Radar Science and Technology

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2024.05.013

机动平台大斜视SAR散射波干扰方法研究

肖 冰,李 根,粘朋雷

(中国人民解放军91550部队,辽宁大连 116023)

摘 要: 机动平台大斜视 SAR 系统的运动参数难以实时侦察和精准预测,极大地增加了对其实施高逼真度 欺骗干扰的难度。本文基于散射波干扰无需侦察平台运动参数的特点,研究了散射波干扰应用于机动平台大斜 视 SAR 的干扰机理、干扰效果及有效干扰区域,提出了基于乘积调制频控阵的机动平台大斜视 SAR 散射波干扰 方法,该方法利用频控阵的多载波特性和乘积调制的方位扩展特性,形成高逼真度的阵列假目标。理论分析和 仿真结果表明,所提方法无需侦察平台运动参数,能够对机动平台大斜视 SAR 系统形成高逼真度的多假目标欺 骗干扰或欺骗压制混合干扰。

关键词:机动平台SAR;乘积调制;频控阵;散射波干扰

中图分类号:TN974 文献标志码:A 文章编号:1672-2337(2024)05-0578-09

引用格式:肖冰,李根,粘朋雷.机动平台大斜视 SAR 散射波干扰方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2024, 22 (5):578-586.

XIAO Bing, LI Gen, NIAN Penglei. Scattering Wave Jamming Method for Maneuvering Platform High Squint SAR[J]. Radar Science and Technology, 2024, 22(5):578-586.

Scattering Wave Jamming Method for Maneuvering Platform High Squint SAR

XIAO Bing, LI Gen, NIAN Penglei (Unit 91550 of PLA, Dalian 116023, China)

Abstract: The motion parameters of maneuvering platform high squint SAR system are difficult to be detected in real time and accurately predicted, which greatly increases the difficulty of high fidelity deception jamming. Based on the characteristics of scattering wave jamming without the reconnaissance of platform motion parameters, the jamming mechanism, jamming effect and effective jamming area of scattering wave jamming applied to maneuvering platform high squint SAR are studied. A scattering wave jamming method for maneuvering platform high squint SAR based on product modulated frequency controlled array is proposed in this paper. The multi-carrier characteristics of frequency controlled array false targets. Theoretical analysis and simulation results show that the proposed method does not need the reconnaissance of platform motion parameters, and can form high fidelity multi-false target deception jamming or deception suppression hybrid jamming against maneuvering platform high squint SAR system.

Key words: maneuvering platform SAR; product modulation; frequency controlled array; scattering wave jamming

0 引 言

合成孔径雷达(Synthetic Apeture Radar, SAR) 能够全天时、全天候地获取地面高分辨二维像,广 泛应用于情报侦察、匹配制导等军事领域^[1]。近年 来,机动平台 SAR 成像技术得到了快速的发展, SAR 成像系统正在由"平台适应 SAR"向"SAR 适应 平台"转变^[24]。导弹、战机以及无人机等机动平台 采用 SAR 成像系统,能够在高机动轨迹下对目标 区域进行前斜成像,对我方重要军事目标的战场 生存构成极大威胁^[5-6]。针对机动平台大斜视 SAR 成像系统的电子干扰已成为电子对抗领域的难点 问题。

针对 SAR 的有源干扰可分为噪声干扰和欺骗 干扰两大类^[7]。典型的噪声干扰有射频噪声干扰、 噪声调幅干扰和噪声调频干扰等。噪声干扰被广

收稿日期: 2024-01-02; 修回日期: 2024-05-13

泛应用于各型号电子干扰装备中,但其功率需求 大,易暴露干扰机位置,同时SAR天线的自适应波 束形成技术[8-9]和自适应极化滤波技术[10]的发展也 极大降低了噪声干扰的有效性。典型的欺骗干扰 包括以移频干扰、多普勒调制干扰、间歇采样干 扰[11-13]为代表的点目标欺骗干扰和基于成像模板 的卷积式欺骗干扰^[14]。点目标欺骗干扰不需要对 SAR 的平台运动参数进行高精度侦察和预测,但 其欺骗形式单一,仅在低分辨SAR成像系统中有 一定欺骗干扰效果。基于成像模板的卷积式欺骗 干扰能够形成高逼真的面目标欺骗及场景欺骗干 扰^[15],但其对SAR信号参数和平台运动参数都有 较高侦察精度需求,主要应用于轨道已知的星载 SAR干扰。对于弹载、机载等军用高机动平台 SAR 成像系统,由于平台运动参数无法高精度侦 察和预测,目前尚无有效的欺骗干扰方法。

为实现针对机动平台SAR系统的面目标欺骗 干扰,本文提出了基于乘积调制频控阵的机动平 台大斜视SAR散射波干扰方法。散射波干扰对侦 察参数依赖小,执行简单,能够在SAR的时域、频 域、极化域形成逼真的面目标及场景欺骗干 扰[16-17],目前已有不少文献对散射波干扰机理进行 了研究,但相关成果均集中在常规水平匀速运动 平台SAR干扰和SAR-GMTI干扰^[18-22]。相较于水 平匀速运动平台SAR成像系统,机动平台大斜视 SAR成像系统存在复杂的距离方位耦合和成像参 数空变特性,该系统下散射波干扰有更加复杂的 干扰机理和干扰效果。为此,本文构建了机动平 台大斜视 SAR 散射波干扰模型,分析了散射波干 扰机理和有效照射区域。为解决近距离成像时散 射波干扰难以形成高逼真度假目标的问题,提出 了基于乘积调制频控阵的散射波干扰方法.能够 对不同成像距离下的机动平台大斜视系统形成高 逼真的多假目标欺骗干扰或欺骗压制混合干扰。 仿真分析验证了所提方法的有效性。

1 机动平台大斜视 SAR 散射波干扰

散射波干扰是一种多径干扰方法,将截获的 雷达信号转发到特定区域,经其散射后形成干扰。 在干扰过程中,干扰信号从多个连续方向进入雷 达主瓣,因此很难用传统的旁瓣抑制和空域滤波 方法消除干扰。在如图1所示的机动平台大斜视 散射波干扰场景中,平台沿曲线ABC机动,平台在 合成孔径中心点B时的水平速度为v_x,垂直速度为 v_z,笛卡尔坐标系下的3维加速度分别为a_x,a_y,a_z。 散射波干扰中,SAR信号的路径由正常成像模式 的双倍雷达目标距离增加到了SAR到干扰机、干 扰机到目标、目标返回SAR平台的三段路程。图1 中,合成孔径中心点时平台高度为h,散射波干扰 机布设的高度为h_j,其在水平面的坐标(x_j,y_j)可表 示为

$$\begin{cases} x_{j}(R_{j},\theta_{j}) = \sin(\theta_{c} + \theta_{j})\sqrt{R_{j}^{2} - (h - h_{j})^{2}} \\ y_{j}(R_{j},\theta_{j}) = \cos(\theta_{c} + \theta_{j})\sqrt{R_{j}^{2} - (h - h_{j})^{2}} \end{cases}$$
(1)

式中, R_j 表示合成孔径中心点干扰机到平台的斜距, θ_i 为场景中心斜视角, θ_j 为干扰机相对场景中 心的斜视角。



图1 机动平台大斜视SAR散射波干扰示意图 平台到干扰机的瞬时斜距可表示为

$$R_{pj}(t_{a}; R_{j}, \theta_{j}) = \left\{ \left(x_{j} \left(R_{j}, \theta_{j} \right) - v_{x} t_{a} - \frac{1}{2} a_{x} t_{a}^{2} \right)^{2} + \left(y_{j} \left(R_{j}, \theta_{j} \right) - \frac{1}{2} a_{y} t_{a}^{2} \right)^{2} + \left(h - h_{j} + v_{z} t_{a} + \frac{1}{2} a_{z} t_{a}^{2} \right)^{2} \right\}^{1/2}$$
(2)

将式(2)在方位时间 $t_a = 0$ 处进行4阶泰勒级 数展开,可得

$$R(t_{a}; R_{j}, \theta_{j}) \approx R_{j} + \sum_{i=1}^{4} k_{j,i} \left(R_{j}, \theta_{j} \right) t_{a}^{i}$$
(3)

 $k_{j,i}(R_{j},\theta_{j}) = (1/i!) (d^{i}R_{pj}(t_{a}; R_{j},\theta_{j})/dt_{a}^{i})|_{t_{a}=0}$ 表示第 *i* 阶泰勒级数展开系数,其中第1,2阶系数的解析 式为

$$k_{j,1}(R_{j},\theta_{j}) = \frac{-\sin(\theta_{c} + \theta_{j})v_{x}\sqrt{R_{j}^{2} - (h - h_{j})^{2}} + hv_{z}}{R_{j}}$$

$$k_{j,2}(R_{j},\theta_{j}) = \frac{-x_{j}(R_{j},\theta_{j})a_{x} + v_{x}^{2} - y_{j}(R_{j},\theta_{j})a_{y}}{2R_{j}} + \frac{(h - h_{j})a_{z} + v_{z}^{2} + (h - h_{j})a_{z} + v_{z}^{2}}{2R_{j}} - \frac{(hv_{z} - v_{x}x_{j}(R_{j},\theta_{j}))}{2R_{j}^{3}}$$
(4)

强散射目标(如坦克、装甲车和导弹发射车等 目标或其金属模型)部署在地平面P₁点(x₀, y₀)处。 按照图1所示散射波欺骗干扰模型,在一个合成孔 径长度内,对任意时刻t_a,干扰信号走过的路程可 以表示为

$$R_{js}(t_{a}; R_{j}, \theta_{j}) = R_{j} + R_{jt} + R_{t} + \sum_{i=1}^{4} \left(k_{j,i} \left(R_{j}, \theta_{j} \right) + k_{i} \left(R_{0}, \theta_{0} \right) \right) t_{a}^{i} \quad (5)$$

式中, $k_i(R_0, \theta_0)$ 表示 P_i 点到平台距离的第i阶展开 系数,解析式与 $k_{j,i}(R_j, \theta_j)$ 相似, R_0 和 θ_0 分别表示 P_i 点的合成孔径中心斜距和相对场景中心斜视角。 $R_{j,i}表示干扰机到目标点P_i$ 的距离,表示为

$$R_{jt} = \sqrt{\left(x_{j} - x_{0}\right)^{2} + \left(y_{j} - y_{0}\right)^{2} + h_{j}^{2}}$$
(6)

接收机收到的解调后的基带干扰信号在距离 频域可表示为

$$Ss_{j_{rec}}(f_{r},t_{a};R_{j},\theta_{j}) = P(f_{r}) \times \exp\left(-j\frac{2\pi(f_{c}+f_{r})}{c}R_{js}(t_{a};R_{j},\theta_{j})\right)$$
(7)

式中, $P(f_r)$ 表示发射信号的频域表达式。

文献[2]中提出了适用于大场景成像的机动 平台大斜视 SAR 成像方法,该方法采用 Keystone 变换校正空变的距离徙动,通过方位时域子区域 Deramp 滤波解决了成像参数方位空变性。下面 采用文献[2]方法对干扰信号的成像结果进行 推导。

以场景中心点为参考,采用相位滤波函数

 $H_1(f_r, t_a)$ 对干扰信号距离方位解耦、距离压缩和非 空变的距离徙动校正后,回波信号可以表示为

$$Ss_{j}(f_{r},t_{a};R_{j},\theta_{j}) = Ss_{j_rec}(f_{r},t_{a};R_{j},\theta_{j}) \cdot H_{1}(f_{r},t_{a}) = \exp\left(-j\frac{2\pi(f_{c}+f_{r})}{c}R_{j\Delta}(t_{a};R_{j},\theta_{j})\right)$$
(8)

其中相位滤波函数 $H_1(f_r,t_a)$ 表示为

$$H_{1}(f_{r},t_{a}) = P^{*}(f_{r}) \exp\left(j\frac{2\pi(f_{c}+f_{r})}{c}\sum_{i=1}^{4}k_{i}(R_{c},0)t_{a}^{i}\right)$$
(9)

$$R_{j\Delta}$$
为干扰信号的空变 RCM, 表示为

$$R_{j\Delta}(t_{a}; R_{j}, \theta_{j}) = R_{j} + R_{jt} + R_{t} + \sum_{i=1}^{4} \left(k_{j,i}(R_{j}, \theta_{j}) + k_{i}(R_{0}, \theta_{0}) - 2k_{i}(R_{ref}, 0) \right) t_{a}^{i}$$
(10)

机动平台SAR的合成孔径时间较短,干扰信号的空变距离徙动以线性分量为主,采用距离向 Keystone变换校正空变距离徙动后,干扰信号距离时域的聚焦位置为

$$R_{j_{j}f} = \frac{R_{j} + R_{jt} + R_{t}}{2}$$
(11)

由于信号传输路径的变化,散射波干扰形成 假目标的距离向聚焦位置*R*_i,大于真实目标的距 离向聚焦位置*R*_i。距离压缩和距离徙动校正后, 干扰信号的方位时域调制相位为

$$\phi_{j0}(t_{a}; R_{j}, \theta_{j}) = -\frac{2\pi f_{c}}{c} 2R_{j\perp f} - \frac{2\pi f_{c}}{c} \cdot \left(\sum_{i=1}^{4} \left(k_{j\perp i}(R_{j}, \theta_{j}) + k_{i}(R_{0}, \theta_{0}) - 2k_{i}(R_{ref}, 0)\right) t_{a}^{i}\right)$$

$$(12)$$

采用文献[2]中的方位时域子区域 Deramp方 法对干扰信号进行方位压缩处理时,对于斜距平 面 (R_0, θ_0) 处的目标,构造用于去除方位非线性相 位用的子区域 Deramp 函数可表示为

$$H_{\text{deramp}}\left(R_{0},\theta_{0}\right) = \exp\left(j\frac{2\pi f_{c}}{c}\sum_{i=2}^{4}2k_{\Delta i}\left(R_{0},\theta_{0}\right)t_{a}^{i}\right)$$
(13)

式中, $k_{\Delta i}(R_0,\theta_0) = k_i(R_0,\theta_0) - k_i(R_c,0)_o$

去除非线性相位后,干扰信号在方位频域的 聚焦位置为

$$A_{j_{i}f}(R_{0},\theta_{0}) = -\frac{f_{c}}{c} \left(k_{j_{1}}(R_{j},\theta_{j}) + k_{1}(R_{0},\theta_{0}) - 2k_{1}(R_{ref},0) \right)$$
(14)

因此,散射波干扰在成像平面(距离时域-方位 频域)形成的假目标位置为 $(R_{j,f}, A_{j,f})$ 。假设在无干 扰条件下,成像平面 $(R_{j,f}, A_{j,f})$ 位置处的目标对应 的相对斜视角为 θ_{ji} 。无干扰条件下目标的方位向 聚焦位置为

$$A_{\rm f}\left(R_{\rm j_f},\theta_{\rm jt}\right) = -\frac{2f_{\rm c}}{c}\left(k_{\rm l}\left(R_{\rm j_f},\theta_{\rm jt}\right) - k_{\rm l}\left(R_{\rm ref},0\right)\right) \quad (15)$$

由于散射波干扰方法只改变了原SAR信号的 传播路径,干扰信号与SAR接收机的距离向滤波 器是完全匹配的,而与方位向滤波器是完全或者 部分匹配的。下面分析散射波形成假目标的方位 向匹配误差。

$$\Rightarrow A_{f}\left(R_{j_f}, \theta_{jt}\right) = A_{j_f}\left(R_{0}, \theta_{0}\right), \ \overline{\Pi}$$

$$\theta_{jt} = \arcsin\left(\left(R_{j_f}\left(\frac{c}{f_{c}}A_{j_f}\left(R_{0}, \theta_{0}\right)-2k_{1}\left(R_{ref}, 0\right)\right)+2hv_{z}\right)/2v_{x}\sqrt{R_{j_f}^{2}-h^{2}}\right) - \theta_{c}$$

$$(16)$$

代入武(14), 可待

$$\theta_{ji} = \arcsin\left(\frac{2hv_z - R_{j_{z}f}\left(k_{j_{z}1}\left(R_{j},\theta_{j}\right) + k_1\left(R_{0},\theta_{0}\right)\right)}{2v_x\sqrt{R_{j_{z}f}^2 - h^2}}\right) - \theta_c$$
(17)

在SAR的成像处理中,处理干扰信号的Deramp 函数为 $H_{deramp}(R_{j,l}, \theta_{ji})$ 。在SAR的方位向匹配滤波 中,残余的二阶相位会导致点目标聚焦后的方位 剖面图主瓣展宽,降低方位向分辨率,而残余高阶 相位会导致方位向副瓣电平的变化。可以看出, 残余二阶相位是影响方位聚焦质量的主要因素, 方位聚焦处理后,干扰信号残存的2阶斜距系数为

$$k_{j,2,res} = k_{j,2} (R_{j},\theta_{j}) + k_{2} (R_{0},\theta_{0}) - 2k_{2} (R_{ref},0) - 2k_{\Delta 2} (R_{j,f},\theta_{jt})$$
(18)

在合成孔径时间内,残存2阶斜距系数产生的 最大二次相位误差

$$QPE = \frac{\pi f_c k_{j,2,res} T^2}{2c}$$
(19)

QPE用于衡量假目标的聚焦质量,QPE越大 散射波干扰形成的假目标聚焦质量越差。QPE ≤ π/4时,可认为残余误差相位对目标的聚焦质量无影响,QPE ≤ π/4的干扰机照射区域为有效照射区域。通常情况下,散射波干扰机布设在照射目标(被保护目标或假目标模型)附近,以降低雷达信号传输路径变化对假目标逼真度的影响。

2 乘积调制的频控阵散射波干扰

2.1 干扰原理分析

为实现假目标数量、位置和逼真度控制,本节 提出了基于方位乘积调制的频控阵散射波干扰方 法。所提方法利用频控阵的多载波特性在距离向 上形成多个假目标,通过控制频偏量的大小实现 假目标距离向位置控制。进一步,通过对截获信 号进行方位乘积调制(乘积调制信号由多个不同 的多普勒频率信号复合而成),可以实现距离向假 目标的方位向扩展,最终形成假目标阵列。

基于方位乘积调制的频控阵散射波干扰本质 上是对干扰机截获的SAR信号进行距离移频和方 位多普勒调制。假设频控阵干扰机共有N个阵 元,其中第i个阵元的附加频偏为 Δf_{ci} ,对应聚焦后 的距离偏移为 $\Delta R_i = 2K_i \Delta f_{ci}/c$,每个阵元在方位向 采用多普勒乘积调制的方式产生M个假目标,其 中第m个假目标的附加多普勒频率为 $\Delta f_{a,m}$,则 SAR接收机收到的移频多普勒调制干扰信号在距 离频域可表示为

$$Ss_{jm_{rec}}\left(f_{r},t_{a};R_{j},\theta_{j}\right) =$$

$$\sum_{i=1}^{N} \exp\left(-j\frac{2\pi\left(f_{c}+f_{r}\right)}{c}R_{js}\left(t_{a};R_{j},\theta_{j}\right)\right) \times$$

$$\exp\left(-j\frac{4\pi f_{r}}{c}\Delta R_{i}\right) \sum_{m=1}^{M} \exp\left(j2\pi\Delta f_{a_{m}}t_{a}\right) \qquad (20)$$

采用文献[2]方位时域 Deramp 滤波成像方法 进行成像处理后,得到第*i*个阵元产生的第*m*个假 目标的距离和方位向聚焦位置分别为

$$R_{jf_{c,i}} = \frac{R_{j} + R_{jt} + R_{i}}{2} + \Delta R_{i}$$

$$A_{jf_{c,m}} = -\frac{f_{c}}{c} \left(k_{j_{c},1} \left(R_{j}, \theta_{j} \right) + k_{1} \left(R_{0}, \theta_{0} \right) - 2k_{1} \left(R_{ref}, 0 \right) \right) + \Delta f_{a_{c,m}}$$
(21)

由于方位向聚焦位置是频域,因此在方位向

附加的多普勒频率Δf_{a_m}直接就对应了目标在方位 向上的聚焦位置。

2.2 附加多普勒调制产生的方位偏移量分析

附加多普勒频率为Δf_{a.m}使假目标产生的方位 向位置偏移量可通过如下方法计算。

式(16)表征了聚焦后的假目标在斜距平面的 相对斜视角 θ_{μ} 与频域聚焦位置 $A_{j,f}(R_0,\theta_0)$ 的关系。 当控制附加多普勒频率为 $\Delta f_{a,m}$ 时,假目标聚焦后 的方位频域位置改变为

$$A_{j_f_m}(R_0,\theta_0) = A_{j_f}(R_0,\theta_0) + \Delta f_{a_m}$$

$$(22)$$

将 $A_{j,f,m}(R_0,\theta_0)$ 代入式(16)中的 $A_{j,f}(R_0,\theta_0)$,可得多普勒调制后假目标的相对方位斜视角 $\theta_{j,m}$ 。

由此可得,当干扰机照射目标的位置为 (R_0, θ_0) 时,调制多普勒频率 $\Delta f_{a,m}$ 形成的附加相对斜视角为

$$\Delta \theta_{\rm it} = \theta_{\rm it\ m} - \theta_{\rm it} \tag{23}$$

附加多普勒频率为Δf_{a.m}形成的假目标在地平 面上对应的方位间隔距离为

$$\Delta R_{\rm a} = \Delta \theta_{\rm jt} \sqrt{R_{\rm j,f}^2 - h^2} \tag{24}$$

基于式(16)和式(22)~(24),通过反推易得 $\Delta R_a 与 \Delta f_{a,m}$ 的映射关系,据此可以在常用的典型成 像参数下分析附加多普勒频偏 $\Delta f_{a,m}$ 对于假目标方 位向位置偏移 ΔR_a 的影响,进而指导干扰时 $\Delta f_{a,m}$ 的设计。

2.3 移频和多普勒调制后的聚焦效果分析

根据式(18)和(21)可知,调制后的假目标进 行方位向聚焦处理后,残存的2阶斜距系数为

 $k_{jm_res_2} = k_{j_2} \left(R_{j}, \theta_{j} \right) + k_{2} \left(R_{0}, \theta_{0} \right) - 2k_{2} \left(R_{ref}, 0 \right) - 2k_{\Delta i} \left(R_{jf_i}, \theta_{jt_im} \right)$ (25)

式中, $\theta_{j_{1}_im}$ 表示在无干扰条件下 $(R_{j_{1}_i}, A_{j_{1}_m})$ 位置处目标的相对斜视角。

从式(25)可以看出,通过移频和多普勒调制 产生的假目标并未改变散射波信号真实传输路径 所形成的2阶斜距系数 $k_{j,2}(R_j,\theta_j) + k_2(R_0,\theta_0)$ 。因 此,距离 $R_{j,i}$ 上不同方位位置的假目标具有不同的 残存2阶斜距系数 $k_{j,m_{J,m_{2},2}}$ 越小则QPE越小, 相应的假目标聚焦效果好,表现出欺骗功能;反 之, k_{jm_res_2}大时, 假目标散焦明显, 表现出压制 作用。

在表1的近距离高机动成像仿真参数下,图2 给出了附加移频调制距离 ΔR_i 分别为-200,0 和 200 m时, k_{im res 2}产生的 QPE 随附加多普勒频率 Δf_{am} 的变化趋势。图2中可以看出,在任意距离单 元下,通过控制附加多普勒频率Δfam,可以使散射 波形成的假目标具有理想的聚焦效果。因此,当 方位向的假目标数量较多,且间隔较小时,在距离 R_{ifi} 上总存在 k_{i2res} 较小的高逼真假目标。因此,对 于机动平台大斜视SAR成像系统,远距离成像时, 成像参数空变性弱,假目标阵列的kim res2普遍较 小,所提方法可以形成高逼真度的假目标阵列;近 距离成像时,成像参数空变性强,假目标阵列的 ki2 rs变化较大,所提方法形成的假目标阵列将形 成虚假目标欺骗叠加散焦目标压制的混合干扰效 果。在实际应用中,为使假目标阵列不混叠,可根 据机动SAR平台的常用机动参数、成像距离及照

表1 近距离机动平台SAR成像仿真参数

仿真参数	数值	仿真参数	数值		
载频	15 GHz	干扰机距照射点 水平距离	200 m		
距离带宽	$200 \; \mathrm{MHz}$	干扰机高度	100 m		
合成孔径时间	3 s	干扰机相对 斜视角	0°		
脉冲宽度	5 µs	平台高度	4 km		
脉冲重复 频率	1 500 Hz	干扰机照射点	场景中心		
场景中心 斜视角	60°	平台速度	(150, 0, -30) m/s		
场景中心 斜距	13 km	平台加速度	(3.2, 1.2, -1.8) m/s ²		
18 16 移频附加距离-200 m 6 移频附加距离0 m 8 14 16					



图2 QPE随附加多普勒频率的变化特性分析

582

射目标的尺寸,在考虑一定的余量下,预先确定假 目标阵列的距离间隔和多普勒频率的合理取值范 围。除此之外,为避免假目标阵列的强规律性,也 可以采用随机移频和随机多普勒频率复合调制的 方式生成随机分布的假目标阵列。

3 仿真分析

为分析所提散射波干扰方法的有效性,本节 进行仿真分析。近距离成像时采用表1中的机载 SAR仿真参数,远距离成像按照表2常用弹载SAR 参数进行仿真。仿真共分为3部分:Part I分析干 扰机布放位置对干扰效果的影响;Part II验证散射 波干扰机理分析的正确性;Part III验证所提方位 乘积调制频控阵散射波干扰方法,在不同成像距 离下对机动平台大斜视SAR成像系统的有效性。

仿真参数	数值	仿真参数	数值
合成孔径 时间	0.6 s	平台高度	20 km
场景中心 斜距	80 km	干扰机 照射点	场景中心
平台速度	(1 500, 0, -300) m/s	平台 加速度	(20, 5, -10) m/s ²

Part I 本部分实验分析干扰机布设高度和成 像距离对有效照射区域的影响,其中干扰机照射 点 QPE ≤ π/4 的区域为有效照射区域。仿真中干 扰机的水平位置为场景中心点,干扰机照射区域 为以干扰机为中心,半径600 m以内的地面区域。

远距离成像条件下,干扰机布设高度和成像 距离对有效照射区域的影响分析结果分别如图3 (a)和(b)所示,图3(a)中默认的成像距离为80 km, 图3(b)中默认的干扰机布设高度为200 m,其中闭 合曲线为QPE=π/4时的等高线。表3给出了不同 干扰机高度和成像距离下的有效照射区半径和照 射区最小QPE。可以看出,远距离成像时,干扰机的 布设高度越低、成像距离越远,有效照射区域越大。

	表3	有效成像区域半径和最小	OPE
--	----	-------------	------------

				-	
干扰机	有效照射	照射区	成像	有效照射	照射区
高度/m	区半径/m	最小QPE	距离/km	区半径/m	最小QPE
100	579	0.218 6	70	307	0.218 6
200	467	0.437 4	80	462	0.437 4
300	282	0.656 3	90	623	0.656 3



图3 远距离成像下的干扰机有效照射区域分析

近距离成像条件下,干扰机有效照射区域仿 真结果如图4所示,图中闭合曲线为不同QPE值的 等高线。图4中,照射区域内的最小QPE为3.1596, 对聚焦质量有较大影响,不存在有效照射区域。



图4 近距离成像下的干扰机有效照射区域分析

综合图 3 和图 4 可以看出,对于机动平台大斜视 SAR 成像系统,在远距离成像条件下,散射波干

扰可形成高逼真度假目标,且在满足干扰机波束 能够有效覆盖照射目标的情况下,干扰机高度越 小,有效成像区域越大;而在近距离成像的条件 下,散射波干扰难以形成高逼真度的假目标。

Part II 为验证本文机动平台大斜视 SAR 散 射波干扰机理分析的正确性,以及通过移频和多 普勒调制控制假目标位置的有效性,本部分进行 远距离成像下的散射波干扰点目标仿真实验。仿 真结果如图5所示,干扰机照射的目标为场景中心 点,目标1为场景中心点形成的真实目标,目标2 为无调制的散射波假目标,目标3为移频调制后的 散射波假目标(附加距离偏移100m),目标4为移 频多普勒调制后的散射波假目标(附加距离偏移 100 m,方位多普勒偏移20 Hz)。从图5可以看出, 由于传输路径的增加,散射波形成的目标2在距离 上滞后于真实目标1,同时由于大斜视SAR距离方 位的高耦合性,目标2在方位上的聚焦位置与真实 目标存在偏差。同目标2相比,由于调制产生的距 离和方位向位置偏移,目标3和目标4在距离和方 位聚焦位置上存在附加偏移,偏移量与调制量 一致。



图5 散射波干扰点目标成像结果

图6给出了上述4个点目标聚焦后的二维等 高线图,可以看出所有点目标的主副瓣清晰,对称 性较好,具有良好的聚焦效果。为进一步精确分 析和评估点目标的聚焦效果,选用峰值旁瓣比 (PSLR)、积分旁瓣比(ILSR)和主瓣宽度(MW)作为 评价指标对点目标的距离和方位向聚焦质量进行 量化分析,MW的单位为采样单元,无相位误差时, PSLR和ISLR的理论值分别为-13.26 dB和-9.80 dB。 点目标聚焦质量量化分析结果如表4所示。从表4 可以看出,点目标2、3、4的聚焦质量与真实目标1 基本一致,表明在远距离的成像条件下,所提散射 波干扰方法能够对机动平台大斜视SAR成像系统 形成高逼真的假目标。



表4 点目标聚焦质量量化分析

方向	点目标	MW	PSLR/dB	ISLR/dB
方位向	1	5.36	-12.61	-9.25
	2	5.32	-13.22	-9.64
	3	5.35	-12.91	-9.72
	4	5.36	-12.97	-9.73
距离向	1	2.71	-13.68	-9.72
	2	2.70	-13.23	-9.96
	3	2.70	-13.24	-9.98
	4	2.70	-13.25	-9.99

Part III 本部分开展面目标干扰成像仿真实 验,以验证所提方法对机动平台大斜视 SAR 成像 系统干扰的有效性。仿真实验中,照射目标为场 景中心位置处的矩形面目标,面目标长 40 m,宽 20 m,平行于 X 轴和 Y 轴。散射波干扰机采用 5 个 阵元的频控阵,采用式(20)在距离向产生 5 个假目 标,距离偏移覆盖-100 m 到 100 m,假目标距离间 隔 $\Delta f_{ci}/(2K_i) = 50$ m,通过多普勒乘积调制,每个 距离向假目标在方位向扩展为 11 个方位假目标, 相邻假目标的多普勒频率差 $\Delta f_{am} = 10$ Hz,根据式 (24)计算近距离表 1 成像参数下的假目标方位间 隔为34.7 m,远距离表2成像参数下的假目标方位 间隔为21.4 m。仿真结果如图7所示,图7(a)和 (b)分别为远距离和近距离成像条件下的阵列假 目标仿真实验,聚焦平面为距离时域-方位频域,图 片横向为距离向,纵向为方位向。从图7(a)可以 看出,在远距离成像时,由于干扰机的有效照射区 域较大,阵列面假目标均有良好的聚焦效果,可对 SAR成像系统形成有效的多目标欺骗。从图7(b) 可以看出,由于近距离成像时没有散射波干扰的 有效照射区,红框内多载波散射波干扰形成的距 离向假目标存在明显的散焦。但通过将假目标在 方位向上进行扩展,如黄色矩形框所示,在每个距 离向上都可以形成聚焦良好的假目标,产生高逼真 度的欺骗干扰,同时散焦程度较大的假目标还可以 形成压制干扰。图7的实验结果与理论分析一致。

Survey and	ALL A	the start	Summer of	States to
ALC: NOT	King .	There and	King .	Kara ge
1	27.7	the second	Kitty	the second
A. 19.19	Kinty.	the state	there are	Strating .
Kant	200	6.0	the start	Alter of
2000	Contractor	Cont .	Contrary.	Kator
200	ALL THE	and a	the state	Anti-
City.	C	Con	Course	
2 miles	City	City	Carto	
King .	100mg	Com	Com	All the second
any.	Chiny	ALL Y	Comp	

(a) 远距离成像



(b)近距离成像 图7 阵列面目标散射波干扰仿真

4 结束语

将散射波干扰应用于机动平台大斜视SAR成

像系统,可以高效快捷地形成欺骗和压制干扰效 果。本文推导分析了机动平台大斜视SAR的散射 波干扰特性,提出了一种基于方位乘积调制的频 控阵散射波干扰方法。研究结果表明,对于机动 平台大斜视SAR成像系统,远距离成像时散射波 干扰的有效照射区域较大,所提方法可以形成高 逼真的阵列假目标;近距离成像时散射波干扰的 有效照射区较小或不存在,所提方法利用方位向 上形成的扩展假目标,能够形成高逼真度欺骗和 压制干扰混合的干扰效果。本文干扰方法实现简 单、灵活可控,可对不同成像距离和运动参数下的 机动平台大斜视SAR成像系统形成高逼真的多假 目标欺骗干扰或欺骗压制混合干扰,具有较强的 军事应用价值。

参考文献:

- [1] SUN Hongbo, SHIMADA M, XU Feng. Recent Advances in Synthetic Aperture Radar Remote Sensing-Systems, Data Processing, and Applications [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(11):2013-2016.
- [2] LI Gen, MA Yanheng, SHI Lin, et al. KT and Azimuth Sub-Region Deramp-Based High-Squint SAR Imaging Algorithm Mounted on Maneuvring Platforms [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2020, 14(3):388-398.
- [3] LI Gen, MA Yanheng, XIONG Xuying. Maneuvering Platform High-Squint SAR Imaging Method Based on Perturbation KT and Subregion Phase Filtering [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2021, 15(1):016502.
- [4] LI Ning, SUN Guangcai, LI Boyu, et al. High Squint Multichannel SAR Imaging Algorithm for High Speed Maneuvering Platforms with Small-Aperture [J]. Signal Processing, 2021, 185:108078.
- [5] DONG Lan, HAN Shengliang, ZHU Daiyin, et al. A Modified Polar Format Algorithm for Highly Squinted Missile-Borne SAR [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2023, 20(1):1-5.
- [6] LIU Yanqi, TAO Manyi, SHI Tianyue, et al. Sub-Aperture Polar Format Algorithm for Curved Trajectory Millimeter Wave Radar Imaging [J]. IEEE Trans on Radar Systems, 2024, 2:67-83.
- [7] 吴钊君,胡东,颜振亚,等.SAR干扰技术综述[J].信息 化研究,2021,47(3):1-13.
- [8] XIONG Junjun, HONG Hong, ZHANG Hongqiang, et al.

Multitarget Respiration Detection with Adaptive Digital Beamforming Technique Based on SIMO Radar [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68 (11):4814-4824.

- [9] 孙纯,方尔正.矢量阵自适应零陷强干扰抑制目标方位 估计方法[J].哈尔滨工程大学学报,2023,44(10):1741-1747.
- [10] CHENG Xu, AUBRY A, CIUONZO D, et al. Robust Waveform and Filter Bank Design of Polarimetric Radar
 [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(1):370-384.
- [11] 蔡幸福,宋建社,郑永安,等.二维间歇采样延迟转发 SAR干扰技术及其应用[J].系统工程与电子技术, 2015,37(3):566-571.
- [12] 王栗沅,何华锋,韩晓斐,等.全极化雷达抗间歇采样 转发式干扰的非匹配滤波方法[J].雷达科学与技术, 2023,21(6):661-669.
- [13] 汪俊澎,李永祯,邢世其,等.合成孔径雷达电子干扰 技术综述[J].信息对抗技术,2023,2(Z1):138-150.
- [14] 李永祯,黄大通,邢世其,等.合成孔径雷达干扰技术 研究综述[J].雷达学报,2020,9(5):753-764.
- [15] LIU Yongcai, WANG Wei, PAN Xiaoyi, et al. Inverse Omega-K Algorithm for the Electromagnetic Deception of Synthetic Aperture Radar [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(7):3037-3049.
- [16] HUANG Bang, WANG Wenqin, ZHANG Shunsheng, et al. A Novel Approach for Spaceborne SAR Scattered -
- (上接第577页)

Korea (South): IEEE, 2019:1314-1324.

- [17] HU Jie, SHEN Li, SUN Gang. Squeeze-and-Excitation Networks [C]// 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, UT, USA: IEEE, 2018:7132-7141.
- [18] WANG Qilong, WU Banggu, ZHU Pengfei, et al. ECA-Net: Efficient Channel Attention for Deep Convolutional Neural Networks [C]// 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, WA, USA: IEEE, 2020:11531-11539.
- [19] ALHASSAN A M, ZAINON W M N W. Brain Tumor Classification in Magnetic Resonance Image Using Hard Swish - Based RELU Activation Function - Convolutional Neural Network [J]. Neural Computing and Applications, 2021, 33(3):9075-9087.
- [20] YING Xue. An Overview of Overfitting and Its Solutions[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019(2):

Wave Deception Jamming Using Frequency Diverse Array [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(9):1568-1572.

- [17] YU Jianfei, NIE Wei, ZHOU Mu, et al. Scattered Wave Deception Jamming Against Squint SAR Using Frequency Diverse Array [C]// 2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference, Hong Kong:IEEE, 2020:979-981.
- [18] 房明星,毕大平,沈爱国.多通道SAR-GMTI二维余弦 调相散射波干扰[J].上海交通大学学报,2018,52(3): 356-364.
- [19] 黄大通,邢世其,庞礴,等.对SAR-GMTI的二维单音 调制散射波干扰[J].系统工程与电子技术,2020,42 (8):1685-1694.
- [20] 张云鹏,毕大平,房明星,等.对SAR双通道对消的方 位向间歇采样散射波干扰[J].电子学报,2018,46 (12):2832-2839.
- [21] DONG Chunxi, CHANG Xin. A Novel Scattered Wave Deception Jamming Against Three Channel SAR GMTI [J]. IEEE Access, 2018, 6:53882-53889.
- [22] 高冰洁.广域目标检测中SAR 散射波干扰方法研究 [D].合肥:合肥工业大学,2023.

作者简介:

肖 冰 男,博士,工程师,主要研究方向为系统总体 及仿真。

李 根 男,博士,工程师,主要研究方向为制导与控制、雷达信号处理。

粘朋雷 男,博士,工程师,主要研究方向为制导与控制。

22022-22029.

- [21] JOHNSON O V, CHEW X, KHAW K W, et al. ps-CALR: Periodic-Shift Cosine Annealing Learning Rate for Deep Neural Networks [J]. IEEE Access, 2023, 11: 139171 -139186.
- [22] JANSSENS A C J, MARTENS F K. Reflection on Modern Methods: Revisiting the Area Under the ROC Curve [J]. International Journal of Epidemiology, 2020, 49(4): 1397-1403.

作者简介:

李程辉 男,硕士研究生,主要研究方向为雷达信号 处理与深度学习技术。

蒋俊正 男,博士,教授,主要研究方向为图信号处理 理论与雷达信号处理。

周 芳 女,博士,副教授,主要研究方向为图神经网 络与图信号处理。