

文章编号: 1672-2892(2012)01-0046-05

## 两种 SAR 干扰方法的效果评估

罗 强<sup>1</sup>, 朱守保<sup>1</sup>, 童创明<sup>2</sup>

(1.第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025; 2.空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘 要:** 干扰效果评估是评价和比较干扰方法优劣的重要方法。在分析正弦调频干扰与锯齿调频干扰的基础上, 发现两种方法都能产生覆盖式和斑点噪声式干扰模式, 这就对评估两种干扰方法的优劣带来了难度。本文利用两种具有针对性的评估方法分别对两种干扰模式进行评估, 增加了评估结果的准确性。最后利用实验仿真对干扰效果进行了定量分析。

**关键词:** 正弦调频; 锯齿调频; 合成孔径雷达; 效果评估

**中图分类号:** TN974; TP317.4 **文献标识码:** A

## Effect evaluation on two jamming methods to SAR

LUO Qiang<sup>1</sup>, ZHU Shou-bao<sup>1</sup>, TONG Chuang-ming<sup>2</sup>

(1.The Second Artillery Engineering University, Xi'an Shaanxi 710025, China;

2.Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan Shaanxi 713800, China)

**Abstract:** Jamming effect evaluation is an important method on judging and comparing with jamming methods. Based on analysis of sinusoidal frequency modulation and sawtooth frequency modulation jamming to SAR, it is obtained that the two methods can both produce mantle style and spot noise style jamming, which makes the jamming effect evaluation on the two jamming methods more difficult. Therefore two pertinent methods are adopted to make the evaluation more exact. The quantitative analysis of jamming effect evaluation is executed through the simulation.

**Key words:** sinusoidal frequency modulation; sawtooth frequency modulation; Synthetic Aperture Radar; effect evaluation

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种高分辨力成像雷达。具有全天时、全天候和透视性等特点, SAR 在侦察监视领域的应用日趋广泛<sup>[1-5]</sup>, 已广泛用于军事侦查、地图测绘以及导弹末端图像匹配制导等方面。有效地对合成孔径雷达实施干扰, 保护己方的目标成为现代电子战中的重要课题<sup>[6]</sup>。

众所周知, 干扰效果是衡量干扰模式有效性以及雷达干扰设备性能的一项重要综合性指标, 定量地评估干扰效果对实战、试验乃至电子对抗设备的研制都十分重要<sup>[7]</sup>。本文针对二维正弦调频转发干扰的方法与二维锯齿调频转发干扰, 分别从压制干扰和斑点噪声干扰的效果进行定量评估。分析对比了两种干扰方法的优劣, 对干扰方法在现实中运用有一定的指导作用。

### 1 两种干扰方法原理

设合成孔径雷达发射的线性调频信号表达式为:

$$p(t) = A_0 \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_c t + j\pi K_r t^2) \quad (1)$$

式中:  $A_0$  为信号幅度;  $f_c$  为信号载频;  $K_r$  为信号的调制频率。对合成孔径雷达的调频干扰信号可以表示为:

$$u_1(t) = p(t) \exp(j2\pi k_{jm} \int n(\tau) d\tau) \quad (2)$$

那么调制信号为  $m(t) = \exp(j2\pi k_{jm} \int n(\tau) d\tau)$ , 由上两式可以知道干扰信号的瞬时频率为:

$$f_j(t) = f_c + K_r t + n(t) \quad (3)$$

当调频干扰信号  $n(t)$  为正弦信号时, 即  $n(t) = a \sin(2\pi f_{r \sin} t)$  时, 为正弦调频干扰。设  $s_0(t, \eta)$  为干扰机接收到的雷达信号。那么二维正弦调频干扰信号模型为<sup>[7-9]</sup>:

$$s_j(t, \eta) = s_0(t, \eta) \exp(jm_{fa} \cos \varpi_a \eta) \exp(jm_{fr} \cos \varpi_r t) \quad (4)$$

当调频干扰信号  $n(t)$  为锯齿波信号时, 即  $n(t) = \frac{2a}{T_{gr}} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \text{rect}(t - iT_{gr}, T_{gr})(t - iT_{gr})$  时, 为锯齿波调频干扰。那么二维锯齿波调频干扰信号为<sup>[9]</sup>:

$$s_j(t, \eta) = s_0(t, \eta) \exp(j\pi k_{gr} t^2) \exp(j\pi k_{ga} \eta^2) \quad (5)$$

由文献[9]与文献[10]可知, 不论是二维正弦调频干扰, 还是二维锯齿调频干扰, 都会产生分布于一定区域面积的虚假目标。就距离向信号分析, 当距离向的线性调频信号周期  $T_{r \sin}$ 、调制信号周期  $T_{gr}$  与脉宽  $T_p$  的关系为:  $T_p \leq T_{r \sin}$ ,  $T_p \leq T_{gr}$ , 每个虚假目标形成的 sinc 脉冲在空间上不能被区分开, 就会形成覆盖式的干扰模式。若  $T_p \geq T_{r \sin}$ ,  $T_p \geq T_{gr}$ , 则每个虚假目标形成的 sinc 脉冲在空间上就能被区分开, 就会形成亮斑点串。方位向结果与距离向一致。

可以看出两种干扰方法不论干扰样式、干扰类型都十分一致。针对其产生的两种不同的干扰样式, 即覆盖式干扰与斑点噪声式干扰, 某一种单一的评估方法可能不能准确地对干扰效果进行评估。本文从两个方面利用具有针对性的两种方法对其干扰效果进行定量评估。

## 2 干扰效果的评估方法

对 SAR 雷达遮盖干扰的目的就是增大图像的识别模糊性, 阻止读图人员从图上观察到强弱灰度间的变化, 或者使暗区出现众多的亮斑, 或者破坏目标区域的连续性, 使得目标区域原来光滑的灰度值变得粗糙<sup>[5]</sup>。

### 2.1 覆盖干扰效果评估方法

干扰前后雷达图像的相关系数则可以较好地反映出两幅图像之间的这种强弱灰度间的变化。由于覆盖式干扰的干扰面积大, 所以会造成图像的灰度有大面积的变化。综合考虑雷达干扰的原理和图像处理理论, 采用成像区域内干扰前后的图像相关性测度因子进行 SAR 雷达的覆盖式干扰效果评估是比较合理的<sup>[5,7]</sup>。

相关系数是描述干扰前后两幅图像之间的统计相关性的量。设图像  $F = \{f(x_i, y_j)\}_{i=1, j=1}^{m, n}$ , 与图像  $G = \{g(x_i, y_j)\}_{i=1, j=1}^{m, n}$ , 表示为平面  $S = \{s(x_i, y_j)\}_{i=1, j=1}^{m, n}$  干扰前与干扰后的 SAR 图像。那么干扰前后图像的相关系数为:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(x_i, y_j) g(x_i, y_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f^2(x_i, y_j) \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g^2(x_i, y_j)}} \quad (6)$$

由于图像灰度非负, 即  $F > 0, G > 0$ , 结合许瓦尔兹不等式, 有  $0 < \rho < 1$ 。  $\rho$  越小, 则表明干扰后的图像偏离干扰前的图像越严重, 干扰效果也越好。

### 2.2 斑点噪声干扰效果评估方法

斑点噪声是 SAR 系统固有的缺点<sup>[11]</sup>, 如相干斑。在对斑点噪声没有进行抑制的情况下, 很难对 SAR 图像进行边缘提取、分割、分类、目标识别以及定位等处理。可以说斑点噪声干扰是一种有效的干扰样式。等效视数是衡量一幅图像斑点噪声相对强度的一种指标, 其定义为

$$ENL = \frac{\mu_{SAR}}{\sigma_{SAR}} \quad (7)$$

式中:  $\mu_{SAR}$  为图像灰度统计均值;  $\sigma_{SAR}$  为图像灰度标准差。  $ENL$  表现了图像灰度的对比度,  $ENL$  越大, 图像的对比度越小, 整体图像显得模糊不清。

### 3 实验仿真分析

实验仿真参数为载频 3 GHz、距离向频宽 50 MHz、发射脉宽 5  $\mu$ s、载机速度 100 m/s、天线尺寸 6 m、测绘中心坐标及干扰机位置为(10 000,0)、载机飞行高度 4 000 m。

无干扰的图像如图 1，锯齿调频覆盖式干扰的图像如图 2，正弦调频覆盖式干扰的图像如图 3，锯齿调频斑点噪声式干扰的图像如图 4。

从表 1 中可以看出在同等干信比的条件下，经锯齿调频干扰的图像的相关系数略小于经正弦调频干扰的图像，说明对于覆盖式干扰锯齿调频干扰的干扰效果略好于正弦调频干扰。

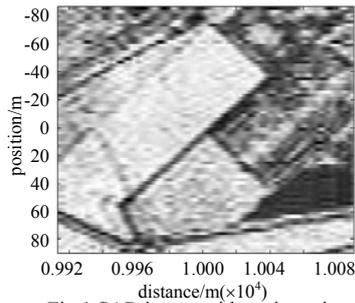
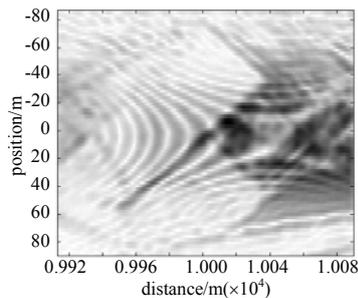


Fig.1 SAR image without jamming  
图 1 无干扰图像

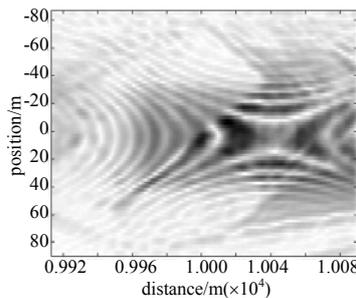
表 1 覆盖式干扰评估表

Table 1 Effect evaluation of mantle style jamming

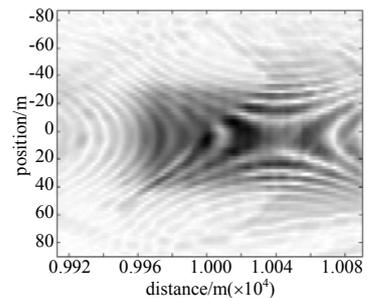
jamming method	NSR/dB	correlation coefficient
sawtooth FM jamming	-16.280 7	0.959 5
	2.045 2	0.826 3
	15.908 1	0.677 5
sinusoidal FM jamming	-16.280 7	0.959 7
	2.045 2	0.826 8
	15.908 1	0.678 4



(a) jamming when NSR is -16.280 7 dB



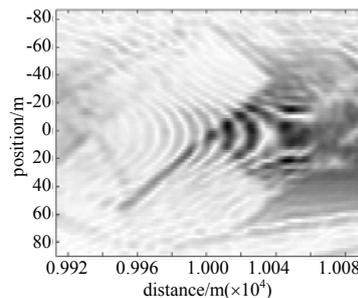
(b) jamming when NSR is 2.045 2 dB



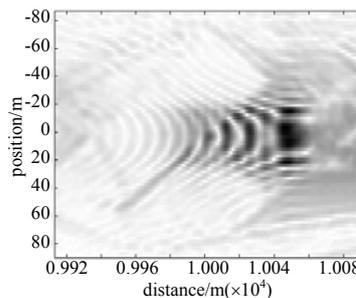
(c) jamming when NSR is 15.908 1 dB

Fig.2 Images with mantle style by sawtooth frequency modulation

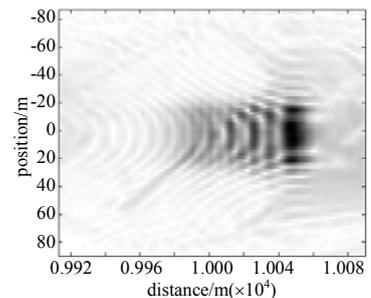
图 2 锯齿调频覆盖式干扰



(a) jamming when NSR is -16.280 7 dB



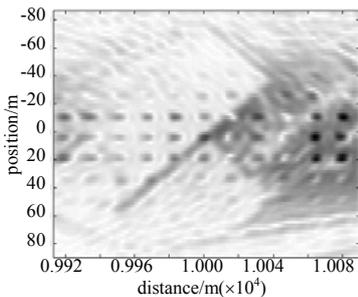
(b) jamming when NSR is 2.045 2 dB



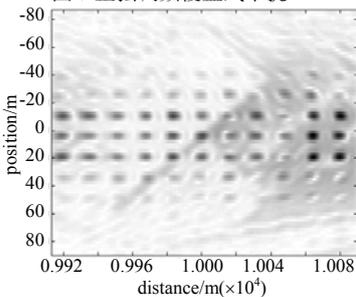
(c) jamming when NSR is 15.908 1 dB

Fig.3 Images with mantle style by sinusoidal frequency modulation

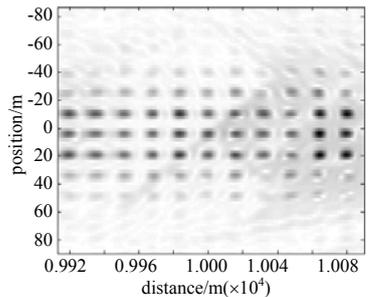
图 3 正弦调频覆盖式干扰



(a) jamming when NSR is -16.280 7 dB



(b) jamming when NSR is 2.045 2 dB



(c) jamming when NSR is 15.908 1 dB

Fig.4 Images with spot noise style by sawtooth frequency modulation

图 4 锯齿调频斑点噪声式干扰

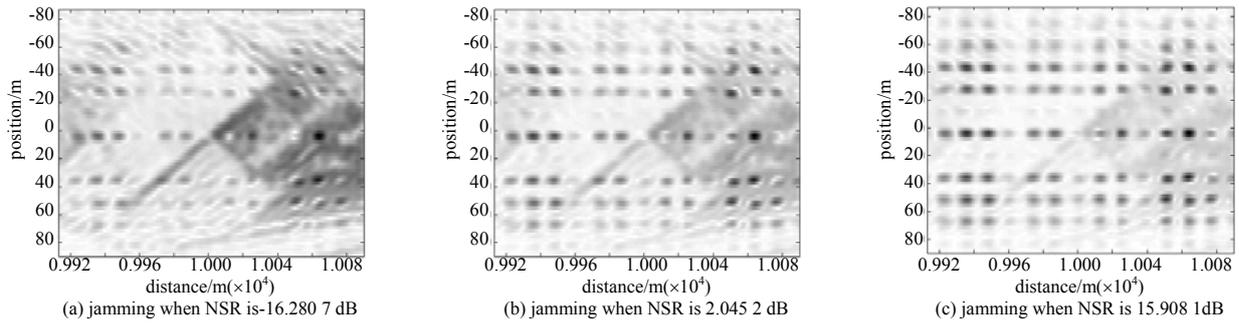


Fig.5 Images with spot noise style by sinusoidal frequency modulation  
图 5 正弦调频斑点噪声式干扰

从表 2 中可以看出在同等干信比条件下,经锯齿调频干扰的图像等效视数略大于经正弦调频干扰的图像,说明对于斑点噪声式干扰,锯齿调频干扰效果略好。

结合以上定量分析可知,锯齿调频干扰不论在覆盖式干扰还是斑点噪声式干扰都略优于正弦调频干扰。

表 2 斑点噪声式干扰评估表

Table2 Effect evaluation of spot noise style jamming

condition	NSR/dB	mean value	variance	ENL(Equivalent Number of Looks)
without jamming		170.18	12.425	13.696 8
sawtooth FM jamming	-16.280 7	199.70	13.880	14.387 9
	2.045 2	203.41	14.230	14.294 7
	15.908 1	218.64	14.747	14.826 0
sinusoidal FM jamming	-16.280 7	193.25	13.589	14.220 8
	2.045 2	195.87	13.962	14.028 4
	15.908 1	205.11	14.271	14.372 5

#### 4 结论

本文分析了正弦调频干扰、锯齿调频干扰的原理,并利用计算机仿真了干扰效果图。两种干扰方法都可以产生覆盖式干扰和斑点噪声式干扰,然而单一的评估方法可能不能准确地对干扰效果进行评估,因此对于两种干扰方式,本文分别采用具有针对性的评估算法,增加了评估结果的可信度。最后利用实验仿真对 SAR 图像进行了干扰模拟,并对其干扰结果进行了评估,得出锯齿调频干扰不论在覆盖式干扰还是斑点噪声式干扰方面都略微优于正弦调频干扰。实验结果对今后两种干扰方法的选择利用方面有一定的指导意义。

#### 参考文献:

[ 1 ] 宋建设,郑永安,袁礼海. 合成孔径雷达图像理解与应用[M]. 北京:科学出版社, 2008. (SONG Jianshe,ZHENG Yongan,YUAN Limei. Understanding and applications of synthetic aperture radar images[M]. Beijing:Science Press, 2008.)

[ 2 ] 江舸,肖汉波,蔡英武,等. 基于 DUC 的 ISAR 图像欺骗干扰技术[J]. 信息与电子工程, 2010,8(4):378-381. (JIANG Ge,XIAO Hanbo,CAI Yingwu,et al. Image deception jamming technology based on DUC[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(4):378-381.)

[ 3 ] Ian G Cumming,Wong Frank H. Digital processing of synthetic aperture radar data[M]. Boston London:Artech house, 2005.

[ 4 ] Chris Oliver,Shaun Quegan. Understanding synthetic aperture radar images[M]. London:Artech House, 1998.

[ 5 ] 柏仲干,周颖,王国玉,等. 基于滑窗检测的 SAR 压制干扰评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2008,30(11):2123-2127. (BAI Zhonggan,ZHOU Ying,WANG Guoyu,et al. Research on assessment of noise jamming effect against SAR based on the moving windows detection capability[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008,30(11):2123-2127.)

[ 6 ] 林建银,刘振华,于文震. SAR 点目标干扰的研究[J]. 现代雷达, 2006,28(10):38-41. (LIN Jianyin,LIU Zhenhua,YU Wenzhen. Study on the Jamming of SAR Point Target[J]. Modern Radar, 2006,28(10):38-41.)

[ 7 ] 陆洪涛,陆静,郭军. 一种基于相关测度的 SAR 干扰效果评估方法[J]. 现代防御技术, 2008,36(3):98-112. (LU Hongtao,LU Jing,GUO Jun. The Evaluation Methods of the Jamming Effect of SAR Based on the Pertinency[J]. MODERN DEFENCE TECHNOLOGY, 2008,36(3):98-112.)

[ 8 ] 刘阳,王雪松,代大海,等. 对 SAR 的余弦调相转发干扰[J]. 信号处理, 2003,25(3):362-367. (LIU Yang,WANG Xuesong,DAI Dahai,et al. A Repeater Jamming with Cosinusoidal Phase Modulation to SAR[J]. Signal Processing, 2003,25(3):362-367.)

- [9] 陈思伟,王雪松,刘阳,等. 合成孔径雷达二维余弦调相转发干扰研究[J]. 电子与信息学报, 2009,V31(8):1862-1866. (CHEN Siwei,WANG Xuesong,LIU Yang,et al. The 2D Cosinusoidal Phase Modulation Repeater Jamming of SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009,V31(8):1862-1866.)
- [10] 魏青. 合成孔径雷达成像方法与对合成孔径雷达干扰研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2006. (WEI Qing. Study of imaging methods of SAR and jamming methods against SAR[D]. Xi'an: Xidian University, 2006.)
- [11] 骆明君. 合成孔径雷达图像斑点噪声抑制与滤波[J]. 信息与电子工程, 2009,7(1):9-12. (LUO Mingjun. Speckle Filtering and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Image[J]. Information and Electronic Engineering, 2009,7(1):9-12.)

#### 作者简介:



罗 强(1966-), 男, 湖南省攸县人, 博士, 副教授, 研究方向为图像处理与信号处理. email:zhushoubao\_1001@163.com.

朱守保(1986-), 男, 江苏省徐州市人, 在读硕士研究生, 研究方向为雷达成像与干扰技术. email:zhushoubao\_1001@163.com.

童创明(1964-), 男, 湖北省黄冈市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达系统、电磁场数值计算、微波毫米波电路等.

(上接第 40 页)

#### 作者简介:



吴慧谦(1987-), 男, 山西省晋城市人, 在读硕士研究生, 主要从事卫星信号的接收处理与分析研究. email:wuhuiqian1987@126.com.

黄 焱(1964-), 男, 南昌市人, 教授, 主要从事通信信号的分析与处理相关研究.

张白愚(1965-), 男, 郑州市人, 副教授, 主要从事DVB信号的分析与处理相关研究.