干扰信号模型如下:

$$J(t_r,t_a)=A_j\cdot s_0(t_r,t_a)\cdot \mathrm{rect}(t_a/T_s)\cdot \exp[-jA_m\sin(2\pi f_m t_a+\varphi_m)] \tag{10}$$

其中 A_j 为干扰信号在 SAR 接收机处的幅度,$s_0(t_r,t_a)$ 为干扰机接收到的 SAR 信号,T_s 为合成孔径时间,干扰信号存在于照射到干扰机的合成孔径时间之内,rect(·)为矩形脉冲窗函数,R_0 为干扰机到 SAR 的垂直斜距,A_m 为调制幅度,f_m 为调制频率,ϕ_m 为调制信号初始相位.

3.1 关键干扰参数

对比式(2),容易得出基于微动调制的干扰信号模型中的关键参数为:调制频率 f_m、调制幅度 A_m 和干扰信号幅度 A_j.

(1)调制频率为

$$f_m=\frac{1}{2\pi}\left(\omega-\frac{v}{y_0}\right)=\frac{2\Delta xv}{\lambda R_0} \tag{11}$$

(2)调制幅度为

$$A_m=2kr_0'=L_a/(2\Delta x)-2 \tag{12}$$

(3)干扰信号幅度为

$$A_j=\sqrt{JSR\cdot P_s} \tag{13}$$

其中 JSR 为达到干扰目的所需要的干信比,P_s 为信号功率.需要侦察系统确定的参数包括:SAR 的载频 f_0、载机速度 v、干扰机到 SAR 之间的垂直斜距 R_0;需要用户根据实际作战情报和作战策略确定的参数有:方位向假目标的间隔 Δx、跨度 L_a 和干信比 JSR.通常情况下,合成孔径时间大于调制周期($1/f_m$),此时 ϕ_m 可任意取值.

3.2 干扰信号的成像输出

干扰信号的生成分为两部分:一是干扰信号幅度的生成,由需要生成的信号功率 P_s 和干扰所需的干信比 JSR 决定;二是干扰信号相位的生成,由生成的多假目标的间隔 Δx 和跨度 L_a 来决定.对照上述干扰模型,得到微动调制干扰信号的幅度项为

$$A_j=\sqrt{P_j}=\sqrt{JSR\cdot P_s} \tag{14}$$

干扰信号的调制相位项为

$$\phi(t_a)=-\left(\frac{L_a}{2\Delta x}-2\right)\sin\left(\frac{2k\Delta xv}{R_0}t_a+\phi_m\right) \tag{15}$$

其中,如果被保护的是静止目标,该干扰信号经 SAR 的成像处理形成的方位向虚假目标的间距为 Δx,通常情况下当 $B_m\leqslant 2B_d$ 时,假目标的方位向跨度为 L_a,个数为 $N=2A_m+5=L_a/\Delta x+1$;当 $B_m>2B_d$ 时,假目标的方位向跨度为 $2L$,个数为 $N=2L/\Delta x+1$.

假设 $s_j(t_r,t_a)$是干扰机处目标归一化的成像结果,类比式(3),不难得出干扰信号的成像结果为

$$s_{jam}(t_r,t_a)\approx A_j\cdot\sum_{-\infty}^{+\infty}J_n(A_m)\cdot\exp(-\mathrm{j}n\phi_m)\cdot s_j\left(t_r,t_a+n\frac{f_m}{k_a}\right) \tag{16}$$

从中可以看出干扰成像输出为沿方位向等间隔分布的多个虚假目标像,其幅度受第一类贝塞尔函数调制.在距离向上,干扰图像位于同一距离分辨单元内,实现了相干脉压处理;在方位向上,由于干扰对回波进行的正弦相位调制,故不能实现全相干处理,仅能获得部分方位向处理增益,出现了多个成对的虚假目标像.

3.3 干扰的实现过程

图 2 给出了本干扰实现的具体过程.首先将接收天线接收到的信号进行带通滤波、低噪放大,分两路处理,一路送往滤波器组滤波和检波,估计信号参数,并结合战情需要的假目标参数一起用于确定干扰的参数;另一路送入 DRFM 模块,进行下变频、A/D 采样、存储、D/A 转换、低通滤波、上变频等处理.根据确定下来的调制参数按照微动调制规律生成微动调制信号,和来自外部的命令或数据一同送入到处理控制单元(处

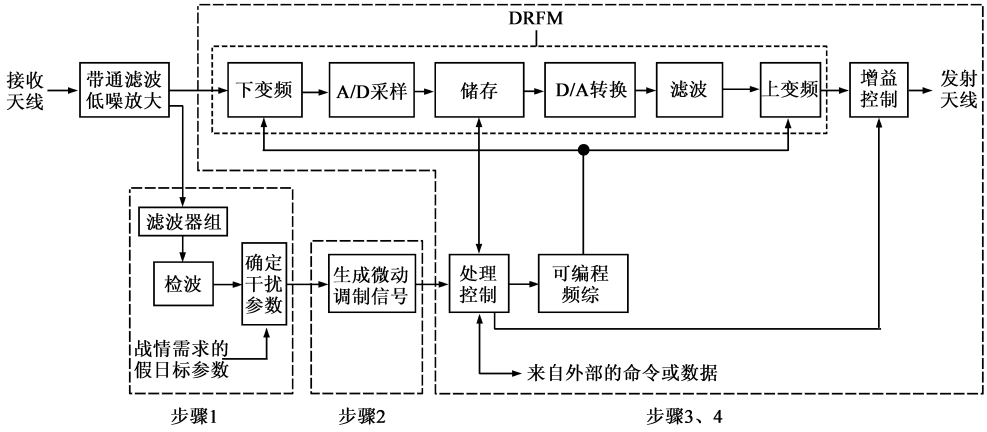

图2 基于微动调制的合成孔径雷达新型有源干扰的系统框图

理控制是干扰系统的指挥控制中心,负责发出各种信号处理命令).处理控制单元对 DRFM 存储的信号进行相位调制,通过增益控制单元进行幅度调制.其中,根据处理控制单元的指令,通过可编程频综模块来提供上变频和下变频的基准.经幅度和相位调制后的射频干扰信号通过发射天线转发处理即可最终实现干扰.

3.4　侦察参数误差对干扰效果的影响

文中提出的有源干扰方法需要侦察机提供载频、SAR 平台速度以及干扰机垂直斜距,而侦察参数难免存在误差,像平台速度以及干扰机垂直斜距往往需要复杂的设备才能精确获取,甚至难以获取.对此,下面将分析一下侦察误差对干扰效果的影响.不妨假设载频的误差为 Δf,速度误差为 Δv,干扰机垂直斜距误差为 ΔR_0,则相对误差为 $\varepsilon_f = \Delta f / f_0$, $\varepsilon_v = \Delta v / v$, $\varepsilon_R = \Delta R_0 / R_0$,实际形成的假目标间隔为

$$\Delta x' = \Delta x (1 + \varepsilon_f)(1 + \varepsilon_v) / (1 + \varepsilon_R) \tag{17}$$

当 $B_m \leqslant 2B_d$ 时,形成的假目标方位向跨度为

$$L_a' = L_a (1 + \varepsilon_f)(1 + \varepsilon_v) / (1 + \varepsilon_R) \tag{18}$$

当 $B_m > 2B_d$ 时,形成的假目标方位向跨度为

$$L_a' = 2L \tag{19}$$

假目标个数则不受影响,当 $B_m \leqslant 2B_d$ 时, $N = 2A_m + 5 = L_a / \Delta x + 1$;当 $B_m > 2B_d$ 时,个数为 $N = 2L / \Delta x + 1$.

侦察误差并不影响干扰的输出形式,而是改变了假目标的方位向间距和跨度.由此可见,在侦察参数不准确甚至是不能提供侦察参数只能采取直观估值的方法时,仍能形成多假欺骗的干扰效果.值得注意的是文中提到的侦察参数一方面可理解为是利用侦察设备获得的,另一方面也可理解为利用先验信息(如典型 SAR 场景的参数范围)估计出来的.故在对假目标的分布特性没有精确要求的情况下,本干扰方法具备对侦察设备的要求较低,战场生存能力强的优点.

4　实验分析

以某机载 SAR 实测回波数据为原始输入,实验参数为:载频为 $f_0 = 9.6$GHz,载机速度为 $v = 117$m/s,脉冲宽度为 $T_p = 20\mu$s,带宽为 $B = 70$MHz,SAR 发射功率为 $P_t = 5000$W,增益为 $G_t = 38$dB,雷达损耗为 $L_r = 10$dB;干扰机垂直斜距为 $R_0 = 7805$m,干扰机功率为 $P_j = 10$W,干扰机增益为 $G_j = 10$dB,干扰机损耗为 $L_j = 5$dB.假目标方位向的跨度为 $L_a = 200$m,间隔为 $\Delta x = 20$m;截取的场景方位向范围为[- 250m, 250m],距离向范围为[7550m,8050m].

采用经典的距离-多普勒算法进行多视成像处理,图 3 为利用本文干扰方法形成的干扰效果图,(*a*)为无干扰时的原始 SAR 图像;(*b*)为侦察参数精确时的成像图;(*c*)为当侦察到的载频为 15GHz,即 $\varepsilon_f = 56.25\%$,其他参数准确时的成像结果;(*d*)为当侦察到的干扰机斜距为 $R_0 = 10000$m,即 $\varepsilon_R = 28.12\%$,其他参数准确时的成像结果;(*e*)为当侦察到的平台速度为 $v = 200$m,即 ε_v

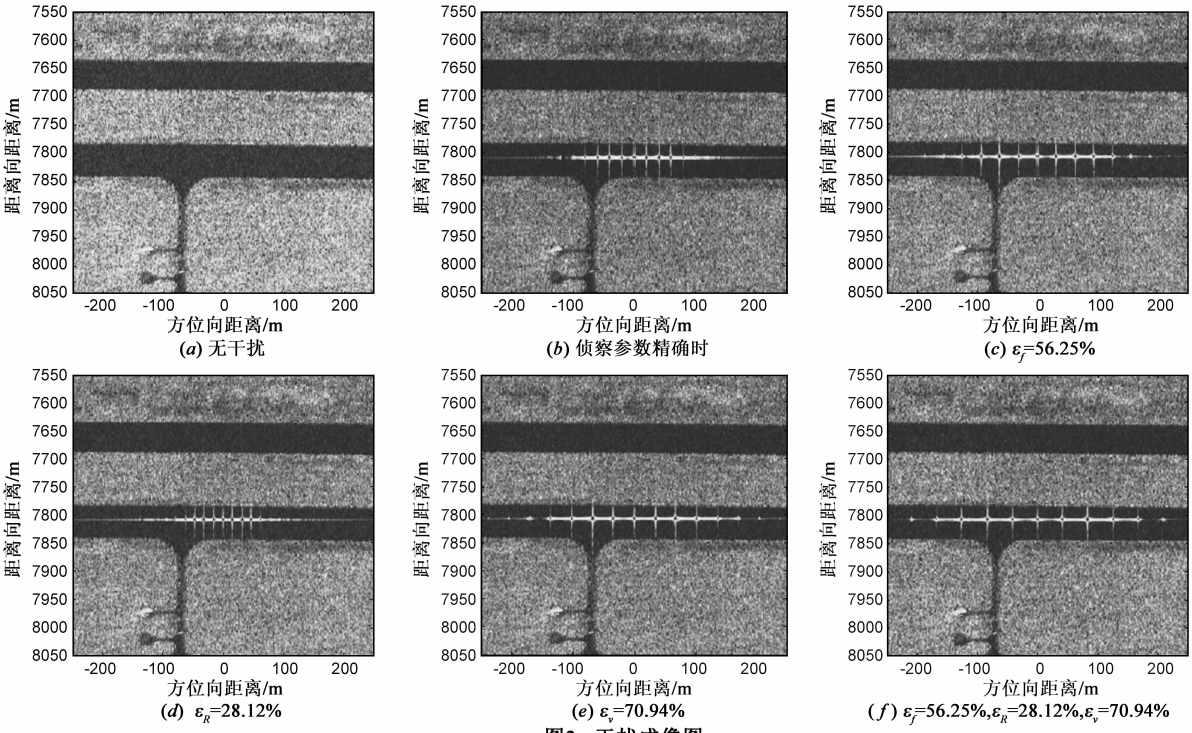

图3　干扰成像图

$=70.94\%$,其他参数准确时的成像结果;(f)为当侦察到的载频为 15GHz,干扰机斜距为 10000m,SAR 平台速度为 200m/s 时的干扰效果图,此时 $\varepsilon_f=56.25\%$,$\varepsilon_R=28.12\%$,$\varepsilon_v=70.94\%$.将从各干扰图像中得到的假目标间隔、跨度以及个数与根据式(17)、(18)等表达式计算得到的理论值对比,结果如表 1 所示.

表 1 理论值与实验值对比表

	$\Delta x'$ 实验值	$\Delta x'$ 理论值	$\Delta x'$ 误差	L_a' 实验值	L_a' 理论值	L_a' 误差
(b)	20m	20m	0%	200m	200m	0%
(c)	31m	31.25m	−0.8%	312m	312.5m	−0.16%
(d)	16m	15.63m	2.37%	156m	156.25m	−0.16%
(e)	34m	34.2m	−0.58%	340m	342m	−0.58%
(f)	42m	41.69m	0.74%	416m	416.9m	−0.22%

因 $B_m \leqslant 2B_d$,故 $N=L_a/\Delta x+1=11$.从图中可以看出假目标个数与理论值完全吻合,假目标间距误差小于 3%,假目标跨度的误差小于 1%.可见在干扰功率仅为 10W 的情况下,利用本文提出的干扰方法即可形成方位向多假欺骗的干扰效果,实验结果与理论分析一致,这充分证明本方法的有效性和稳健型.

5 结论

SAR 干扰技术是当前复杂电磁环境下电子对抗领域中研究的热点问题,日益完善的 SAR 系统给干扰的战场适应性和稳健性提出了越来越多的难题.本文在分析旋转微动目标对 SAR 回波的调制作用及成像特点的基础上,提出了一种基于微动调制的新型有源干扰样式,确定了各关键干扰参数,给出了干扰信号的成像结果及干扰的实现方案,分析了侦察误差对干扰效果的影响,并进行了实验验证.结果表明,该干扰样式具有距离向相干处理、方位向部分相干处理的特点,可实现方位向多假欺骗.假目标在方位向上等间隔分布,幅度受第一类贝塞尔函数调制,且假目标的间隔和跨度均可控.

基于微动调制的新型有源干扰方法,由于利用了微动对 SAR 回波的复杂调制作用,兼顾到了干扰假目标的运动特性,可同时实现对静止目标和运动目标的有效欺骗干扰.该干扰方法可获得距离向处理增益和部分方位向增益,弥补了干扰信号处理增益的劣势,在丰富 SAR 对抗理论和方法的同时,提高了地面重要军事目标(导弹发射车、装甲车辆等)对 SAR 探测和识别的对抗能力.从整个实现步骤可知,只需在现有基于 DRFM 转发干扰机诸多通用模块的基础上增加微动调制环节即可,从而为 SAR 新型干扰的工程化提供了一个技术实现方法.值得注意的是,在本干扰方法实现的过程中,载机速度和目标斜距的获得存在一定的复杂度,如不能准确获取时,仍能实现方位向的多假欺骗干扰,此时假目标的间隔、跨度和能量分布将不完全可控.如战场需求对假目标的间隔、跨度和能量分布没有严格要求,该方法仍不失为一种对付 SAR 成像的有效干扰手段.限于篇幅,关于本干扰方法对 GMTI 的对抗性能分析有待在下一步的工作中开展.总体而言,本干扰方法是一种有效的、稳健的、易于工程实现的欺骗干扰方法,对于实际的战场应用,尤其是实现战略车队随队主动干扰具有重要意义和实用价值.

参考文献:

[1] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic Aperture Radar: System and Signal Processing[M]. New York: Jone Wiley & Sons, INC, 1991.

[2] Goj WW. Synthetic Aperture Radar and Electronic Warfare [M]. Boston: Artech House Inc, 1993.

[3] 李兵,洪文.合成孔径雷达噪声干扰研究[J].电子学报,2004,32(12):2035 – 2037.
LI Bing, HONG Wen. Study of noise jamming to SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(12): 2035 – 2037. (in Chinese)

[4] 王盛利,于立,倪晋麟,张光义.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 Sheng-li, YU Li, NI Jin-lin, ZHANG Guang-yi. A study on the active deception jamming to SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1900 – 1902. (in Chinese)

[5] Mehrdad Soumekh. SAR-ECCM using phase-perturbed LFM chirp signals and DRFM Repeat jammer penalization[J]. IEEE Transactions on AES, 2006, 42(1): 191 – 205.

[6] Christopher R Beskar. Cold Plasma Cavity Active Stealth Technology[Z]. White Paper. 2004.

[7] 莫锦军,刘少斌,袁乃昌.等离子体隐身机理研究[J].现代雷达,2002,24(3):9 – 12.
MO Jin-jun, LIU Shao-bin, YUAN Nai-chang. Study on basic theory for plasm a stealth[J]. Modern Radar, 2002, 24(3): 9 – 12. (in Chinese)

[8] Barbarossa S, Farina A. Space-time-frequency processing of synthetic aperture radar signals [J]. IEEE Transactions on AES, 1994, 30(2): 341 – 358.

[9] Chen V C, Li F Y, Ho S S. Micro-Doppler effect in radar-phenomenon, model and simulation study[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 2 – 21.

[10] Chen V C, Ling H. Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis[M]. Boston: Artech House, 2002.

[11] Barlett M S, Movellan J R, Sejnowski T J. Face recognition by independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Neural Network, 2002, 13(6): 1450 – 1464.

[12] Chen V C. Spatial and temporal independent component analysis of micro-Doppler features[A]. Proceedings of IEEE Inter-

national Radar Conference[C]. Arlington, Virginia, 2005. 348 – 353.

[13] 黄洪旭,黄知涛,周一宇.对合成孔径雷达的移频干扰研究[J].宇航学报,2006,27(3):463 – 468.
HUANG Hong-xu, HUANG Zhi-tao, ZHOU Yi-yu. A study on the shift-frequency jamming to SAR[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(3):463 – 468. (in Chinese)

[14] 王雪松,刘建成,张文明,等.间歇采样转发干扰的数学原理[J].中国科学 E 辑(信息科学),2006,36(8):891 – 901.
WANG Xue-song, LIU Jian-cheng, ZHANG Wen-ming, et al. Mathematical principles of intermittent sampling repeater jamming[J]. Science in China, Series E (Information Sciences), 2006, 36(8):891 – 901. (in Chinese)

[15] 曹志刚,钱亚生.现代通信原理[M].北京:清华大学出版社, 2002.
CAO Zhi-gang, QIAN Ya-sheng. Modern Communication Principles[M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 2002. (in Chinese)

作者简介:

吴晓芳　女,1983 年 3 月出生于安徽亳州.2004 年毕业于清华大学大学精密仪器系,并进入国防科学技术大学电子科学与工程学院攻读博士学位.从事 SAR 信号处理与对抗技术的相关研究.

E-mail: xiaofangwu83@gmail.com

代大海　男,1981 年 1 月出生于河南信阳.分别于 2002 年、2004 年和 2008 年在国防科学与技术大学电子科学与工程学院获得学士、硕士及博士学位.主要从事 SAR、极化 SAR 信号处理等方面的研究工作.

E-mail: ddh1206@163.com