

逆合成孔径雷达的干扰仿真

李源, 刘建新, 蔡英武

(中国工程物理研究院 电子工程研究所 四川 绵阳 621900)

【摘要】从逆合成孔径雷达运动补偿的角度对ISAR成像的干扰机理进行了理论分析,并进行了基于ISAR回波真实数据的仿真实验。理论分析和仿真结果表明,只要施加的干扰信号使得运动补偿过程中相邻距离像复包络的相关函数最大值出现误判,就会有效地使ISAR成像失真。然后,将ISAR与普通脉冲雷达、SAR的抗压制干扰能力进行了对比,结果表明由于ISAR成像必须经过运动补偿处理,其抗压制干扰能力相对较差。

关键词 逆合成孔径雷达; 合成孔径雷达; 运动补偿; 压制干扰

中图分类号 TN974 文献标识码 A

Jamming Simulation for Inverse Synthetic Aperture Radar

LI Yuan, Liu Jian-xin, CAI Ying-wu

(Institute of Electronic Engineering, CAEP Mianyang 621900)

Abstract Through motion compensation of Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR), the jamming mechanism of ISAR is analyzed and simulated. The results show the imaging of ISAR will be distorted effectively if the maximum value of the complex envelope correlation function of neighbor range images is false alarm. Furthermore, the comparison of anti-jamming ability among ISAR, SAR and linear frequency-modulated radar shows that the anti-jamming ability of ISAR is worse because it needs motion compensation before imaging.

Key words ISAR; SAR; motion compensation; barrage jamming

逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)是一种高分辨率的二维成像雷达,它可以对空中目标如飞机等进行二维成像,从而可识别目标,因而在军事上有重要的用途。本文通过对ISAR成像及干扰机理的深入分析和仿真,研究ISAR的抗干扰能力。

1 ISAR成像及运动补偿原理

1.1 ISAR成像原理

图1是ISAR成像原理图。设点O是目标上的一个参考点,它到雷达的距离是 r_0 ,并且假设目标上任一点 (x, y) 到参考点O的距离记为 ρ ,与雷达的距离为 r ,目标围绕O点旋转的角速度为 ω 。

设雷达发射相参线性调频脉冲串信号,其表达式为:

$$P_i(t) = a(t - iT) \exp\{j2\pi[f_0(t - iT) + \gamma(t - iT)^2 / 2]\} \quad (1)$$

式中 $P_i(t)$ 表示发射的第*i*个脉冲; T 为脉冲重复周期; f_0 是信号的中心频率; τ 是脉冲宽度; γ 为调频斜率; $a(t)$ 是信号的包络加权。

设 $g(x, y)$ 是目标在点 (x, y) 处的散射强度,则目标的回波为:

$$s_i(t) = \iint_{\Omega} g(x, y) P_i(t - \frac{2r}{c}) dx dy \quad (2)$$

式中 Ω 为目标的范围。由于 $\rho \ll r$, 所以 r 可近似表示成

$$r \approx r_0 + x \cos(\omega t) + y \sin(\omega t) \quad (3)$$

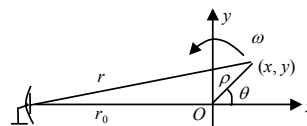


图1 ISAR 成像原理图

收稿日期: 2005-09-06

基金项目: 中国工程物理研究院重大基金资助项目(2002Z0402)

作者简介: 李源(1975-), 女, 博士生, 主要从事雷达信号处理及对抗方面的研究。

设参考点 O 到雷达的距离为 r_0 ，实际中测得的参考点 O 到雷达的距离为 r_c ，将发射信号延时 $2r_c/c$ 作为本振信号并与回波信号进行混频，混频后的信号为：

$$s_i(F) = \exp(-j2\pi F \Delta r_i) G(\theta_i, F) \quad (4)$$

$$G(\theta_i, F) = \iint_{\Omega} g(x, y) \exp[-j2\pi F(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i)] dx dy \quad (5)$$

式中 $F = 2(f_0 + \gamma t')/c$ ； $t' = t - iT - (2r_0/c)$ ； $\theta_i = \omega t$ 为雷达发射第 i 个脉冲时目标所转过的角度； $\Delta r_i = r_0(\theta_i) - r_c(\theta_i)$ ，表示发射第 i 个脉冲时测量值 $r_c(\theta_i)$ 和真值 $r_0(\theta_i)$ 之间的距离差，这个误差 Δr_i 随 i 变化，因此使一维距离像包络发生随机平移。

1.2 运动补偿^[1-2]

1.2.1 包络对准

在ISAR运动补偿中，由于ISAR方位采样率比较高，相邻距离像的包络变化很小，距离像之间的包络对准^[1-2]是用互相关法来进行的。

设 $S_i(r)$ 和 $S_{i+1}(r)$ 是两个相邻的一维像的复包络，其相关函数为：

$$R(k) = \int_{-\infty}^{\infty} S_i(r) S_{i+1}^*(r+k) dr \quad (6)$$

若两个一维像近似不变，即 $|S_{i+1}(r+\Delta r)| \approx |S_i(r)|$ ， Δr 为偏移量，则根据许瓦兹不等式可知，当 $k = \Delta r$ 时， $R(k)$ 取最大值。因此，可由相关函数之最大值位置求得第 $i+1$ 个一维像相对于第 i 个一维像的偏移量，从而实现包络对准即距离对准。

1.2.2 相位对准

经包络对准后的回波信号为：

$$s_i(F) = \exp(j4\pi\gamma t' \delta r_i / c) \cdot \exp(j4\pi f_0 \delta r / c_i) \cdot G(\theta_i, F) \quad (7)$$

式中 $\delta r_i = \hat{\Delta r}_i - \Delta r_i$ ； $\hat{\Delta r}_i$ 是对 Δr_i 的估计值。由于载频 f_0 很高，对 $\exp(j2\pi \cdot 2f_0/c \cdot \delta r_i)$ 来说很小的偏差 δr_i 就会造成很大的相移，须进行相位对准^[2]。目前多数是采用式(8)把平均相位 ϕ 求出后，调整 $S_{i+1}(r)$ 的相移，使相邻一维像之间的平均相移为零。

$$B e^{j\phi} = \int S_i^*(r) S_{i+1}(r) dr / \int |S_i^*(r) S_{i+1}(r)| dr \quad (8)$$

2 ISAR成像干扰机理分析

ISAR成像的基础是要经过包络对准使相邻距离像在距离单元上对齐，新的成像算法不需进行相位对准^[3]，而只在包络对准基础上再利用时频分析就可以得到清楚的图像，因而干扰ISAR成像就归结为如何破坏包络对准。由于包络对准通过互相关法求相邻距离像复包络相关函数的最大值^[1-2]，从而调整距离像之间的位置偏移，如果干扰信号能够使相关函数的最大值出现误判，则ISAR包络对准就不能正确进行，就能成功干扰ISAR成像。所以干扰ISAR成像就归结为对相邻复包络相关后最大值的检测上，如果相关函数最大值的检测虚警较高，就会导致ISAR聚图像散焦。

本文以射频噪声作为干扰信号。设干扰信号 N 是零均值、方差为 σ^2 服从高斯分布的白噪声。受干扰的第 i 个距离像的复包络为 $S_i(r) + N(r)$ ，第 $i+1$ 个距离像的复包络为 $S_{i+1}(r + \Delta r) + N(r)$ ；则 $S_i(r) + N(r)$ 和 $S_{i+1}(r + \Delta r) + N(r)$ 的互相关函数为：

$$\begin{aligned} R &= E \{ (S_i(r) + N(r))(S_{i+1}(r + \Delta r) + N(r))^* \} = \\ &E \{ S_i(r) S_{i+1}^*(r + \Delta r) \} + E \{ S_i(r) N^*(r) \} + E \{ N(r) S_{i+1}^*(r + \Delta r) \} + E \{ N(r) N^*(r) \} = \\ &E \{ S_i(r) S_{i+1}^*(r + \Delta r) \} + \sigma^2 \delta(0) = R_{S_i S_{i+1}} + \sigma^2 \delta(0) \end{aligned} \quad (9)$$

式中

$$R_{S_i S_{i+1}} = E \{ S_i(r) S_{i+1}^*(r + \Delta r) \} \quad (10)$$

是无干扰时目标回波相邻距离像复包络的相关函数，并且在 Δr 处取最大值，记为 $R_{S_i S_{i+1} \max}$ 。

由式(9)知受干扰后的回波相邻距离像复包络的互相关函数 R 由2部分组成：第1部分是信号本身引起的，

是成像所期望的；第2部分是由噪声引起的，对成像起破坏作用。欲求 R 的最大值。当：

$$R_{S_i S_{i+1} \max} < \sigma^2 \delta(0) \tag{11}$$

即回波信号相邻距离像复包络的互相关函数的最大值小于噪声的功率时，有：

$$R_{\max} = \sigma^2 \delta(0) \tag{12}$$

则根据 R 最大值来确定相邻距离像 S_i 和 S_{i+1} 之间的位置偏移出现错误，致使包络对准不能正确进行。在这种情况下，本文研究ISAR成像干扰机理的问题就转化为干扰在什么条件下使 R 的最大值检测概率较低，虚警率较高。

根据虚警概率 p_{fa} 、检测概率 p_d 和信噪比 SNR 的关系^[4]，有：

$$p_{fa} = \exp(-U_T^2 / \sigma^2) \tag{13}$$

$$p_d = \int_{U_T}^{\infty} r / \sigma^2 \cdot \exp[-(r^2 + A^2) / (2\sigma^2)] I_0(rA / \sigma^2) dr \tag{14}$$

对ISAR，聚焦成像需正确检测到相关函数 R 的最大值并需正确定位其位置，破坏ISAR成像则反之。已知搜索雷达在虚警概率 p_{fa} 为0.1%时，能够发现目标但不能正确定位；ISAR成像失真虚警率至少要0.1%。由图2在 p_d 小于50%、 p_{fa} 为1%时，相关包络检波后 SNR 要小于6 dB。

匹配滤波实际上也就是相关的过程^[5]。相关后较相关前峰值信噪比提高3 dB^[7]，并且包络检波前后信噪比基本保持不变。设输入干信比 JSR_i ，脉压增益 g dB，根据上面的分析，当满足：

$$JSR_i > g - 3 \tag{15}$$

时，不能正确检测到 R 的最大值，此时包络对准无法正确进行，导致ISAR成像散焦。下面进行仿真实验。

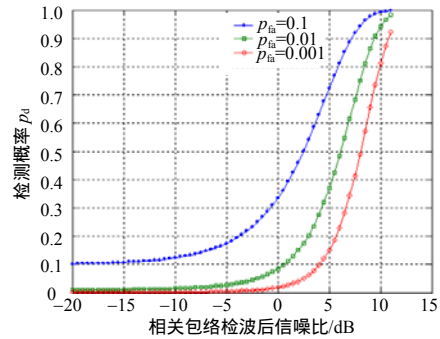


图2 相邻复包络相关包络检波后虚警概率 p_{fa} 、检测概率 p_d 、信噪比 SNR 关系图

3 干扰仿真实验结果

3.1 ISAR干扰仿真

干扰仿真以实测某小型喷气式飞机ISAR回波数据为原始输入。仿真参数见表1。干扰仿真流程如图3所示，仿真图像如图4所示。

仿真中方位维采用256个脉冲。由图4a可以看出，无干扰时256个脉冲对应的距离像在距离维上对得很齐；无干扰时飞机图像，见图4c；干信比37 dB时，飞机距离像在距离维上并没有对齐，见图4b；由此再进行方位维处理得到的图像，见图4d，可以看出此时飞机已经被破坏。图4说明噪声功率达到一定数值时，就会影响相关函数最大值的正确检测，使包络对准失败，最终导致ISAR图像散焦。

表1 仿真参数

载频/ MHz	5 520	距离维分辨率/ m	0.375
距离调频带宽/MHz	400	方位维分辨率/m	0.375
脉冲宽度/ μ s	25.6	距离维增益/dB	40
脉冲重复频率/Hz	400	方位维增益/dB	10.3
成像总转角/rad	0.04	二维成像的总增益/dB	50.3

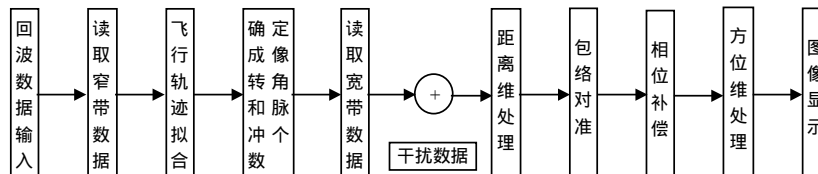


图3 ISAR干扰仿真流程图

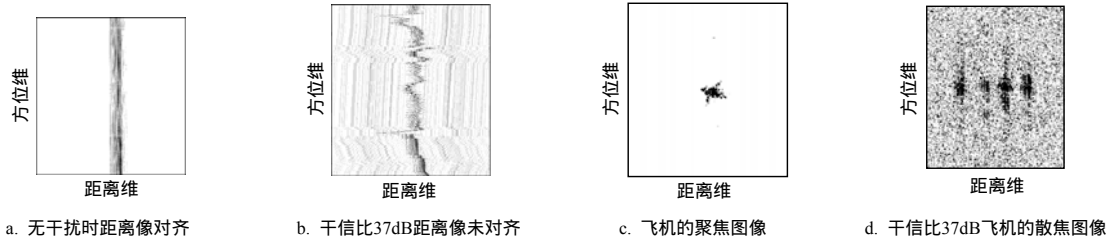


图4 无干扰和干信比37 dB距离像对齐情况和相应的飞机聚焦、散焦图像

3.2 对比分析

对SAR图像干扰^[6-8],经二维处理后一般要求干信比为10 dB才能达到明显的干扰效果。在SAR距离维增益为40 dB、方位维增益为10 dB时,需要输入60 dB干信比才能干扰掉SAR图像。对线性调频雷达(LFM)^[8],在虚警概率 p_{fa} 为 10^{-6} 、检测概率 p_d 下降到10%时,信噪比 SNR_{out} 为8.8 dB;在一维增益为50 dB时,输入41 dB干信比才能干扰掉线性调频雷达。而对ISAR来说,根据上面的分析和实验,当距离维增益达到40 dB、方位维增益为10 dB时,需要输入37 dB的干信比才能使图像散焦。具体数值如表2所示。可以看出,对ISAR的压制干扰相对要比SAR雷达和线性调频雷达容易实现。

表2 干扰三种雷达所需干信比较

雷达类型	处理增益/dB	输入干信比/dB	输出干信比/dB	干扰效果
LFM	50	41.2	-8.8	$p_{fa} = 10^{-6}, p_d < 10\%$
SAR	50	60.0	10.0	二维图像明显被干扰
ISAR	50	37.0	-3.0	二维图像散焦

4 结论

本文从ISAR运动补偿原理入手,结合包络对准-求相邻距离像复包络相关函数的最大值,对ISAR干扰机理进行了分析和仿真。研究表明:要想干扰ISAR成像,只要能够使得ISAR相邻一维距离像的复包络相关后最大值的检测有误,即最大值的虚警概率很高,则ISAR成像必然失真;同时,ISAR的工作机理虽然与SAR类似,但其抗干扰能力却比SAR差得多,产生这种差别的原因就在于ISAR在成像前必须经过运动补偿处理。ISAR的这一特点使得干扰方即使采用宽带噪声压制干扰,也只要相对SAR较小的干扰功率就可以破坏ISAR的二维成像。

参 考 文 献

- [1] 王国林, 许荣庆, 刘永坦, 等. ISAR运动补偿的快速算法[J]. 系统工程与电子技术, 1996(5):63-69.
- [2] 许荣庆. 逆合成孔径雷达的运动补偿及成像算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1990.
- [3] Chen V C, Qian Shie. Joint time-frequency transform for radar range-doppler imaging[J]. IEEE Transactions on AES, 1998, 34(2): 486-499.
- [4] 何友, 关 键, 彭应宁, 等. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [5] 向敬成, 张明友. 雷达系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [6] 吴玮琦, 俞永福. 对合成孔径雷达的压制干扰功率分析[C]//2003中国合成孔径雷达会议论文集, 合肥, 2003: 148 ~ 151.
- [7] 马骏声. NMD-GBR雷达的测量能力及其性能参数[J]. 航天电子对抗, 2002, (5): 1-8.
- [8] 杰里 L 伊伏斯, 爱德华 K 里迪. 现代雷达原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1991.

编辑 徐安玉