

合成孔径雷达散射波干扰研究

胡东辉, 吴一戎

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

摘要: 本文针对合成孔径雷达(SAR)的特性, 提出一种全新的有源干扰方式: 散射波干扰. 分析了散射波干扰信号的特点和散射波干扰对 SAR 图像的干扰效果, 从原理上说明了散射波干扰相对于直达波干扰的优势. 分别针对星载 SAR 和机载 SAR 进行了散射波干扰仿真实验, 给出了仿真结果.

关键词: 合成孔径雷达; 散射波干扰; SAR 图像

中图分类号: TN972 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 12-1882-03

The Scatter-Wave Jamming to SAR

HU Dong-hui, WU Yi-rong

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: A new electronic countermeasure method to synthetic aperture radar(SAR), which is called scatter-wave jamming (SWJ), is discussed in this paper. The characteristics of SWJ and its jamming effect on SAR image are analyzed. It shows in principle that this new jamming method can get better jamming effect than classical jamming techniques. Furthermore, the simulations of SWJ to spaceborne SAR and airborne SAR are executed, and results are given.

Key words: synthetic aperture radar; scatter-wave jamming; SAR image

1 引言

随着合成孔径雷达(SAR)技术的不断发展和完善, 它在军事遥感领域正扮演着越来越重要的角色. 因此, 开展针对 SAR 干扰技术的研究是十分必要的.

就目前看, 对 SAR 干扰方法的研究主要限于直达波干扰, 即通过干扰机直接向雷达发射干扰信号来达到对 SAR 的干扰目的^[1-3]. 从干扰效果上, 可将直达波干扰分为两类: 噪声压制干扰、假目标欺骗干扰. 噪声干扰是通过干扰机向雷达直接发射大功率噪声信号的干扰方式. 虚假目标干扰是指干扰机在保持接受到的雷达信号特性的条件下将其再次回发给雷达的干扰方式.

合成孔径雷达属于脉冲相参雷达, 通过对目标回波的相干处理得到具有高分辨、高信噪比的雷达图像. 这给直达波干扰的应用带来一定的局限.

首先, 合成孔径雷达图像的高信噪比特性对直达波噪声干扰的干扰功率提出了很高的要求. 过低的干扰功率难以对图像造成有效的噪声压制, 尤其在具有大量强点目标的情况下更是如此. 其次, 图像的高分辨率特性使得直达波假目标干扰必须逼真地模拟真实目标, 这对直达波干扰是很难实现的. 因此, 有必要寻求新的干扰方法以适应合成孔径雷达干扰的特殊需要. 在此我们提出一种全新的干扰方式: 散射波干扰.

散射波干扰与直达波干扰不同, 它并不直接向雷达发射或转发干扰信号, 而是接收雷达发射的线形调频脉冲并形成

干扰相参脉冲串, 将其投射到需要进行干扰的地区, 经地物散射以后形成地物干扰回波与雷达原始回波信号混合在一起被雷达接收, 从而破坏雷达对地物目标的识别.

2 散射波干扰原理

散射波干扰原理如图 1 所示:

图 1 中, 从 t_1 时刻到 t_2 时刻雷达波束照射到目标, 与一般的 SAR 模式相比, 雷达脉冲从发射到接收过程中的传播路径不再是雷达与目标

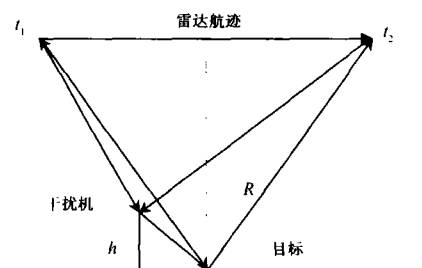


图 1 散射波干扰原理图

之间的双倍程距离, 而是从雷达到干扰机, 再从干扰机转发到目标, 经目标散射后最后被雷达接收所走过的路程. 干扰脉冲传播路径的改变使得干扰回波与匹配滤波器之间存在着多普勒参数失配现象. 假设目标干扰脉冲的传播路径为:

$$r(t) = r_{ij}(t) + r_{\mu} + r_r(t) \quad (1)$$

式(1)中, t 为合成孔径时间, r_{ij} 为雷达与干扰机之间的距离, r_{μ} 为干扰机与目标之间的距离, r_r 为目标与雷达之间的距离, r_{ij} 和 r_r 为:

收稿日期: 2001-09-03; 修回日期: 2002-03-28
基金项目: 国家 863 计划 (No. 2001AA132070)

$$r_{\eta}(t) = \sqrt{R_j^2 + 2R_j v_a \sin\theta_j (t - \Delta t) + v_a^2 (t - \Delta t)^2} \quad (2)$$

$$r_r(t) = \sqrt{R^2 + 2R v_a \sin\theta + v_a^2 t^2} \quad (3)$$

其中, R 为目标与雷达的最近斜距, R_j 为干扰机与雷达的最近斜距, θ 为目标与雷达之间的等效斜视角, θ_j 为干扰机与雷达之间的等效斜视角, v_a 为雷达航向速度, Δt 为干扰机与目标之间的方位时间偏移. R 与 R_j 的关系为

$$R_j = R - \Delta R - h \quad (4)$$

其中, ΔR 为目标相对于干扰机地面投影点的斜距偏移, h 为干扰机的投影高程.

通过上述分析可以得到目标干扰回波多普勒参数 f'_{ν} 、 f'_r 为

$$f'_{\nu}(\Delta R, \Delta t; R) = \frac{f_{\nu}(R) + f_{\nu}(R - \Delta R - h)}{2} - \frac{v_a^2 \Delta t}{\lambda(R - \Delta R - h)} \quad (5)$$

$$f'_r(\Delta R, \Delta t; R) = \frac{f_r(R) + f_r(R - \Delta R - h)}{2} \quad (6)$$

目标散射干扰回波与匹配滤波器之间的多普勒参数失配使其可以对 SAR 图像产生干扰影响, 干扰效果取决于两者之间多普勒参数的失配程度, 有关干扰效果的详细分析见第 3 节.

3 散射波干扰效果分析

干扰回波与匹配滤波器之间存在的多普勒参数失配现象, 使得经处理后的干扰输出存在以下问题:

- (1) 残遗距离迁移曲线
- (2) 方位二次相位误差

由于多普勒参数失配使得干扰回波存在残遗迁移曲线 Δr . 分析表明, Δr 在合成孔径时间内最大跨度 δr 不超过半个距离分辨单元 ρ_r 时, 可忽略残遗迁移曲线对输出的误差影响^[4], 即:

$$\delta r \leq \frac{\rho_r}{2} \quad (7)$$

因多普勒调频率失配产生的方位二次相位误差 $\Delta\Phi$ 使输出结果散焦, 一般认为, 在信号通带边缘时的相位误差小于 $\frac{\pi}{4}$ 时, 可忽略调频率失配对聚焦质量的误差影响^[4], 即:

$$\Delta\Phi\left(\frac{T_s}{2}\right) \leq \frac{\pi}{4} \quad (8)$$

散射干扰中干扰区内不同目标的干扰回波与匹配滤波器之间的多普勒参数失配程度是不一样的. 当它们之间的多普勒参数失配同时满足式(7)和式(8)时, 可以认为干扰目标能得到近似完全的匹配处理. 此时散射干扰对 SAR 图像的干扰影响为虚假图像欺骗干扰. 随着干扰回波与匹配滤波器之间的多普勒参数失配的增大, 干扰目标的输出质量将出现恶化, 当多普勒参数失配达到相当程度时, 这种恶化程度会逐渐明显起来. 此时散射干扰对 SAR 图像的干扰影响为散焦图像压制干扰.

综上所述, 散射干扰对 SAR 图像的干扰影响有以下三种可能

- (1) 虚假图像欺骗干扰
- (2) 虚假图像欺骗干扰 + 散焦图像压制干扰
- (3) 散焦图像压制干扰

实际中要根据不同合成孔径雷达体制对散射干扰对 SAR 图像的干扰影响进行具体的分析.

与残遗距离迁移曲线 Δr 相比, 最大二次相位误差 $\Delta\Phi\left(\frac{T_s}{2}\right)$ 是影响目标成像质量的更为重要的因素, 分析可知:

$$\Delta\Phi \propto \frac{\Delta R_1 + \Delta R_2 + h}{R_{ref}} \quad (9)$$

式中, R_{ref} 为参考点与雷达之间的最短斜距, ΔR_1 为参考点与目标之间的斜距偏移, ΔR_2 为参考点与干扰机地面投影点之间的斜距偏移.

对于星载 SAR, 就干扰区域内所有目标而言, 一般有 $(\Delta R_1 + \Delta R_2 + h) \ll R_{ref}$, $\Delta\Phi\left(\frac{T_s}{2}\right)$ 即使不满足式(8), 干扰输出也不会有过于明显的恶化, 因此散射干扰对星载 SAR 图像的干扰影响基本可视为虚假图像欺骗干扰.

对于机载 SAR, 就干扰区域内所有目标而言, 由于 $\Delta R_1 + \Delta R_2 - h$ 与 R_{ref} 处于可比较的范围, 使得 $\Delta\Phi\left(\frac{T_s}{2}\right)$ 远远超出式(8)的限制, 因此散射干扰对机载 SAR 图像的干扰影响可视为散焦图像压制干扰.

4 仿真实验

在仿真实验中, 从点目标角度分别研究了散射干扰对星载 SAR 图像和机载 SAR 图像的干扰影响. 为简便计, 在实验中将干扰机地面投影点的参数设置为匹配滤波器参数.

(1) 星载 SAR 散射干扰仿真实验

星载 SAR 散射干扰仿真实验中, 雷达系统选用 RADARSAT 精模式, 系统参数如表 1 第 2 栏所示.

表 1 SAR 仿真系统参数表

雷达系统参数	星载 SAR	机载 SAR
雷达波长 λ	0.056m	0.24m
线形调频信号脉宽 τ	42 μ s	33 μ s
距离带宽 B_r	32.32MHz	60MHz
距离调频率 k_r	0.72×10^{12} Hz/s	1.818×10^{12} Hz/s
合成孔径时宽 T_s	0.68s	13.92s
方位带宽 PRF	1257Hz	250Hz
参考中心频率 f_{ref}	-8225.3Hz	0Hz
参考调频率 f_{ref}	-1772.3Hz/s	-12.96Hz/s
干扰地区距离跨度 ΔR	10km	2.5km
干扰机投影高程 h	1km	1km

由表 1 可知, 假设的干扰地区在距离向为 10km, 在方位向为一个合成孔径. 由于干扰区域内不同目标与匹配滤波器之间的多普勒参数失配是不同的, 因此我们选择多普勒参数与匹配滤波器存在最小失配和最大失配两种极端情况的干扰

目标进行仿真实验,由此表明散射干扰对星载 SAR 图像干扰

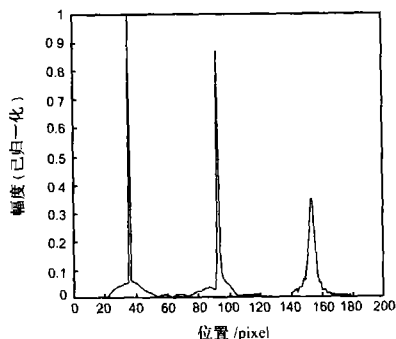


图2 星载 SAR 散射干扰仿真结果

图2中,左边波形为参数完全匹配时的输出结果,中间波形为最小参数失配的干扰输出结果,右边波形为最大参数失配的干扰输出结果.结果表明,对于实验所选的星载 SAR 系统,当干扰目标与匹配滤波器之间的多普勒参数失配最小时,干扰输出基本能得到完全的匹配处理.当干扰目标与匹配滤波器之间的多普勒参数失配最大时,干扰输出质量在方位向出现散焦,但散焦程度相对较低,对于大多数分布地物而言,尚不足以造成明显的质量恶化.因此,虽然在干扰区域中存在着散焦的干扰目标,但从图像整体来看,仍可将散射干扰对星载 SAR 图像的干扰影响归为虚假图像欺骗干扰.

同直达波假目标欺骗干扰相比,虚假图像欺骗干扰的干扰回波中包含了地物散射特性,因此能够形成包括丰富地物信息的干扰图像,欺骗干扰效果明显强于直达波假目标欺骗干扰.

(2) 机载 SAR 散射干扰仿真实验:

在此实验中,构造了一种机载 SAR 仿真系统,系统参数如表1第三栏所示

在机载 SAR 散射干扰仿真实验中,我们同样选择与匹配滤波器存在最小多普勒调频率失配和最大多普勒调频率失配的干扰目标进行处理,以此研究散射干扰对机载 SAR 图像的干扰影响,实验结果如图3所示.

图3中,左边波形为参数完全匹配时的输出结果,中间波形为最小参数失配的干扰输出结果,右边波形为最大参数失配的干扰输出结果.可见,对于实验选用的机载 SAR 系统,即使当干扰目标与匹配滤波器存在最小多普勒调频率失配时,其干扰输出也出现非常严重的散焦,呈现类似噪声或杂波的性质,因此散射干扰对机载 SAR 图像的干扰影响应为散焦图

影响的变化趋势.实验结果如图2所示.

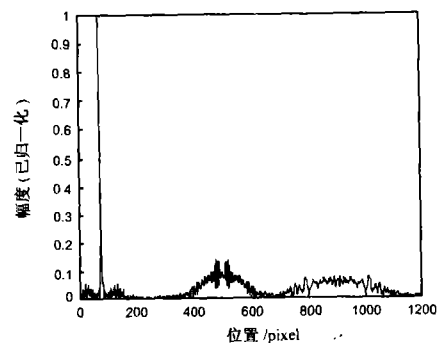


图3 机载 SAR 散射干扰仿真结果

像压制干扰.

同直达波噪声压制干扰相比,由于散焦图像压制干扰中的干扰回波与 SAR 在距离向完全相关,在方位向部分相关,其系统干扰功率增益明显高于直达波噪声压制干扰,在相同的系统干扰输入功率下,压制干扰效果强于噪声干扰.

5 结论

从本质上讲,散射干扰中的干扰信号是保留了信号相干性和地物散射特性的地物回波,是同直达波干扰完全不一样的干扰方式.散射波干扰的特点决定了它同直达波干扰相比有着更高的系统干扰功率增益和更为丰富的干扰信息,干扰综合效果强于直达波干扰.

参考文献:

- [1] Golden. 雷达电子战 [M]. 总参五十四所,译,1992. 73 - 139.
- [2] W W GOJ. 合成孔径雷达与电子战 [R]. 总参五十四所,译,1994. 25 - 43.
- [3] 赵国庆. 雷达对抗原理 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1999. 124 - 157.
- [4] 张澄波. 综合孔径雷达 [M]. 北京:科学出版社,1990. 164 - 169, 345 - 346.

作者简介:

胡东辉 男,1970年2月生于北京,硕士,现为中科院电子所现代信息技术研究室助理研究员,主要研究领域为合成孔径雷达(SAR)信号处理,SAR电子对抗等.

吴一戎 男,1963年7月生于北京,博士,研究员,现为中科院电子所现代信息技术研究室研究员,博士生导师,主要研究领域为合成孔径雷达数据处理技术.