

对 SAR 图像恒虚警检测的多假目标干扰研究

房明星^{*①} 毕大平^① 沈爱国^① 刘 乾^②

^①(电子工程学院 合肥 230037)

^②(国防信息学院 武汉 430000)

摘要: 为有效干扰 SAR 图像 CFAR 检测系统, 该文提出基于间歇采样重复转发的 SAR 多假目标干扰方法, 解决了传统间歇采样直接转发干扰所形成的假目标少、干扰功率利用率低的缺点; 在此基础上, 着重分析了多假目标干扰对 SAR 图像双参数 CFAR 检测性能的影响。研究结果表明多假目标干扰在提高检测门限的同时, 有效降低了双参数 CFAR 的检测性能。最后针对双参数 CFAR 背景窗口特点, 采用多部分布式干扰机建立了 2 维“网状”多假目标干扰应用模型, 有效保证了背景窗口中假目标数量。理论分析和仿真实验验证了该干扰方法的可行性和有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 双参数恒虚警检测; 多假目标; 间歇采样重复转发

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)04-0973-08

DOI: 10.11999/JEIT160633

Jamming Technique of Multiple False Targets Against CFAR Detection in SAR Images

FANG Mingxing^① BI Daping^① SHEN Aiguo^① LIU Qian^②

^①(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

^②(National Defense Information Academy, Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to destroy the detection performance of Constant False Alarm Rate (CFAR) detection system in SAR images, a new multiple false targets method based on intermittent sampling and periodic repeater jamming is proposed. The new method can solve the disadvantages of less false targets and lower jamming power utilization rate from traditional intermittent sampling direct repeater jamming. Then, the jamming performance of multiple false targets against Bi-Parameter CFAR (BP-CFAR) detection in SAR images is analyzed in details. The research result shows that multiple false targets can raise the detection threshold and weaken the detection performance of BP-CFAR. Finally, according to the characteristic of CFAR detection window, the application model of multiple jammers is established. The model can produce 2-D netted multiple false targets, so it can effectively guarantee enough false targets in detection window. Theoretical analysis and computer simulation justify the validity and the efficiency.

Key words: SAR; Bi-Parameter Constant False Alarm Rate (BP-CFAR); Multiple false targets; Intermittent sampling and periodic repeater

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是战略情报侦察和战场监视系统的重要组成部分和关键节点, 在科索沃战争、伊拉克战争等高技术局部战争中发挥了至关重要的作用, 随着 SAR 军事威胁日益严峻, SAR 干扰技术研究已成为电子对抗领域的重要课题^[1,2]。

SAR 是典型的全相参雷达, 可获得很高的 2 维相干处理增益, 传统的噪声压制干扰无法获得相干

处理增益, 干扰效果不尽人意, 因此, SAR 干扰技术研究以相干欺骗干扰为主^[3,4]。当前, SAR 欺骗干扰主要通过数字射频存储技术(Digital Radio Frequency Memory, DRFM)来实现^[5,6], 文献[7]基于 DRFM 全脉冲存储转发方式提出 SAR 移频干扰方法, 可对 SAR 形成逼真的虚假目标干扰, 但干扰的实时性较差, 且只能形成单个虚假目标; 针对全脉冲存储转发的缺点, 文献[8]基于 DRFM 技术和干扰机收发分时体制提出 SAR 间歇采样直接转发干扰, 解决了干扰机收发隔离难题, 可在 SAR 距离向产生一定数量的假目标, 由于在间歇期只对采样信号进行了一次转发, 干扰功率的利用率较低, 且所形成的假目标数量较少; 在此基础上, 文献[9]进一步提

收稿日期: 2016-06-15; 改回日期: 2016-11-02; 网络出版: 2016-12-02

*通信作者: 房明星 mingxingfang89@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61171170)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61171170)

出 SAR 2 维间歇采样转发干扰, 可同时在 SAR 距离向和方位向形成 2 维“网状”的多个假目标, 但由于假目标数量增加, 各假目标功率急剧下降。与此同时, 现有的 SAR 干扰技术主要侧重于对其成像系统的干扰效果分析, 而对后续 SAR 图像检测系统的干扰效果研究相对较少, 实际上, SAR 干扰效果不仅体现在成像结果上, 更加体现在对 SAR 图像检测系统的影响, 文献[10,11]分析了噪声压制干扰对 SAR 图像恒虚警(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测的影响, 但仅停留在对 SAR 噪声压制干扰效果进行评估, 未对其干扰机理进行深入研究。目前, 对 SAR 图像 CFAR 检测系统的多假目标干扰技术研究鲜有报道。

基于上述背景, 本文提出了 SAR 间歇采样重复转发多假目标干扰方法, 深入研究了多假目标干扰对 SAR 图像双参数 CFAR 检测性能的影响, 并建立了 2 维“网状”多假目标干扰应用模型, 对于完善 SAR 干扰理论体系具有一定借鉴意义。

2 SAR 间歇采样重复转发干扰模型

2.1 SAR 距离向间歇采样直接转发干扰

SAR 距离向间歇采样信号 $p(t_r)$ 是关于快时间的矩形包络脉冲串, 其表达式为

$$p(t_r) = \text{rect}\left(\frac{t_r}{T_w}\right) \otimes \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t_r - nT_s) \quad (1)$$

其中, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数, t_r 为距离向快时间, T_w 为采样脉冲宽度, $\delta(\cdot)$ 为冲激函数, T_s 为采样周期。

设 SAR 发射线性调频信号为

$$s(t_r, t_a) = \text{rect}\left(\frac{t_r}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + u_r t_r^2/2\right)\right] \quad (2)$$

其中, t_a 为方位向慢时间, 全时间 $t = t_r + t_a$, T_p 为脉冲宽度, f_0 为载频, u_r 为调频斜率。

则 SAR 接收到干扰机所在分辨单元的基频回波信号为

$$s_r(t_r, t_a) = \text{rect}\left(\frac{t_r - \tau_r}{T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{t_a}{T_L}\right) \cdot \exp\left[j\pi u_r (t_r - \tau_r)^2\right] \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} R_j(t_a)\right] \quad (3)$$

其中, $R_j(t_a)$ 为 SAR 平台到干扰机的瞬时斜距, $\tau_r = 2R_j(t_a)/c$ 为回波传播时延, T_L 为合成孔径时间。忽略干扰机转发延时, 则 SAR 接收到的间歇采样干扰信号为

$$s_{jr}(t_r, t_a) = s_r(t_r, t_a) \cdot p(t_r) \quad (4)$$

从而可得目标和干扰信号的 2 维匹配滤波输出包络为

$$\left. \begin{aligned} y(t_r, t_a) &= \left(1 - \frac{|t_r^*|}{T_p}\right) \cdot \left(1 - \frac{|t_a|}{T_L}\right) \cdot \text{sinc}\left[\pi u_r t_r^* (T_p - |t_r^*|)\right] \\ &\quad \cdot \text{sinc}\left[\pi u_a t_a (T_L - |t_a|)\right] \\ y_j(t_r, t_a) &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \left(1 - \frac{|t_r^*|}{T_p}\right) \cdot \left(1 - \frac{|t_a|}{T_L}\right) \\ &\quad \cdot \text{sinc}\left[\pi u_r \left(t_r^* + \frac{nf_s}{u_r}\right) (T_p - |t_r^*|)\right] \\ &\quad \cdot \text{sinc}\left[\pi u_a t_a (T_L - |t_a|)\right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中, t_r^* 是对 $t_r - \tau_r$ 经过距离徙动校正后与方位向慢时间无关的回波到达时间, 幅度加权系数 $a_n = D \text{sinc}(nD)$ (D 为占空比), 则由式(5)可知, 间歇采样直接转发干扰可在 SAR 距离向产生多个假目标, 其中包括 1 个主假目标和多个次假目标, 各假目标间距 $\Delta R = cf_s/2u_r$ (c 为光速), 幅度与 a_n 成正比^[8]。

2.2 SAR 间歇采样重复转发干扰

距离向间歇采样直接转发干扰可在 SAR 距离向产生多假目标干扰效果, 但由于在采样间歇期只进行一次转发, 干扰功率利用率低, 只能形成 3~5 个幅度较大的有效干扰目标, 因此为提高干扰功率利用率, 增加有效干扰目标数量, 提出 SAR 间歇采样重复转发干扰, 其干扰过程如图 1 所示^[12]。

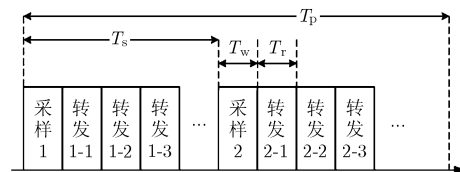


图 1 SAR 间歇采样重复转发干扰示意图

图 1 中“采样”编码表示转发的干扰信号是第几段采样信号,“转发”编码表示该采样信号被第几次转发, 如 1-3 表示第 1 段采样信号被第 3 次转发。为便于分析且不失一般性, 假设图 1 中 SAR 信号脉宽 T_p 为间歇采样周期 T_s 的整数倍, T_s 为采样脉宽 T_w 的整数倍。 T_r 为转发脉冲的宽度且 $T_r \leq T_w$, 当一个采样周期内所有转发脉冲的宽度 $T_r = T_w$ 时, 为间歇采样均匀重复转发干扰, 否则为间歇采样非均匀重复转发干扰^[13]。首先分析间歇采样均匀重复转发干扰对 SAR 的干扰效果, SAR 间歇采样均匀重复转发干扰的单次转发为 SAR 间歇采样直接转发干扰, 则由式(5)可知第 1 次转发的干扰输出为 $y_j(t_r, t_a)$; 第 2 次转发等效于第 1 次延时 T_w 后的重复转发, 相应的干扰输出为 $y_j(t_r - T_w, t_a)$, 假设在一个间歇采样周期内重复转发的最大次数为 $K = T_s/T_w$

$$\begin{aligned}
& -1, \text{ 则 SAR 间歇采样均匀重复转发干扰的输出为} \\
& y_j(t_r, t_a) + y_j(t_r - T_w, t_a) + y_j(t_r - 2T_w, t_a) + \dots \\
& \quad + y_j(t_r - (K-1)T_w, t_a) \\
& = \sum_{k=1}^K y_j(t_r - (k-1)T_w, t_a) \quad (6)
\end{aligned}$$

由式(6)可知, SAR 间歇采样均匀重复转发干扰效果是间歇采样直接转发干扰经过 K 次延迟后的叠加, 将在 SAR 距离向产生 K 个主假目标和多组次假目标, 具体的假目标干扰效果与转发时间间隔 T_w 、假目标间距 $\Delta R = c f_s / 2u_r$ 以及假目标时宽 $1/B$ (B 为信号带宽) 等有关。当 $T_w \geq 2/B$ 时(通常情况下都满足), K 个主假目标相互独立、互不混叠, 否则各主假目标相互混叠, 将在 SAR 距离向形成长度为 $(K-1)T_w c / 2$ 的分布式干扰, 且各组次假目标也相互混叠。如果在 $T_w \geq 2/B$ 的同时, 满足条件 $(K-1)T_w c / 2 < \Delta R$, 则主假目标和次假目标均相互独立, 将在 SAR 距离向形成 $3K \sim 5K$ 个有效假目标, 此时对不等式条件进行化简可得

$$\left. \begin{aligned} T_w &\geq 2/B \\ T_s &< T_w + \sqrt{T_w^2 + T_p/B} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

假设 SAR 信号 $T_p = 20 \mu\text{s}$, $B = 100 \text{ MHz}$, 若间歇采样脉宽 $T_w = 0.1 \mu\text{s}$, 为满足式(7)可得间歇采样周期 $T_s < 0.1 + \sqrt{0.01 + 0.2} \approx 0.56$, 选取 $T_s = 0.5 \mu\text{s}$, 此时间歇采样重复转发次数 $K = 4$, 将在 SAR 距离向产生 4 个主假目标, 并在主假目标两侧形成多个互不混叠的次假目标群, 假目标数量大幅增加。当间歇采样周期不满足式(7)时, 各主假目标将和次假目标群混叠在一起, 各阶次假目标群也相互混叠, 导致假目标幅度出现明显起伏变化, 且当单次转发产生的距离延迟 $T_w c / 2$ 为假目标间距 ΔR 的整数倍时, 主假目标将与各阶次假目标完全重叠, 各阶假目标幅度得到增强, 但假目标数量相对减少(与间歇采样直接转发干扰相同)。

对于 SAR 间歇采样非均匀重复转发干扰而言, 此时转发脉冲宽度 $T_r < T_w$, 即非均匀重复转发干扰只转发采样脉冲的一部分, 设 T_{rk} 表示第 k 次转发脉冲的宽度, 则第 k 次转发的干扰输出为 $(T_{rk} / T_w) y_j(t_r - (k-1)T_w, t_a)$, 从而可得 K 次转发的干扰输出为

$$\begin{aligned}
& \frac{T_{r1}}{T_w} y_j(t_r, t_a) + \frac{T_{r2}}{T_w} y_j(t_r - T_w, t_a) \\
& \quad + \frac{T_{r3}}{T_w} y_j(t_r - 2T_w, t_a) + \dots \\
& \quad + \frac{T_{rK}}{T_w} y_j(t_r - (K-1)T_w, t_a) \\
& = \sum_{k=1}^K \frac{T_{rk}}{T_w} y_j(t_r - (k-1)T_w, t_a) \quad (8)
\end{aligned}$$

对比式(6), 式(8)可知, 两种转发干扰的输出形式基本一致, 但 SAR 间歇采样非均匀重复转发干扰的假目标幅度受 T_{rk} / T_w 的调制。

3 SAR 图像 CFAR 检测的多假目标干扰效果分析

3.1 SAR 图像双参数 CFAR 检测原理

当前, 双参数 CFAR 检测算法以其实现简单、快速高效、鲁棒性强等优点, 在 SAR 图像检测领域得到了广泛应用^[14], 其检测窗口主要由目标窗口、保护窗口、背景窗口构成(参见图 2), 其中保护窗口可防止目标功率泄露到背景窗口中, 背景窗口用于统计杂波背景的均值 $\hat{\mu}_c$ 和方差 $\hat{\sigma}_c$, 3 个窗口以一定步长在 SAR 图像中滑动并按照双参数 CFAR 检测准则对测试单元 x_t 进行检测。

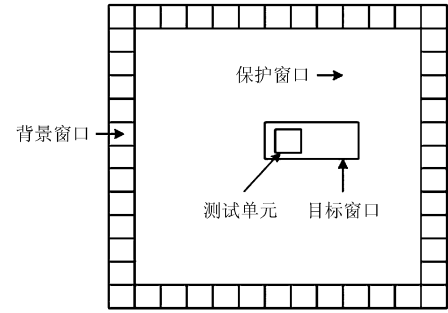


图 2 双参数 CFAR 检测窗口设置

假设检测阈值为 Th , 则双参数 CFAR 检测准则可表示为

$$\left. \begin{aligned} (x_t - \hat{\mu}_c) / \hat{\sigma}_c &\geq \text{Th}, H_0: \text{目标} \\ (x_t - \hat{\mu}_c) / \hat{\sigma}_c &< \text{Th}, H_1: \text{杂波} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 $\hat{\mu}_c = \frac{1}{N_c} \sum_{i,j \in \Theta} x(i, j)$, $\hat{\sigma}_c = \sqrt{\frac{1}{N_c} \sum_{i,j \in \Theta} (x(i, j) - \hat{\mu}_c)^2}$,

$x(i, j)$ 为位置 (i, j) 处的参考单元值, Θ 表示背景窗口区域, N_c 为 Θ 中参考单元数目。从表达式上看, 双参数 CFAR 检测的实质是将 Gauss 分布 $N(\hat{\mu}_c, \hat{\sigma}_c)$ 标准化为 $N(0, 1)$ 分布, 假设期望的虚警概率为 P_{fa} , $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布 $N(0, 1)$ 的概率分布函数, 此时可得检测阈值 $\text{Th} = \Phi^{-1}(1 - P_{fa})$, 若令待检测目标功率为 P_t , 信杂比 $\text{SCR} = P_t / \hat{\sigma}_c^2$, 为便于分析且不失一般性, 假设目标服从 Swerling V 模型(非起伏目标), 则目标的检测概率为^[11, 15]

$$\begin{aligned} P_d &= 1 - \Phi(\text{Th} - \sqrt{\text{SCR}}) \\ &= 1 - \Phi(\Phi^{-1}(1 - P_{fa}) - \sqrt{\text{SCR}}) \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可知, 检测概率与目标信杂比和检测阈值有关, 因而当对 SAR 进行多假目标干扰时, 背

景窗口中杂波功率变大, 将导致检测阈值增大, 从而降低目标的检测概率。

3.2 多假目标干扰对双参数 CFAR 检测的影响

首先分析背景窗口中存在单个假目标时对双参数 CFAR 检测性能的影响, 设假目标功率为 P_j , 并忽略其起伏特性, 此时可认为 $\hat{\sigma}_c$ 保持不变, $\hat{\mu}_c =$

$$\frac{1}{N_c} \left(\sum_{i,j \in \Theta} x(i,j) + \sqrt{P_j} \right), \text{ 则式(9)的检测准则变为}$$

$$\left. \begin{aligned} (x_i - \hat{\mu}_c) / \hat{\sigma}_c &\geq \text{Th} + \sqrt{P_j} / (N_c \hat{\sigma}_c), H_0: \text{目标} \\ (x_i - \hat{\mu}_c) / \hat{\sigma}_c &< \text{Th} + \sqrt{P_j} / (N_c \hat{\sigma}_c), H_1: \text{杂波} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由式(11)可知, 双参数 CFAR 的检测阈值和检测门限被抬高, 令 $\text{Th}' = \text{Th} + \sqrt{P_j} / (N_c \hat{\sigma}_c)$ 为假目标干扰时的检测阈值, 则虚警概率和检测概率分别为

$$\left. \begin{aligned} P'_{fa} &= 1 - \Phi(\text{Th}') \\ P'_d &= 1 - \Phi(\text{Th}' - \sqrt{\text{SCR}}) \\ &= 1 - \Phi(\Phi^{-1}(1 - P'_{fa}) - \sqrt{\text{SCR}}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

可见假目标干扰在提高检测门限的同时, 使得 CFAR 检测概率降低。假设 P_{d0} 为雷达检测到目标所需的最小检测概率(通常 $P_{d0} = 0.1$), 当 $0 \leq P'_d \leq P_{d0}$ 时可认为对目标实现了有效干扰, 则由式(12)可得单个假目标功率需满足条件为

$$\sqrt{P_j} \geq N_c \hat{\sigma}_c (\Phi^{-1}(1 - P_{d0}) + \sqrt{\text{SCR}} - \text{Th}) \quad (13)$$

当双参数 CFAR 背景窗口中有 M 个假目标时, 令 P_{jm} 为第 m 个假目标的干扰功率, 若使雷达无法有效检测到真实目标, 由式(13)可得 M 个假目标功率需满足条件为

$$\sqrt{\sum_{m=1}^M P_{jm}} \geq N_c \hat{\sigma}_c (\Phi^{-1}(1 - P_{d0}) + \sqrt{\text{SCR}} - \text{Th}) \quad (14)$$

令干杂比 $\text{JCR} = \sum_{m=1}^M P_{jm} / \hat{\sigma}_c^2$, 则式(14)变为

$$\text{JCR} \geq N_c^2 (\Phi^{-1}(1 - P_{d0}) + \sqrt{\text{SCR}} - \text{Th})^2 \quad (15)$$

由式(15)可知, 当背景窗中有多个假目标时, 将对 CFAR 检测系统形成累加的干扰效果, 由于 SAR 间歇采样重复转发干扰方法具有假目标数量多、干扰功率利用率高的优点, 因而比传统假目标干扰方法更容易满足式(15), 对双参数 CFAR 检测系统的干扰效果也更好。

3.3 对双参数 CFAR 检测的多假目标干扰应用模型

多假目标干扰可有效降低 SAR 图像双参数 CFAR 检测的性能, 但前提条件是有足够多的假目标处于图 2 的背景窗口中, 因此, 本文通过多部干扰机合理布阵产生 2 维“网状”假目标群, 其分布模型如图 3 所示。

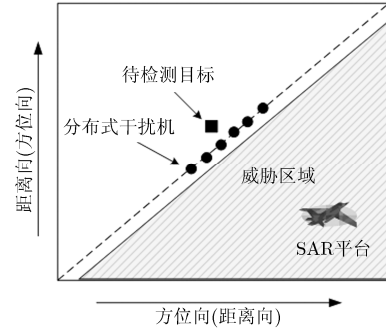


图 3 干扰机分布模型

图 3 中, 多部小型分布式干扰机在防护区域前方沿斜对角线方向进行布阵, 各干扰机协同工作, 此时无论 SAR 平台航向如何, 多部干扰机采用间歇采样重复转发干扰均能够对 SAR 产生 2 维“网状”多假目标。同时, 为保证假目标尽可能多地落入图 2 背景窗口中(至少 4 个假目标), 干扰机分布间距应小于背景窗口方位向边长的一半, 每部干扰机所形成的假目标间距应小于背景窗口距离向边长的一半。实际干扰中, 干扰机分布间距以及干扰信号参数应依据 SAR 分辨率、背景窗口尺寸、干扰需求等因素共同确定, 当 SAR 分辨率较高、背景窗口尺寸较小时, 将对干扰机数量、干扰功率、情报侦察等提出较高要求, 此时应充分利用干扰资源进行密集布阵。

4 仿真实验分析

SAR 系统仿真参数如表 1 所示, 成像场景距离向范围为 [9800 m, 10200 m], 方位向范围为 [-200 m, 200 m], 场景中心坐标为 [10000 m, 0 m] (斜距-方位坐标)。间歇采样均匀重复转发和非均匀重复转发的干扰输出形式一致, 且前者干扰功率利用率更高, 因此主要对 SAR 间歇采样均匀重复转发干扰进行如下仿真分析。

仿真 1 干扰效果对比分析 将本文方法与间歇采样直接转发干扰进行对比分析, 假设单部干扰机位于场景中心, 干信比 $\text{JSR} = 5$ dB, 间歇采样周期 $T_s = 0.5 \mu\text{s}$, 占空比 $D = 0.25$ 。由图 4 可知, 间歇采样直接转发干扰可在 SAR 距离向产生 3~5 个幅度较大的有效假目标, 假目标分布比较分散, 各阶假目标间距为 60 m, 幅度受加权系数 a_n 调制。由图 5

表 1 仿真实验参数

信号载频(GHz)	10	多普勒带宽(Hz)	400
信号脉宽(μs)	20	合成孔径长度(m)	300
信号带宽(MHz)	100	载机速度(m/s)	200
脉冲重复频率(Hz)	480	平台高度(m)	6000

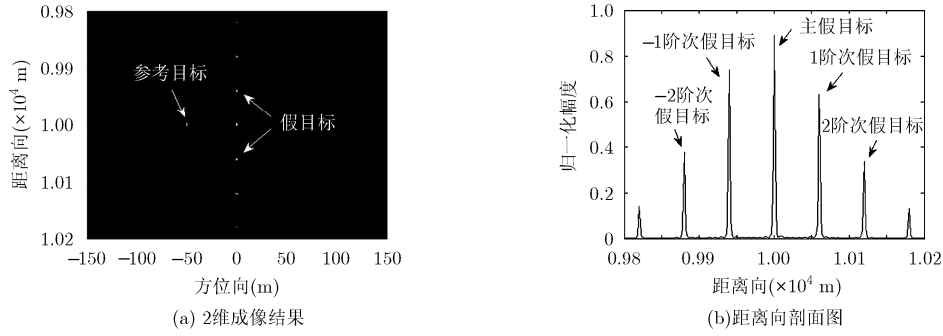


图4 SAR 间歇采样直接转发干扰效果

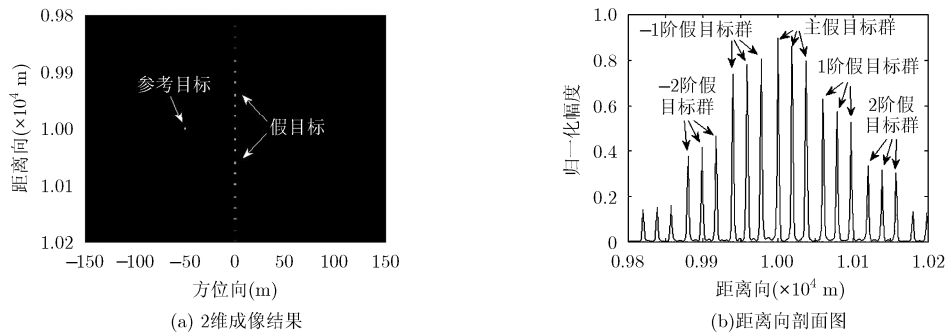


图5 SAR 间歇采样重复转发干扰效果

可以看出，间歇采样重复转发干扰可在 SAR 距离向产生密集的假目标干扰效果，此时满足式(7)假目标相互独立的条件，最大重复转发次数为 3，因此共可形成 1 个主假目标群和多个次假目标群，每个假目标群包含 3 个同阶假目标，各假目标间距为 18.75 m，相邻假目标群的间距为 22.5 m。可见，SAR 间歇采样重复转发干扰是间歇采样直接转发干扰经过多次延迟后的叠加，所产生的假目标大幅增多，假目标分布更加密集。

仿真 2 干扰参数影响分析 根据式(7)，对不同参数时 SAR 间歇采样重复转发干扰效果进行对比分析，图 6 为相应的干扰仿真结果。其中，图 6(a)和图 6(b)满足式(7)假目标相互独立条件，图 6(a)中同阶假目标间距为 15 m，相邻假目标群的间距为 45 m，对比图 5(b)可知，在占空比相同时，间歇采样周期越小转发脉冲的时长越小，导致同阶假目标间距变小，相邻假目标群间距变大；图 6(b)中同阶假目标间距为 15 m，相邻假目标群的间距为 15 m，每个假目标群包含 4 个同阶假目标，对比图 5(b)可知，间歇采样周期相同时，占空比越小转发脉冲的时长越小，导致同阶假目标间距变小，同时由于转发次数增加，假目标数量增多，分布也更加密集，假目标群间距相应变小，但占空比的减小将导致假目标幅度降低。

图 6(c)中 T_s 不满足式(7)假目标相互独立条件，

转发脉冲时长所产生的距离延迟为 37.5 m，而间歇采样直接转发干扰时假目标间距为 30 m，主假目标群将与次假目标群混叠在一起，各阶次假目标群也相互混叠，导致假目标幅度出现明显的起伏变化，将产生分布式干扰效果。图 6(c)中 T_s 不满足式(7)假目标相互独立条件，但转发脉冲时长产生的距离延迟为 30 m，同时间歇采样直接转发干扰时假目标间距也为 30 m，此时主假目标将与各阶次假目标相互重叠，与 SAR 间歇采样直接转发干扰假目标分布相同，但各阶假目标幅度得到增强。以上仿真结果均与理论分析一致，验证了本文干扰方法的正确性和有效性。

仿真 3 对双参数 CFAR 检测的多假目标干扰应用分析 无干扰时 SAR 成像场景如图 7(a)所示，场景中设置 9 个强散射点目标(如装甲车、坦克等)作为待检测对象，信杂比为 20 dB，设恒虚警概率 $P_{fa} = 10^{-5}$ ，依据检测目标尺寸选取背景窗口边长为 10 个像素。采用双参数 CFAR 对图 7(a)进行检测，由图 7(b)检测结果可以看出，9 个强散射点目标被全部检测出来，同时检测出 3 个虚警目标，定义检测概率为正确检测出的目标个数与真实目标总数的比值，则此时检测概率为 100%，从而验证了双参数 CFAR 良好的检测性能。

采用图 3 的干扰应用模型分析多假目标对 SAR 双参数 CFAR 检测性能的影响，为简化模型，假设

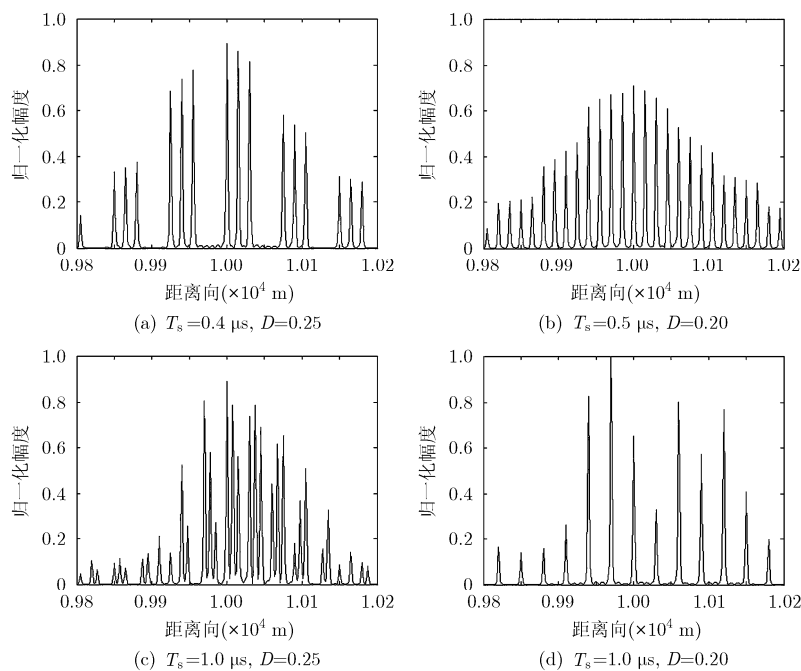


图 6 不同参数时 SAR 间歇采样重复转发干扰效果

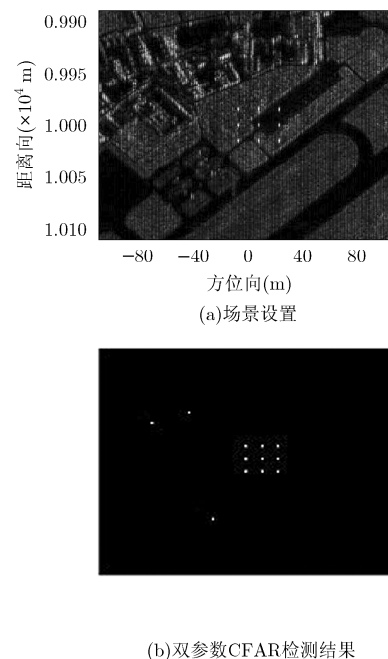


图 7 无干扰时 SAR 图像双参数 CFAR 检测结果

SAR 平台沿方位向直线飞行, 为产生 2 维“网状”假目标群, 在真实目标前线沿方位向等间隔部署 5 部干扰机, 依据背景窗口尺寸设置干扰机间距为 15 m, 5 部干扰机均采用图 5(b)的干扰参数同时向 SAR 平台实施间歇采样重复转发干扰, 可保证每个待检测真实目标的背景窗中至少包含 4 个假目标。若使双参数 CFAR 无法对目标进行有效检测, 由式(15)可得每部干扰机所需干信比 $JSR = 10.8$ dB, 干扰成像场景如图 8(a)所示, 可见采用本文的干扰应用模型可对 SAR 成像系统产生 2 维“网状”假目标群。对图 8(a)的干扰成像场景进行双参数 CFAR 检测, 从图 8(b)检测结果可以看出, 在多假目标干扰情况下 CFAR 系统共检测出一个真实目标和 27 个虚警目标, 真实目标的检测概率为 0.11, 与式(15)的理论分析基本一致, 需要指出的是, 图片下方虚警目标较多是由于背景杂波强度较小、检测门限较低造成的。

进一步验证不同干信比时多假目标对双参数 CFAR 检测的影响, 图 8(c)为干信比 6.0 dB 时的 CFAR 检测结果, 共检测出 4 个真实目标和 13 个虚警目标, 检测概率为 0.44, 对比图 8(b)可知, 由于干信比不满足式(15)的条件, 导致 SAR 系统的检测概率上升, 虚警目标数量下降, 未能达到预期的干扰效果; 图 8(d)为干信比 16.0 dB 时的 CFAR 检测结果, 此时共检测出 0 个真实目标和 47 个虚警目标, 检测概率为 0, 对比图 8(b)可知, 随着干信比增大, SAR 检测系统的检测概率进一步下降, 虚警目标数

量大幅增加, 干扰效果也更好。

干扰参数保持不变, 对不同干信比条件下本文方法与传统间歇采样直接转发干扰的检测性能进行比较分析, 图 9 为 100 次 Monte Carlo 实验后得到检测性能统计曲线。由图 9(a)可知, 由于本文方法干扰功率利用率更高、所形成的假目标数量更多, 在相同干信比时本文方法经过 CFAR 检测后产生了更多虚警目标, 随着干信比增大, 两种方法的虚警目标数量都随之增多, 但本文方法具有更快的增长速度, 当干信比大于 16 dB 时, 假目标数量增长缓慢, 逼近虚警数量最大值; 由图 9(b)可知, 在相同干信比条件下, 本文方法具有更低的真实目标检测概率, 且随着干信比增大检测概率快速降低, 当干信比大于 12 dB 时检测概率降低至 0.1, 对于间歇采样直接转发干扰而言, 由于干扰功率利用率低、假目标数量少, CFAR 检测时背景窗口中假目标数量和干扰功率无法满足式(15)条件, 导致检测概率随干信比下降缓慢, 并维持在较高的检测概率。

5 结束语

SAR 干扰技术研究是电子对抗领域的热点问题, 本文对 SAR 图像双参数 CFAR 检测系统的多假目标干扰技术进行了研究, 提出了基于间歇采样重复转发的 SAR 多假目标干扰方法, 理论推导了假目标干扰与双参数 CFAR 检测性能的关系, 证明了多假目标干扰在提高检测门限的同时, 可有效降低双参数 CFAR 的检测性能, 并依据双参数 CFAR 背

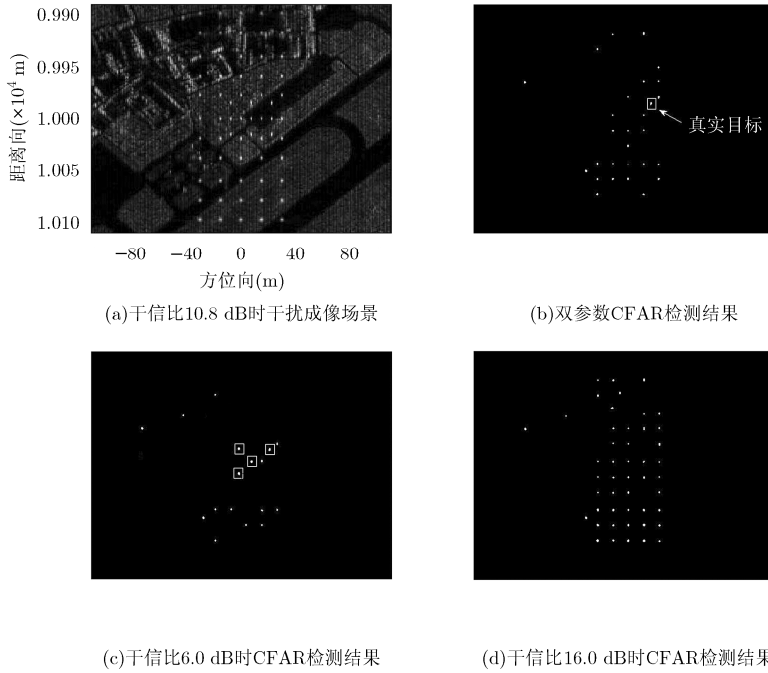


图 8 不同干信比时双参数 CFAR 检测结果

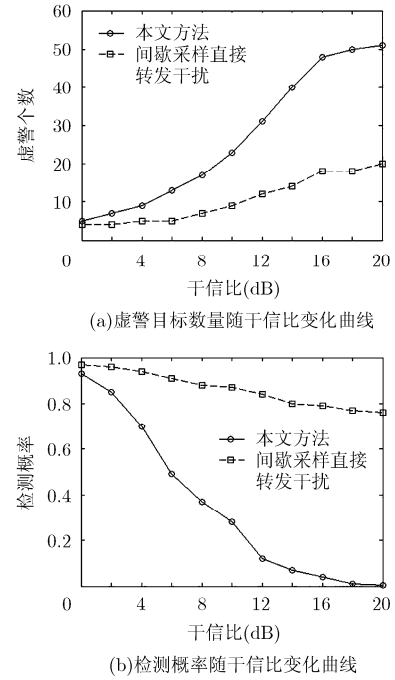


图 9 不同干信比时双参数 CFAR 检测性能

景窗口特点，通过多部分布式干扰机的合理布阵，对 SAR 实现了 2 维“网状”假目标干扰。本文干扰方法采用 DRFM 技术，实现简单、功率利用率高，与传统间歇采样直接转发干扰相比，并不会增加硬件的复杂度，只需对软件代码进行相应修改，具有较强的工程应用价值，可同时对 SAR 成像系统和恒虚警检测系统进行有效干扰，为 SAR 干扰技术研究提供了有效途径。

参考文献

[1] 黄龙, 董春曦, 赵国庆. 利用多干扰机对抗 SAR 双通道干扰对消技术的研究[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(4): 903-907. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00887.
HUANG Long, DONG Chunxi, and ZHAO Guoqing. Investigation on countermeasure against SAR dual-channel cancellation technique with multi-jammers[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(4): 903-907. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00887.

[2] 贾鑫, 叶伟, 吴彦鸿, 等. 合成孔径雷达对抗技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 13-17.
JIA Xin, YE Wei, WU Yanhong, et al. *Electronic Countermeasure Technology to Synthetic Aperture Radar*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 13-17.

[3] HUANG Long, DONG Chunxi, SHEN Zhibo, et al. The influence of rebound jamming on SAR/GMTI[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(2): 399-403. doi: 10.1109/LGRS.2014.2345091.

[4] ZHOU Feng, ZHAO Bo, TAO Mingliang, et al. A large scene deceptive jamming method for space-borne SAR[J]. *IEEE*

Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(8): 4486-4489. doi: 10.1109/TGRS.2013.2259178.

[5] 李传中, 苏卫民, 顾红, 等. 改进的合成孔径雷达间歇采样转发干扰[J]. 电波科学学报, 2014, 29(6): 1045-1050. doi: 10.13443/j.cjors.2013120501.
LI Chuazhong, SU Weimin, GU Hong, et al. Improved interrupted sampling repeater jamming for synthetic aperture radar[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(6): 1045-1050. doi: 10.13443/j.cjors.2013120501.

[6] 张静克, 代大海, 邢世其, 等. 对调频斜率极性捷变 SAR 间歇采样转发干扰效果分析[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(5): 1030-1034. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2015.05.08.
ZHANG Jingke, DAI Dahai, XING Shiqi, et al. Analysis of jamming effect on intermittent sampling repeater jamming to CRPJ-SAR[J]. *System Engineering and Electronics*, 2015, 37(5): 1030-1034. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2015.05.08.

[7] 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 Hongxu, HUANG Zhitao, and ZHOU Yiyu. A study on the shift-frequency jamming to SAR[J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(3): 463-468.

[8] 吴晓芳, 王雪松, 卢焕章. 对 SAR 的间歇采样转发干扰研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 2043-2048. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.05.05.
WU Xiaofang, WANG Xuesong, and LU Huanzhang. Study of intermittent sampling repeater jamming to SAR[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(5): 2043-2048. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.05.05.

[9] 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. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2015.03.14.
- CAI Xingfu, SONG Jianshe, ZHENG Yongan, *et al.* SAR jamming technology based on 2-D intermittent sampling delay repeater and its application[J]. *System Engineering and Electronics*, 2015, 37(3): 566-571. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2015.03.14.
- [10] 许俊, 陈根忠, 王迪. 基于 CFAR 检测的 SAR 噪声干扰效果评估方法[J]. 航天电子对抗, 2007, 23(4): 21-24.
- XU Jun, CHENG Genzhong, and WANG Di. Noise jamming effect evaluation of SAR through CFAR detection[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2007, 23(4): 21-24.
- [11] 李江源, 王建国, 杨建宇. 基于图像域检测的 SAR 杂波干扰评估[J]. 电波科学学报, 2007, 22(3): 430-435.
- LI Jiangyuan, WANG Jianguo, and YANG Jianyu. Performance evaluation of clutter jamming method based on detection of SAR images[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007, 22(3): 430-435.
- [12] 刘忠, 王雪松, 刘建成, 等. 基于数字射频存储器的间歇采样重复转发干扰[J]. 兵工学报, 2008, 29(4): 405-410.
- LIU Zhong, WANG Xuesong, LIU Jiancheng, *et al.* Jamming technique of interrupted-sampling and periodic repeater based on digital radio frequency memory[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(4): 405-410.
- [13] 张养瑞, 李云杰, 李曼玲, 等. 间歇采样非均匀重复转发实现多假目标压制干扰[J]. 电子学报, 2016, 44(1): 46-53. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.01.008.
- ZHANG Yangrui, LI Yunjie, LI Manling, *et al.* Suppress jamming technique of multiple false targets on interrupted-sampling and non-uniform periodic repeater[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(1): 46-53. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.01.008.
- [14] 艾加秋, 齐向阳, 禹卫东. 改进的 SAR 图像双参数 CFAR 舰船检测算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(12): 2881-2885.
- AI Jiaqiu, QI Xiangyang, and Yu Weidong. Improved two parameter CFAR ship detection algorithm in SAR images[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(12): 2881-2885.
- [15] 孟华东, 王希勤, 王秀坛, 等. 与初始噪声分布无关的恒虚警处理器[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(7): 51-53.
- MENG Huadong, WANG Xiqin, WANG Xiutan, *et al.* CFAR processor independent of original noise distribution[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2001, 41(7): 51-53.
- 房明星: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 信号处理及 SAR 对抗理论.
- 毕大平: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电子对抗侦察和干扰新技术.
- 沈爱国: 男, 1975 年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理、雷达干扰与抗干扰技术.
- 刘 乾: 男, 1989 年生, 讲师, 研究方向为军事信息学.