

双基地合成孔径雷达弹射式干扰研究

张 瑛 王建国

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 该文针对双基地 SAR 不同于常规 SAR 的工作方式,对双基地 SAR 弹射式干扰进行了研究,表明弹射式干扰可以有效地应用于双基地 SAR 的对抗。文中给出了双基地 SAR 弹射式干扰的信号模型,分析了固定转发时延弹射式干扰的原理和干扰效果,并研究了不散焦保护区与雷达参数的关系。计算机仿真验证了理论分析的正确性。

关键词: 双基地 SAR; 弹射式干扰; 不散焦保护区

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)05-1061-04

Research on Rebound Jamming Against BiSAR

Zhang Ying Wang Jian-guo

(College of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract: Because of different working ways between BiSAR and SAR, this paper analyzes the feasibility of rebound jamming against BiSAR and the effective of the jamming is proved. The model of rebound jamming against BiSAR is given. The jamming principle and effect are described. As for Normal Rebound Jamming (NRJ), the paper analyzes the focus protection area. Theoretic analysis is verified via computer simulations.

Key words: BiSAR; Rebound jamming; Focus protection area

1 引言

合成孔径雷达(SAR)利用载体的运动实现孔径综合,获得被观测地域的高分辨力雷达图像。常规SAR的发射机和接收机安装在同一个平台上,而双基地SAR的发射机和接收机安装在不同的平台上,可以有不同的空间位置和运动速度,工作时不限于接受地物目标的后向散射信号,其工作原理、成像方式和图像特点与常规SAR不同^[1]。

双基地SAR发射机可以在离战区较远或者相对比较安全的区域工作,而接收机只接受信号,处于“静默”工作状态,比较隐蔽,因此也比较安全。由于无法实现接收机的定位,适用于常规SAR的压制式和欺骗式干扰很难有效地对双基地SAR进行干扰。本文是将弹射式干扰^[2, 3]应用于双基地SAR,建立了双基地SAR弹射式干扰模型,分析了干扰参数对双基地SAR弹射式干扰效果的影响,从理论分析和仿真实验的角度说明弹射式干扰对于双基地SAR而言也是一种有效的干扰方式。

2 双基地合成孔径雷达弹射式干扰模型

双基地 SAR 弹射式干扰原理如图 1 所示。

干扰机截获雷达发射信号,经时延和适当的相位调制,放大转发至雷达波束照射的场景,经场景反射后被接收机接收。

设雷达发射机发射线性调频信号:

$$s(\tau) = a(\tau) \cdot \exp(j\pi\gamma\tau^2) \cdot \exp(j2\pi f_0\tau) \quad (1)$$

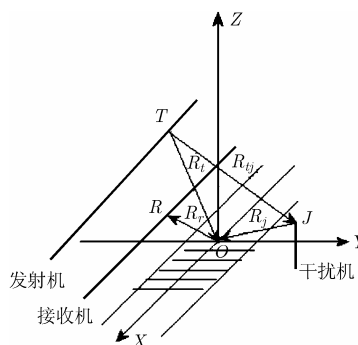


图 1 双基地 SAR 弹射式干扰原理图
雷达回波混频后输出的基带信号为

$$s_{rb}(\tau, t) = \sigma_t a(\tau - R(t)/c) \cdot \exp[j\pi\gamma(\tau - R(t)/c)^2] \cdot \exp(-j2\pi f_0 R(t)/c) \quad (2)$$

其中 τ 为“快时间”, t 为“慢时间”, $R(t)$ 为发射机到目标,再由目标到接收机的距离。

另一方面,干扰信号回波经混频输出的基带信号为

$$s_{rj}(\tau, t) = \sigma_t a(\tau - R'(t)/c - s_d) \exp[j\pi\gamma(\tau - R'(t)/c - s_d)^2] \cdot \exp[-j2\pi f_0 R'(t)/c] \exp(-j2\pi f_0 s_d) \cdot \exp[j\varphi(t)] \quad (3)$$

式中 s_d 为转发时延, $\varphi(t)$ 为干扰信号的调制相位, $R'(t)$ 是“发射机-干扰机-目标-接收机”的距离。

选定待保护区域内一点为参考点,设 $R''(t)$ 是“发射机-干扰机-参考点-接收机”的距离,那么,当干扰信号转发时延 s_d 为常数时,为使参考点的干扰信号相位史与雷达回波信号相位史相同,由式(2)和式(3)知调制相位需满足

$$\varphi(t) = 2\pi[R''(t) - R(t)]/\lambda = 2\pi[R_y(t) + R_z(t) - R_t(t)]/\lambda \quad (4)$$

其中 $R_{ij}(t)$ 表示发射机到干扰机的距离, $R_j(t)$ 表示干扰机到参考点的距离, $R_i(t)$ 表示发射机到参考点的距离。

一般情况下, 干扰机固定, 即 $R_j(t)$ 不随时间变化, 可以从式(4)中略去, 得到调制相位:

$$\varphi(t) = 2\pi[R_{ij}(t) - R_i(t)]/\lambda \quad (5)$$

该调制相位与接收机参数无关, 因此避开了双基地 SAR 接收机位置无法确定的问题。调制相位实际上只能保证参考点位置处的目标对应的干扰信号相位与雷达回波信号相位一致, 对于参考点外的目标, 则存在一个调制相位误差。后面将详细分析该相位误差对干扰效果的影响。

3 双基地合成孔径雷达弹射式干扰效果分析

3.1 转发时延对干扰效果的影响

干扰信号经距离压缩后为

$$\hat{s}_{ij}(\tau, t) = \sigma_i \text{sinc}[B(\tau - s_d - R'(t)/c)] \exp[-j2\pi f_0 R'(t)/c] \cdot \exp(-j2\pi f_0 s_d) \exp[j\varphi(t)] \quad (6)$$

目标回波距离压缩后为

$$\hat{s}_r(\tau, t) = \sigma_r \text{sinc}[B(\tau - R(t)/c)] \cdot \exp[-j2\pi f_0 R(t)/c] \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可见, 干扰信号距离像与真实目标距离像存在一个偏移:

$$\Delta R = s_d \cdot c + R'(t) - R(t) = s_d \cdot c + R_{ij}(t) + R'_j - R'_i(t) \quad (8)$$

其中 R'_j 是干扰机到目标的距离, $R'_i(t)$ 是发射机到目标的距离。因此, ΔR 与转发时延 s_d 有关。不同的转发时延可以得到目标不同的距离偏移量。

(1) 固定转发时延 s_d 距离压缩后, 干扰像相对于真实目标在距离上存在偏移, 相当于对原始图像进行了平移。

(2) 随机转发时延 s_d 若 s_d 是随机的, 那么得到的干扰信号的距离像也将是随机分布的。若对距离压缩后的信号进行方位压缩, 随机的 s_d 在方位向上表现为随机噪声, 因此干扰信号在方位向上的线性调频特性被破坏, 不能被方位压缩。本文不研究随机转发时延干扰。

3.2 调制相位对干扰效果的影响

设发射机到场景内参考点以外的某目标的距离为 $R'_i(t)$, 则该目标需要补偿的相位为

$$\varphi'(t) = 2\pi[R_{ij}(t) - R'_i(t)]/\lambda \quad (9)$$

而实际补偿的相位为式(5), 则存在相位补偿误差:

$$\Delta\varphi(t) = 2\pi[R_i(t) - R'_i(t)]/\lambda \quad (10)$$

该相位误差会引起干扰信号与雷达信号失配。多普勒中心频率失配会引起干扰像方位向位置偏移。多普勒参数失配产生的方位二次相位误差 $\Delta\Phi$ 使输出图像散焦, 是影响干扰像质量的关键。

3.2.1 多普勒参数失配对干扰效果的影响 以平行于发射机航线的方向为 Y 轴建立直角坐标系, 如图 2 所示。图中, $2L$ 为合成孔径时间内发射机的飞行距离, x_0 为发射机地距, 点 T 为合成孔径中心时刻发射机的位置, y_0 为点 T 到 X 轴的垂直距离。

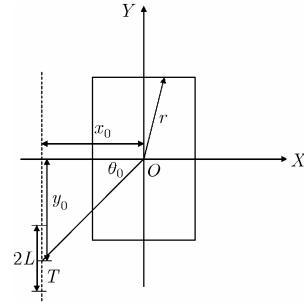


图 2 发射机与保护区几何关系示意图

由图 2 有:

$$\Delta R(t) = R_i(t) - R'_i(t) = \sqrt{x_0^2 + (vt + y_0)^2 + H^2} - \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (vt + y_0 - y_1)^2 + H^2} \quad (11)$$

其中 $(x_0, vt + y_0, H)$ 为发射机航线上的一点; $(x_1, y_1, 0)$ 为场景内任一点。特别地, 当发射机采用正侧视工作模式时, $y_0 = 0$ 。

将 $\Delta R(t)$ 进行关于 t 的泰勒级数展开, 有

$$\Delta R(t) = R_i(0) - R'_i(0) + [vy_0/R_i(0) - v(y_0 - y_1)/R'_i(0)]t + \{v^2[(x_0 - x_1)^2 + H^2]/R_i^3(\varepsilon) - v^2(x_0^2 + H^2)/R_i^3(\varepsilon)\}t^2, \quad \varepsilon \in (0, t) \quad (12)$$

(1) 多普勒中心频率误差 多普勒中心频率误差决定于干扰像在方位向上的偏移量, 该值由式(12)中关于 t 的线性项决定:

$$\Delta syn = (vy_0/\lambda R_i(0) - v(y_0 - y_1)/\lambda R'_i(0)) \cdot v_r/k_i \quad (13)$$

式中 k_i 为目标多普勒调频率。

可见, 干扰像的方位偏移程度与目标位置有关。不同目标的方位偏移量不同。

(2) 方位二次相位误差 多普勒参数失配产生的方位二次相位误差 $\Delta\Phi$ (由式(12)中关于 t 的二次项决定) 是影响干扰像质量的关键。对于场景内满足 $|\Delta\Phi|_{\max} \leq \pi/4$ 的散射点, 干扰效果将表现为虚假图像干扰。若在合成孔径内, $|\Delta\Phi|_{\max} > \pi/4$, 则干扰像将出现散焦, 干扰可以看成散焦图像干扰。随着失配程度的增大, 干扰目标散焦会变强, 此时干扰效果可以看作散焦抑制干扰。

3.2.2 不散焦保护区分析 不散焦保护区内目标的干扰效果表现为虚假图像干扰。该区域内目标的方位二次相位误差 $\Delta\Phi$ 应满足

$$\forall (x_0, y_0, 0), |\Delta\Phi(t)| = 2\pi \left| \{v^2[(x_0 - x_1)^2 + H^2]/R_i^3(\varepsilon) - v^2(x_0^2 + H^2)/R_i^3(\varepsilon)\}t^2 \right| / \lambda \leq \pi/4 \quad (14)$$

为了避开与接收机有关的参数, 这里取 $t = \pm T_t/2$, T_t 为发射机对场景的照射时间, 代入上式, 有

$$\left| \{[(x_0 - x_1)^2 + H^2]/R_i^3(\varepsilon) - (x_0^2 + H^2)/R_i^3(\varepsilon)\}L^2 \right| \leq \lambda/8 \quad (15)$$

其中 $2L = T_t \cdot v$ 为照射时间内, 发射机飞过的距离。

现在用极坐标表示目标位置:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= r \cos \varphi, \\ y_1 &= r \sin \varphi, \end{aligned} \right\} \varphi \in [-\pi, \pi] \quad (16)$$

发射机位置:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 \\ y &= x_0 \operatorname{tg} \theta, \end{aligned} \right\} \theta \in [\theta_0 - \lambda / (2D), \theta_0 + \lambda / (2D)] \quad (17)$$

发射机飞过的距离:

$$2L = \lambda \sqrt{x_0^2 + (x_0 \operatorname{tg} \theta_0)^2 + H^2} / (D \cos^2 \theta_0) \quad (18)$$

其中 θ_0 为发射机斜视角(参见图 2), D 表示发射天线孔径尺寸。

将式(16)–式(18)代入式(15), 得

$$\left| \frac{(x_0 - r \cos \varphi)^2 + H^2}{\sqrt{(x_0 - r \cos \varphi)^2 + (x_0 \operatorname{tg} \theta - r \sin \varphi)^2 + H^2}} \right|^3 - \frac{x_0^2 + H^2}{\sqrt{x_0^2 + (x_0 \operatorname{tg} \theta)^2 + H^2}} \left| \frac{x_0^2 + (x_0 \operatorname{tg} \theta)^2 + H^2}{D^2 \cos^4 \theta} \right| \leq \frac{1}{2\lambda},$$

$$\theta \in \left[\theta_0 - \frac{\lambda}{2D}, \theta_0 + \frac{\lambda}{2D} \right] \quad (19)$$

可以看出, 不散焦保护区与发射机的地距、飞行高度和斜视角有关。

下面通过具体的例子来分析。

设双基地 SAR 发射机采用斜视工作模式。飞行速度 $V_T = 120\text{m/s}$, 飞行高度 10,000m, 地距 50km, 飞行方向平行于 y 轴。参考点选为坐标原点。它满足式(19)的区域如图 3。

图 3 中宽度为 d 的带即为不散焦保护区。可以看出: (1) 不散焦保护区呈现条带状。(2) 不散焦保护带宽度 d 的大小与发射机斜视角有关。(3) 发射机斜视角不同, 保护带与 x 轴的夹角(最小带宽方向) ψ 也不同。定义逆时针方向角度为正, 则当斜视角为负(即发射机位于 y 轴的正半轴)时, ψ 为负;

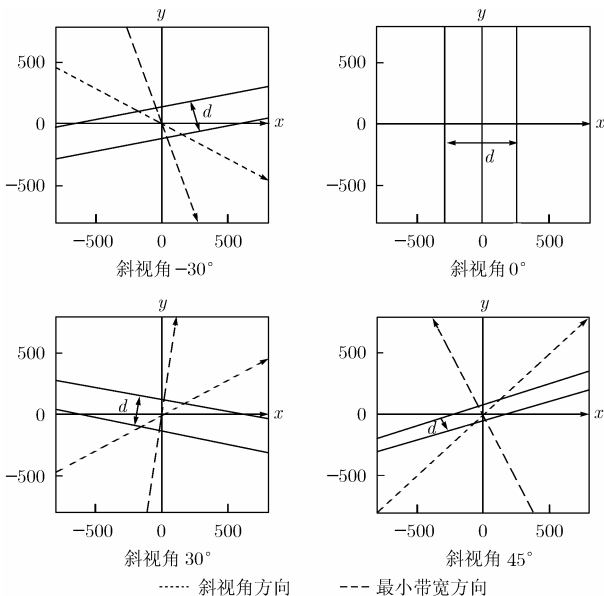


图 3 不同斜视角双基地 SAR 的不散焦保护区域

斜视角为正时(即发射机位于 y 轴的负半轴)时, ψ 为正。且斜视角越大, $|\psi|$ 越大。当发射机采用正侧视时, $\psi = 0$ 。

图 4、图 5 给出保护带宽度 d 与发射机斜视角、高度及地距的关系, 可知: 带宽 d 随斜视角的增大而减小。发射机高度越高, 保护带宽越大。发射机地距越大, 保护带宽越小。发射机斜视角越小, 保护带宽随高度/地距的增大/减小越快。

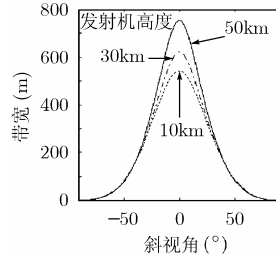


图 4 不同高度下, 保护带宽度与斜视角的关系

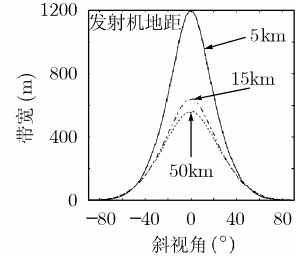


图 5 不同地距下, 保护带宽度与斜视角的关系

4 双基地合成孔径雷达弹射式干扰仿真

仿真中设置的系统参数为: 双站 SAR 采用平飞正侧视。飞行速度 $V_T = V_R = 120\text{m/s}$ 。发射机飞行高度 10,000m, 地距 50km; 接收机飞行高度 5000m, 地距 30km。接收天线孔径 2m。载波频率 1GHz, 信号带宽 75MHz。干扰机地距 1km, 高度 500m。场景参考点取为原点。

取 3 个点目标 $(0,0,0), (70,-50,0), (-30,80,0)$, 由式(19)及图 3 可知它们位于不散焦保护区内。图 6 是其固定转发时延弹射式干扰的仿真结果, 图 7 是点 2 的目标像和干扰像方位压缩处理的结果。可以看出, 干扰像和目标像方位压缩的结果几乎一样。这时的干扰效果表现为虚假目标干扰。

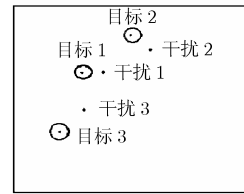


图 6 不散焦保护区内点目标弹射式干扰仿真

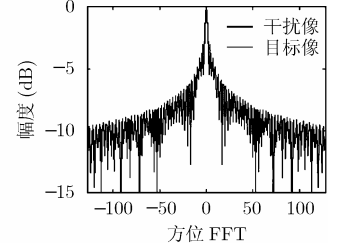


图 7 真实信号和干扰信号方位压缩处理结果

另取 1 个不散焦保护区外的目标 $(-800,30,0)$, 图 8 是其固定转发时延弹射式干扰的仿真结果, 图 9 是方位压缩处理的结果。干扰信号方位压缩处理结果出现主瓣展宽, 旁瓣升高的现象, 表示干扰像散焦。如果将目标取得更远离不散焦保护区: $(-1800,100,0), (-1900,-100,0)$, 可以看到干扰像的散焦更大。

仿真表明, 干扰像在距离向与原目标存在偏移, 偏移量由式(8)决定。干扰像在方位上也存在偏移, 该偏移量由式(15)决定。不散焦区域内目标固定转发时延干扰效果表现为虚假目标干扰。不散焦区域外目标的干扰效果可以看作散焦抑制

干扰。



图 8 不散焦保护区外点
目标弹射式干扰仿真

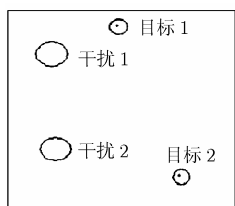


图 10 不散焦保护区外点
目标弹射式干扰仿真

5 结束语

弹射式干扰不需要对接收机参数有先验知识, 且干扰信

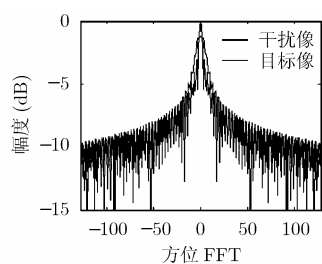


图 9 真实信号和干扰信号
方位压缩处理结果

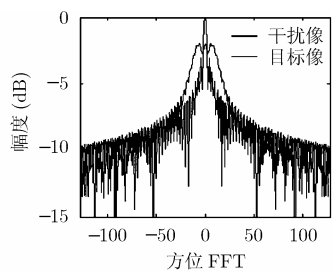


图 11 真实信号和干扰信号
方位压缩处理结果

号保留了雷达信号的相关性并利用了地物散射特性, 因此是对双基地 SAR 的一种有效干扰方式。固定转发时延弹射式干扰不散焦保护区(即能形成虚假图像干扰的区域)与发射机参数、目标及干扰参考点位置有关。本文详细研究了它们的关系。这里需要指出的是, 在双基地 SAR 接收机参数未知的条件下, 要确定真实的不散焦保护区大小是不可能的, 本文给出的结果是这个真实不散焦保护区的最小值, 了解这个最小值对干扰的实际应用是有指导意义的。

参考文献

- [1] 汤子跃, 张守融. 双站合成孔径雷达系统原理. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 甘荣兵, 王建国, 何川. 对合成孔径雷达弹射式干扰性能分析. 信号处理, 2003, 19(增 49): 382-385.
- [3] 胡东辉, 吴一戎. 合成孔径雷达散射波干扰研究. 电子学报, 2002, 30(12): 1882-1884.
Hu Dong-hui and Wu Yi-rong. The scatter-wave jamming to SAR. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(12): 1882-1884.

张 瑛: 女, 1981 年生, 硕士, 研究方向为雷达信号处理.

王建国: 男, 1954 年生, 教授, 主要研究合成孔径雷达成像、雷达对抗、雷达目标识别等方向.