

基于修正 SSIM 的 SAR 干扰效果评估方法

韩国强^{*①②} 李永祯^① 王雪松^① 邢世其^① 刘庆富^①

^①(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

^②(63892 部队 洛阳 471003)

摘要: 该文提出了一种基于修正结构相似度的合成孔径雷达干扰效果评估方法。该方法不仅巧妙地利用了结构相似度作为主客观评价的连接纽带,而且结合梯度模与人眼视觉系统多通道特性相匹配的特点,通过非线性处理得到了修正的评估指标 GSSIM。仿真结果表明,GSSIM 较均方误差、峰值信噪比及相关系数等传统评估指标具有明显的优势,不仅能够更好地反映出干扰对图像 ROI 的影响,而且能够与人类视觉系统保持高度一致,进一步提升了整套评估系统的效率和准确率。

关键词: 合成孔径雷达; 评估方法; 干扰效果; 修正结构相似度

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)03-0711-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00493

Evaluation of Jamming Effect on SAR Based on Method of Modified Structural Similarity

Han Guo-qiang^{①②} Li Yong-zhen^① Wang Xue-song^① Xing Shi-qi^① Liu Qing-fu^①

^①(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(Unit 63892 of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: In this paper, an evaluation method based on modified structure similarity of jamming effects on synthetic aperture radar is proposed. This method can not only make good use of structure similarity as juncture between the subjective and the objective evaluation methods, but also utilize the character of gradient modulus which matches with the human vision systems multichannel model, eventually, the modified evaluation index named GSSIM (Gradient Structural SIMilarity) is obtained by nonlinear combination. Simulation results show that GSSIM has an obvious advantage over traditional evaluation indexes, such as MSE, PSNR, Correlation and so on. Besides reflecting the influences of jamming on Region Of Interest (ROI) in the image, it can keep identical to Human Vision System (HVS), and furthermore, it improves the efficiency and accuracy of entire evaluation system.

Key words: SAR; Evaluation methods; Jamming effect; Modified structural similarity

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是20世纪发展起来的一种高分辨率雷达,它利用合成孔径原理和脉冲压缩技术获得距离向和方位向高分辨率遥感图像。因其具有全天候、全天时、强透射性和高分辨率等优点,已成为重要的军事侦察手段,也成为了当前电子对抗领域的一个重要的对抗对象,而SAR干扰效果评估也日益受到重视^[1-3]。

“以评估促发展”已经成为国内外诸多领域专家的一致共识。有关评估准则、评估指标和实现方法的研究,将直接影响SAR干扰装备和雷达装备的系统建设以及对它们性能的综合评价,同时对于电

子攻防对抗中双方选择合适的干扰以及抗干扰样式,有着重要的指导意义。传统的SAR干扰效果评估方法大致可以分为两大类,即主观评估方法与客观评估方法^[4]。在实际的应用中,主观评估方法不仅耗时长,而且其结果和评估者的知识面、理解水平及看问题的角度等密切相关,所以可操作性比较差;而客观评估方法则是依据数学模型给出量化指标或参数来衡量干扰前后图像质量的变化,目前应用比较广泛的客观评估指标包括均方误差(MSE)^[5,6]、峰值信噪比(PSNR)^[6]、相关系数(Correlation)^[7]、等效视数(ENL)^[8,9]、动态范围(D)^[9]及欧几里德距离^[10]等,这些定量的评估指标仅考虑了单个像素的特性或整幅图像的统计特性,一定程度上反映了干扰效果,但是却经常与人的主观感觉有所出入,直接导致评估结论的可信度比较低。因此,寻找一种与人

2010-05-18 收到, 2010-09-13 改回

国家自然科学基金重点项目(60802078)资助课题

*通信作者: 韩国强 twhgq@163.com

类视觉系统(Human Visual System, HVS)相结合的评估方法就显得尤为关键,只有定量的分析结果与人的主观感觉相一致,方能对于干扰效果作出客观、准确的评价。即使现阶段有的评估方法对外宣称其定量的评估结果能达到85%~95%的成功率,然而这样的一个评估系统在实际应用中意义仍然不大,因为哪怕与HVS出现5%的不一致,检查、判别及方法修正的工作量将使得准确率的提高变得微不足道^[11]。

近几十年来,许多研究者致力于寻找更加科学、更加合理及置信度更高的SAR干扰效果评估指标,并提出了一些主客观相结合的评估方法,譬如基于模糊推理的评估方法^[12]、基于神经网络的评估方法^[13]等,但这些方法大都停留在理论研究层面,并未投入工程实践。正是在这种需求背景下,本文通过引入结构相似度(SSIM)作为人眼主观感受与图像客观评价指标之间的连接纽带,并分析了它在实际应用中的优缺点,结合梯度模与人眼视觉系统多通道特性相匹配的特点,进而提出了一种基于修正结构相似度的评估方法,并得到了相应的评估指标GSSIM(Gradient Structural SIMilarity)。由于该方法较之传统评估手段能够更好地保持与HVS的一致性,因此得到的评估结论置信度更高。

2 基于结构相似度的干扰效果评估方法

假设SAR的原始图像数据为 X ,受到干扰后的图像数据为 Y ,那么可以通过以下3方面的比较实现对两图像结构相似程度的度量。

亮度比较:

$$L(X,Y) = \frac{2\mu_X\mu_Y + C_1}{\mu_X^2 + \mu_Y^2 + C_1} \quad (1)$$

对比度比较:

$$C(X,Y) = \frac{2\sigma_X\sigma_Y + C_2}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + C_2} \quad (2)$$

结构比较:

$$S(X,Y) = \frac{\sigma_{XY} + C_3}{\sigma_X\sigma_Y + C_3} \quad (3)$$

其中 μ_X , μ_Y 表示 X , Y 图像的均值,反映干扰前后图像的亮度信息; σ_X , σ_Y 表示 X , Y 图像的方差,反映干扰前后图像的对比度信息; σ_{XY} 表示 X , Y 图像的协方差,反映干扰前后图像结构信息的相似性。 C_1 , C_2 , C_3 是为了避免分母为零而设定的极小值常数, $C_1 = (K_1L_{\text{ref}})^2$, $C_2 = (K_2L_{\text{ref}})^2$, $C_3 = C_2/2$, L_{ref} 为图像中像素灰度的变化范围(对8 bit的灰度图像而言, $L_{\text{ref}}=255$)。

那么,干扰前后图像的结构相似度可定义为^[14-20]:

$$\text{SSIM}(X,Y) = [L(X,Y)]^\alpha \cdot [C(X,Y)]^\beta \cdot [S(X,Y)]^\gamma \quad (4)$$

经过统计分析,为了达到理想的评估效果,一般取 $K_1 = 0.01$, $K_2 = 0.03$, $L_{\text{ref}} = 255$;而参数 $\alpha > 0$, $\beta > 0$, $\gamma > 0$,反映了亮度、对比度及结构信息在SAR图像中的权重。在实际应用中,由于SAR图像的整体结构特征相对比较复杂,往往不能直接对于干扰前后两幅图像的结构进行比较,而采取滑窗的形式来对图像进行互不重叠的分块操作,那么利用式(4)可以求出每块图像的结构相似度 $\text{SSIM}(x,y)$,然后根据式(5)可以求出两幅图像的平均结构相似度MSSIM,即

$$\text{MSSIM}(X,Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{SSIM}(X_i,Y_i) \quad (5)$$

其中 N 表示分块总数。

SSIM方法(在本文中,SSIM特指MSSIM)虽然比较全面地利用了SAR干扰前后图像的整体结构信息,并且较MSE, correlation与PSNR等方法也有明显的优势,但是它似乎更加侧重图像的边缘结构特征,而对图像的细节纹理特征还欠缺考虑^[21]。那么,如果SAR的干扰能量集中在图像的细节层面,将会产生与人类视觉不匹配的结果。因此,需要在此基础上进行修正,提出一些能够全面反映图像信息的评估指标,这样的评估结论可信度才会更高。

3 基于修正结构相似度的干扰效果评估方法

众所周知,人眼对图像的细节信息往往比较敏感,而梯度可以很好地反映出图像中微小的细节反差和纹理特征变化,可以用来评价图像的清晰程度,因此文中利用梯度模对SSIM加权,建立了修正结构相似度算法的理论模型。

由场论可知,梯度定义如下:设 $u(P)(P \in D)$ 是给定的数量场,并假定它具有连续偏导数。那么,向量 $\left(\frac{\partial u(x,y,z)}{\partial x}, \frac{\partial u(x,y,z)}{\partial y}, \frac{\partial u(x,y,z)}{\partial z}\right)$ 称为所给数量场在 $P(x,y,z)$ 处的梯度,记作 gradu 。于是

$$\text{gradu} = \frac{\partial u}{\partial x} e_1 + \frac{\partial u}{\partial y} e_2 + \frac{\partial u}{\partial z} e_3 \quad (6)$$

根据上述定义,设原始图像数据为 X ,像素坐标为 (i,j) ,则坐标 (i,j) 处的梯度为

$$\text{grad}[X(i,j)] = \frac{\partial X}{\partial i} e_1 + \frac{\partial X}{\partial j} e_2 \quad (7)$$

如果用 $G_x(i,j)$ 表示 $\text{grad}[X(i,j)]$ 的模值,那么,

$$G_x(i, j) = \left[\left(\frac{\partial x(i, j)}{\partial i} \right)^2 + \left(\frac{\partial x(i, j)}{\partial j} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

为了运算的方便, 梯度模 $G_x(i, j)$ 可做如下近似:

$$G_x(i, j) = \left| \frac{\partial x(i, j)}{\partial i} \right| + \left| \frac{\partial x(i, j)}{\partial j} \right| \quad (9)$$

由梯度的性质可知, $\text{grad}[X(i, j)]$ 的方向是指向 $X(i, j)$ 增加的方向, 而图像边缘的方向垂直于这个梯度方向。那么, 如果 $G_x(i, j)$ 越大, 表明该像素点与领域梯度变化越大, 边缘越明显, 图像的对比值越好。

梯度模算子 $G_x(i, j)$ 的计算方法很多, 譬如 Roberts 算子、Sobel 算子及差分近似表达式等。文中采用 Sobel 算子来进行近似计算, 该算子包括水平边缘算子 G_x 和垂直边缘算子 G_y , 如下图 1 所示:

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

(a) x 方向算子 G_x

1	0	-1
2	0	2
1	0	-1

(b) y 方向算子 G_y

图 1 Sobel 算子

SAR 干扰前后的图像 X 与 Y 的梯度相似度 $g(X, Y)$ 为

$$g(X, Y) = \frac{2 \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M G_X(i, j) G_Y(i, j) + C_3}{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M [G_X(i, j)]^2 + \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M [G_Y(i, j)]^2 + C_3} \quad (10)$$

式中 $G_x(i, j)$ 、 $G_y(i, j)$ 分别表示干扰前后图像在 (i, j) 点处的梯度模。

将式(4)中的结构比较函数 $S(X, Y)$ 用梯度相似度 $g(X, Y)$ 代替, 就得到基于梯度修正结构相似度的评价指标 GSSIM, 即

$$\text{GSSIM}(X, Y) = [L(X, Y)]^\alpha \cdot [C(X, Y)]^\beta \cdot [g(X, Y)]^\gamma \quad (11)$$

同样, 利用滑窗分块的原理, 可求得每块图像的 GSSIM, 再求它们的平均值, 即

$$\text{MGSSIM}(X, Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{GSSIM}(X_i, Y_i) \quad (12)$$

显然, 评估指标 MGSSIM 较 MSSIM 更加注重干扰前后图像细节信息的相似性, 更加符合 HVS。但实际上, 由于人眼对干扰前后的图像存在感兴趣区域(ROI), 而式(5)中各项指标权重的划分也是模

糊的, 因此将 MGSSIM 作为评估指标仍然是不够完整的。为了突出反映视觉的 ROI 特性, 需要适当地调整分块图像的权重比例。其具体表达式如下:

$$\text{WMGSSIM}(X, Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \cdot \text{GSSIM}(X_i, Y_i) \quad (13)$$

其中 N 表示图像的滑窗分块数, w_i 表示每块图像的权值。

$$w_i = \frac{\sigma_{X_i}}{\sum_{i=1}^N \sigma_{X_i}} \quad (14)$$

其中 σ_{X_i} 表示 SAR 原始图像 X 中第 i 块的方差值, 主要反映的是图像 ROI 的对比值信息。

4 实验结果及分析

在该仿真评估实验中, 选取对比的评估指标分别为 MSE, PSNR, Correlation 及 SSIM, 其滑窗分块采用的是 3×3 的模板。设 $\mathbf{F} = \{f(x_i, y_i)\}_{i=0, j=0}^{m, n}$ 和 $\mathbf{G} = \{g(x_i, y_i)\}_{i=0, j=0}^{m, n}$ 分别为平面 $\mathbf{S} = \{(x_i, y_i)\}_{i=0, j=0}^{m, n}$ 上干扰前与干扰后图像的灰度, 那么, MSE, PSNR 及 Correlation 的定义式分别如下:

$$\text{MSE} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |f(x_i, y_j) - g(x_i, y_j)|^2 \quad (15)$$

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{L_{\text{ref}}^2}{\text{MSE}} \quad (16)$$

$$\text{Correlation} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m f(x_i, y_j) g(x_i, y_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m f^2(x_i, y_j) \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g^2(x_i, y_j)}} \quad (17)$$

其中 $m \times n$ 表示图像切片的大小, $L_{\text{ref}} = 255$ (8 bit 灰度图像)。由于 SSIM 的定义在前面已经介绍, 在此不再赘述。

该仿真实验数据来自美国 Sandia 国家实验室的 MiniSAR 系统。仿真对单视复图像的图像域进行处理, 模拟特定战情下的干扰样式所造成的成像质量下降, 然后评估该类型的干扰效果。由于实验中要全面地考察干扰对目标的遮盖效果、干扰对图像背景的影响及干扰与周围区域纹理的匹配程度, 而且没有先验的信息作支撑, 因此可以将亮度、对比值及结构信息的权重都设为 1。为了能够对该方法作出客观准确的评价, 该仿真过程设计了 3 个实验, 实验 1: 分析该方法的有效性; 实验 2: 通过与传统评估指标的对比, 验证该方法的优势; 实验 3: 结合复杂的干扰效果, 验证该方法与 HVS 的一致性。

实验 1 验证该方法的有效性

首先在 MiniSAR 原始图像数据中加入一定量的噪声扰动, 干信比(JSR)依次为 10 dB、15 dB 及

25 dB, 然后重新合成新的图像, 主要用来模拟噪声调幅干扰信号对 SAR 图像的干扰效果。由于 JSR 不同, 所以可用来验证该评估方法的有效性能。其成像结果如图 2 所示。

评估结果如表 1 所示。

表 1 实验 1 评估结果

	图 2(b)	图 2(c)	图 2(d)
MSE	103.0995	113.8653	119.6876
PSNR	64.4683	63.4751	62.9764
Correlation	0.9615	0.8923	0.8295
SSIM	0.2467	0.0535	0.0126
MGSSIM	0.1593	0.0672	0.0333
WMGSSIM	0.1618	0.0686	0.0341

根据图 2 的成像结果来看, 干扰后的几幅图像之间存在着明显质量差异, 随着 JSR 的增大, 图像变得逐渐模糊。表 1 的评估结果同样表明, 基于 GSSIM 的评估方法(在本文中, 除特别说明时, 将 MGSSIM 和 WMGSSIM 统称为 GSSIM)与其他传统的评估指标(譬如 MSE, PSNR, Correlation 及 SSIM)具有相同的有效性能, 随着 JSR 的逐渐增大, GSSIM 逐渐减小。

实验 2 验证该方法的优势

为了更好地考察该评估方法较传统评估方法的优势, 该仿真实验首先将干扰分布于 SAR 图像的不同区域, 图 3(a)中的干扰主要集中于细节纹理区域, 该区域包含的信息相对比较多, 同时也是人眼视觉的 ROI; 图 3(b)中的干扰主要集中于简单纹理区域, 图像包含的信息比较少。因此, 可以通过对此特定战情下的干扰效果进行评估, 分析 GSSIM 方法较之传统评估手段(譬如 MSE, PSNR, Correlation 及 SSIM)的优势。此外, 还可以通过对比 MGSSIM 与 WMGSSIM 的评估结果, 分析 WMGSSIM 对 ROI 的评估能力。评估结果如表 2 所示。

表 2 实验 2 评估结果

	图 3(a)	图 3(b)
MSE	34.9786	34.9429
PSNR	75.2779	75.2881
Correlation	0.9683	0.9677
SSIM	0.3294	0.3285
MGSSIM	0.4195	0.6840
WMGSSIM	0.3997	0.7175

根据图 3 的成像结果来看, 图 3(a)中的干扰主要掩盖的是军事仓库、导弹车及军事卡车等灰度起伏比较大的典型军事目标, 即人眼视觉的 ROI, 干扰的总体效果比较理想。而图 3(b)中的干扰主要掩盖的是草坪、公路等灰度起伏比较小的非军事目标, 干扰效果一般。表 2 的评估结果表明, 无论是 MSE, PSNR 或者是 Correlation 都无法反映出图 3(a)与 3(b)中干扰的优劣性能, 因为它们的结果相对较近似。GSSIM 的评估方法较前面的评估指标则有明显的优势, 二者的结果能够准确地反映出干扰效果的好坏, 证实该方法能够准确反映出干扰前后 SAR 图像之间的细微差异, 达到了预期的效果。而且, 通过比较图 3(a)与 3(b)中所对应的评估指标 MGSSIM 及 WMGSSIM 的结果差值, 发现 WMGSSIM 的差值比较大, 证实它对 ROI 的评估能力比较强。

实验 3 验证该方法与 HVS 的一致性

为了验证该方法与 HVS 的一致性, 该仿真实验分析了两种相对比较复杂的干扰样式, 图 4(a)中的干扰能量分布于视觉相对比较敏感的水平 and 垂直方向, 主要用来模拟复合噪声干扰样式; 图 4(b)中的干扰效果是形成一种等间隔的亮条纹, 主要用来模拟脉间不相干的固定移频干扰, 这种干扰样式虽然兼具压制与欺骗的干扰效果, 但是考虑到与周围区域纹理的匹配, 主要被用来实现压制干扰的目的。这两种典型的战情无疑是考量干扰效果评估方法性

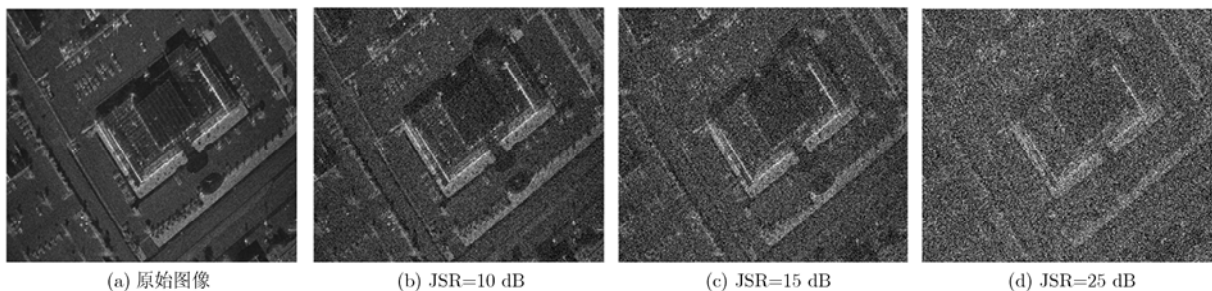


图 2 SAR 干扰前后的图像

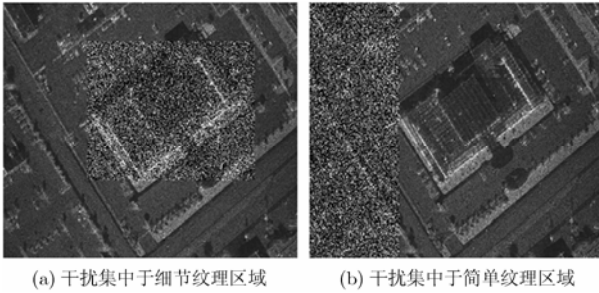


图 3 SAR 干扰图像

能的良好选择。

评估结果如表 3 所示。

表 3 实验 3 评估结果

	图 4(a)	图 4(b)
MSE	1.6955	5.2942
PSNR	105.5455	94.1592
Correlation	0.8497	0.8996
SSIM	0.0008	0.0010
MGSSIM	0.2133	0.6855
WMGSSIM	0.2137	0.6880

根据图 4 的成像结果来看,图 4(a)中的信息已经基本上被干扰掩盖了,只有军事仓库的边缘轮廓还能被识别,干扰的整体效果比较理想;图 4(b)和干扰前的图像相比,信息丢失量并不严重,军事仓库、导弹车、军事卡车等重要军事目标仍然清晰可见,干扰未达到预期的效果。表 3 的评估结果表明,如果利用 MSE 或 PSNR 作为评估指标,图 4(b)的干扰效果更佳,明显与 HVS 不一致;如果利用 Correlation 与 SSIM 作为评估指标,图 4(a)与图 4(b)的干扰效果近似,无法准确反映出肉眼明显可察觉的图像质量差异;如果采用 GSSIM 作为评估指标,可以发现图 4(a)的干扰明显优于图 4(b)的干扰,与 HVS 完全一致,该方法明显提高了评估的准确率。

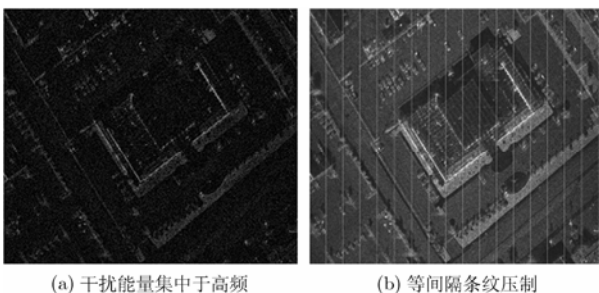


图 4 SAR 干扰图像

5 结论

本文提出的基于梯度修正结构相似度的评估方法,能够在客观评价与主观感受上建立一定的联系,反映的是一种典型的主客观相结合的评估理念。该方法不仅在准确率方面优于传统的评估手段,而且在与人的视觉感知质量保持一致性方面明显做得更好,使得整套评估系统更加高效,能够应对 SAR 对抗应用研究中干扰效果客观评价日益严峻的形势。另外较之以往通过模糊推理及神经网络的算法,该方法的复杂程度更低,更易于工程实现。

参考文献

- [1] Durand R, Ginolhac G, and Thirion L, *et al.* New SAR processor based on matched subspace detectors[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(1): 221-236.
- [2] 韩征, 苏志刚, 韩萍, 等. 基于样本正交子空间的 SAR 目标识别算法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(11): 2581-2584. Han Zheng, Su Zhi-gang, and Han Ping, *et al.* SAR target recognition method based on orthogonal subspace of samples[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(11): 2581-2584.
- [3] 刘爱平, 付琨, 尤红建, 等. 基于 MAR-MRF 的 SAR 图像分割方法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(11): 2557-2562. Liu Ai-ping, Fu Kun, and You Hong-jian, *et al.* SAR image segmentation based on multiscale autoregressive and markov random field models[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(11): 2557-2562.
- [4] Wu Xiao-fang, Dai Da-hai, and Wang Xue-song, *et al.* Evaluation of SAR jamming performance[C]. MAPE2007, Hangzhou, 2007: 1476-1479.
- [5] Marmolin H. Subjective MSE measures[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1986, 16(3): 486-489.
- [6] Santiago Aja-Fernandez, Raul San Jose Estepar, and Carlos Alberola-Lopez, *et al.* Image quality assessment based on local variance [C]. Proceedings of 28th IEEE EMBS Annual International Conference New York City, USA, 2006: 4815-4818.
- [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): 97-99. Lu Hong-tao, Lu Jing, and Guo Jun. The evaluation methods of the jamming effect of SAR based on the pertinency[J]. *Modern Defence Technology*, 2008, 36(3): 97-99.
- [8] 张孝乐, 李立萍, 杨晓波. 基于图像质量指标的 SAR 干扰效能评估研究[J]. *电子对抗*, 2005, (5): 22-25. Zhang Xiao-le, Li Li-ping, and Yang Xiao-bo. Research on the evaluation of SAR jamming efficiency based on the image

- quality guidelines[J]. *Electronic Warfare*, 2005, (5): 22-25.
- [9] 谢虹, 汪连栋, 袁翔宇. 对SAR的噪声干扰效果评估研究[J]. 航天电子对抗, 2003, (3): 15-17.
- Xie Hong, Wang Lian-dong, and Yuan Xiang-yu. Research on the evaluation methods of the noise jamming on SAR[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2003, (3): 15-17.
- [10] 马俊霞, 蔡英武, 张海. 一种SAR压制干扰效果评估方法[J]. 现代雷达, 2004, 26(10): 4-6.
- Ma Jun-xia, Cai Ying-wu, and Zhang Hai. An technique evaluating of the barrage jamming effect on SAR[J]. *Modern Radar*, 2004, 26(10): 4-6.
- [11] 马林. 高分辨雷达目标识别系统技术研究[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2633-2638.
- Ma Lin. High resolution radar recognition system research[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(12): 2633-2638.
- [12] 焦逊, 陈永光, 李修和. 基于模糊推理的SAR干扰效果评估[J]. 雷达科学与技术, 2006, 4(4): 197-201.
- Jiao Xun, Chen Yong-guang, and Li Xiu-he. Assessing of jamming effect on SAR based on fuzzy reasoning[J]. *Radar Science and Technology*, 2006, 4(4): 197-201.
- [13] 刘鹏军, 马孝尊, 武忠国, 等. 基于BP神经网络的SAR干扰效果评估[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(2): 88-90.
- Liu Peng-jun, Ma Xiao-zun, and Wu Zhong-guo, et al. SAR jamming effect evaluation based on BP neural network[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2009, 29(2): 88-90.
- [14] 杨春玲, 高文瑞. 基于结构相似的小波域图像质量评价方法的研究[J]. 电子学报, 2009, 37(4): 845-849.
- Yang Chun-ling and Gao Wen-rui. Research on image quality assessment in wavelet domain based on structural similarity[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(4): 845-849.
- [15] Wang Zhou, Bovik A C, and Sheikh H R, et al. Image quality assessment from error visibility to structure similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [16] Privitera C M and Stark L W. Algorithms for defining visual regions of interest comparison with eye fixation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(9): 970-980.
- [17] Damera-Venkata N, Kite T D, and Geisler W S, et al. Image quality assessment based on a degradation model[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(4): 636-650.
- [18] Winkler S. Issues in vision modeling for perceptual video quality assessment[J]. *Signal Processing*, 1999, 78(3): 231-252.
- [19] Karunaseka S A. A distortion measure for blocking artifacts in image based on human visual sensitivity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, 4(6): 713-724.
- [20] Blanding W R, Koch W, and Nickel U. Adaptive phased-array tracking in ECM using negative information[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(1): 152-166.
- [21] Pan Xiao-zhou, Yang Chun-ling, and Xie Sheng-li. An improved structural similarity for image quality assessment [C]. Proceedings of SPIE, Wuhan, 2005: 60441I-1-60441I-9.
- 韩国强: 男, 1982年生, 硕士生, 研究方向为SAR信号处理、SAR干扰效果评估.
- 李永祯: 男, 1977年生, 副教授, 研究方向为极化信息处理、雷达电子战及目标识别等.
- 王雪松: 男, 1972年生, 教授, 研究方向为雷达极化信息处理、雷达电子战等.
- 邢世其: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、雷达对抗仿真及雷达极化信息处理.
- 刘庆富: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为雷达对抗仿真、信号处理及目标检测识别.