

基于小波域加权结构相似度的 SAR 干扰效果评估

刘 阳 代大海 王雪松

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要: 本文根据结构相似度指标以及人眼视觉系统 (HVS) 特性, 提出了一种合成孔径雷达 (SAR) 干扰效果评估方法。该方法在小波域内计算每个子频带的结构相似度 (SSIM), 并且根据 HVS 的对比敏感度函数 (CSF), 对各个子频带的结构相似度进行加权, 最终获得小波域加权的结构相似度 (WWSSIM) 评估指标。通过计算机仿真证明: 该评估指标不仅能够衡量干扰对图像的扰动量, 而且比传统的能更好地反映人眼对图像质量的主观感受, 还能反映干扰能量在图像不同位置分布时图像的信息损失量。

关键词: SAR; 评估; 结构相似度; 人眼视觉系统; 对比敏感度函数; 小波域

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)10-1577-06

Evaluation of Jamming Effect on SAR Based on Structural Similarity in Weighted Wavelet Domain

LIU Yang DAI Da-hai WANG Xue-song

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

Abstract: In this paper, a new evaluation method for synthetic aperture radar (SAR) jamming is proposed. This method is mainly based on the concept of structure similarity index and its characteristic feature is consistent with perceptual property of human visual system (HVS). Firstly the jammed image and the primitive image are wavelets decomposed; secondly structure similarities are calculated for each sub-band in wavelet domain and each sub-bands' structure similarity is weighted by contrast sensitivity function; at last it comes to the final evaluation index by summing up all weighted structure similarities. Simulation results shows that this index can not only measure the amount of the disturbance between the jammed and the primitive SAR image, but also reflect how people's subjective feelings to the image quality in a better way compared with ordinary evaluation index, and reflect the difference of information loss when the interfere energy distributes in different regions in the image.

Key words: SAR; evaluation; structural similarity; human visual properties; contrast sensitivity function; wavelet domain

1 引言

合成孔径雷达 (SAR) 作为重要的军事侦察手段, 已成为当前电子对抗领域的重要研究对象。对 SAR 进行干扰的主要目的是通过破坏其成像机制或降低其图像质量来阻止敌方从图像中获得有价值信息。

SAR 干扰效果的评估一般分为客观评价和主观评价两大类。主观评价方法难以应用数学模型进行描述, 且受评估个体差异影响较大, 很难在实际应用中采用。而传统上客观评价方法常用的峰值旁瓣比、积分旁瓣比、等效视数^{[1][3]}、目标识别率^[4]、干扰功率等廓线^[5]、欧氏距离^[6]、相关系数^[7]、熵等^{[8][9]}评估指标仅考虑了单个像素的特性或者所有像素的统计特性, 不

太符合人的主观感受。

应该说, 任何图像不是像素点的简单集合。对图像的认识或评价是由感觉和心理状态决定的, 即, 与图像内容和观察者的视觉心理因素有关。SAR 图像最终的信宿是人, 那么更理想的 SAR 干扰效果评估方法也必须考虑人的视觉和心理特性, 把主观与客观的评价方法有机结合起来。已有的尝试方法是: 将若干客观评价指标作为输入条件, 主观评价等级作为输出结果, 两者通过神经网络模型进行连接^[10]。这种方法需要大量的样本进行训练, 计算也相对复杂得多。而基于模糊推理的指标集融合计算方法也相当复杂^[11]。

静态图像在传输、编码等方面发展了大量的评估指标, 本文借鉴静态图像评估中的结构相似度 (SSIM)

这个与主观感受相关性高的评估方法,利用小波变换与人类视觉系统(HVS-Human Visual System)的多通道特性相匹配的特点,并且选取符合人眼带通特性的对比敏感度函数CSF作为小波域各子带加权系数,提出一种小波域加权的结构相似度SAR干扰效果评估方法。计算机仿真实验表明:该方法相对于传统的评估方法更符合人眼对SAR图像质量的主观感受;与已有的一些结合HVS特性的静态图像评估方法相比,能够反映干扰能量在不同空间、不同频率分量分布时,人眼主观感受的差异;同时该评估方法计算简便。

本文在第二部分介绍图像结构相似度的评估方法;第三部分介绍人眼视觉系统的对比敏感度特性;第四部分分析了小波分解与人眼视觉多通道的一致性;第五部分引入了基于对比敏感度函数加权的小波域结构相似度评估方法;最后给出实验结果。

2 图像结构相似度(SSIM)

Wang等提出了基于结构相似度的图像质量评价方法^[12](SSIM),其基本思想是:人类视觉系统的主要功能是从视觉区域提取图像的结构信息,它比较两幅图像的相似度,而不是差值,获得图像的相似结构映像,从而得到客观预测质量分。SSIM将图像分成亮度,对比度,结构,分别进行比较,然后加权乘积获得结构相似值。其数学表达式如下:

$$SSIM(x, y) = [\mu(x, y)]^\alpha [\sigma(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma \quad (1)$$

其中 x, y 分别代表原图像与降质之后的图像; α, β, γ 分别为加权指数;

$$\mu(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (2)$$

$$\sigma(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (3)$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (4)$$

分别代表亮度、对比度和结构信息的比较; μ 与 σ 是图像中像素灰度的均值与标准差; σ_{xy} 是两图像对应像素点的协方差; C_1, C_2, C_3 是为了避免分母为零设定的极小值常数, $C_1 = (K_1L)^\beta, C_2 = (K_2L)^\beta, C_3 = C_2/2, K_1 \ll 1, K_2 \ll 1, L$ 为像素的动态范围(即量化灰度的最大表征范围)。

对图像进行质量评估的时候,可以将图像根据经验分成 M 个子块(可重叠或不重叠),求得各个子块的SSIM之后再行平均,得到平均结构相似度

$$MSSIM(X, Y) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M SSIM(x_i, y_i) \quad (5)$$

MSSIM值越高表明图像质量损失越少;相对于SAR对

抗领域,图像质量损失越少则说明干扰效果不好。但是由于子块大小的选择不同也会造成明显的分块效应。

3 HVS基本模型

尽管目前对人眼视觉系统还没有一个全面深入的理论认识,但心理学及生理学实验在这方面的研究已经取得了一系列的发现。其中,视觉敏感度带通特性的模型由对比敏感函数(contrast sensitivity function, CSF)来表征。不同试验所得的CSF函数形式各异,但基本上都认为HVS的对比敏感度是空间频率的函数,具有带通滤波器的性质,且为各向异性。Mannos和Sakrison等人已通过大量的实验建立的CSF的近似曲线^[13]:

$$A(f) = 2.6 \times (0.192 + 0.114f) \exp[-(0.114f)^\beta] \quad (6)$$

式中 $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ 为空间频率,单位周期/度。其中 f_x 和 f_y 分别为水平方向和垂直方向的空间频率。考虑到水平方向和垂直方向分别有 $f_y = 0$ 以及 $f_x = 0$,因此这两个方向上的CSF函数即为式(6)的表达形式。而对角线上有 $f_y = f_x, f_d = \sqrt{2}f_x = \sqrt{2}f_y$,因此对角线方向上的CSF函数变为^[14]:

$$A(f) = 2.6 \times (0.192 + 0.114\sqrt{2}f) \exp[-(0.114\sqrt{2}f)^\beta] \quad (7)$$

图1给出了不同方向下的CSF归一化曲线。

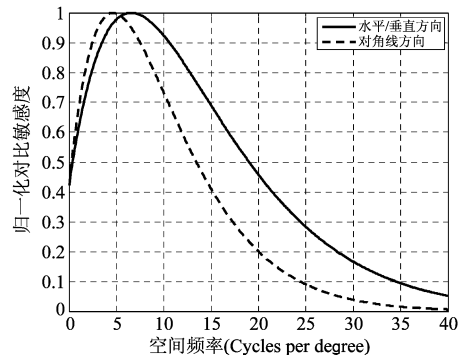


图1 不同方向下的归一化对比度函数曲线

由图1可见:HVS的敏感区间主要在中低频,峰值大约在3-6(周期/度),而空间频率高于40周期/度则几乎不敏感。

4 小波域的结构相似度

在图2中示意了一个图像的2级小波分解。原始图像首先分解为低频信息L与高频信息H,然后分解低频信息L为低频部分LL1与其高频部分LH1,对于信息

H,重复同样的手段得到 HL1 与 HH1,如果需要,此过程可以反复依次类推下去。其中 LH 代表了该小波子空间图像的水平方向细节,HL 代表了垂直方向细节,HH 代表了对角线方向细节。小波分解的一个最大特点是只对低频空间进行高低频对半分解。各频带都是原图像不同分辨率的子图,保持着原图像的基本轮廓。而轮廓是图像最重要的结构信息。因此小波变换不会损失图像的结构信息,只是结构信息的不同表现形式。所以把 SSIM 用在小波域仍然具有它本来的物理意义^[15]。

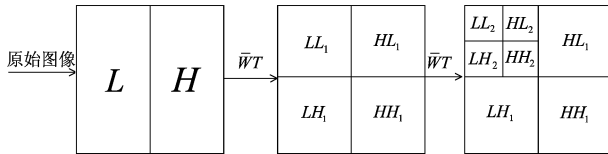


图 2 2 级小波分解示意图

对初级视皮层细胞感受器实验测试表明^[16]:HVS 由相邻的多个并列视觉通道构成。这些通道的空间频率带宽约为一个倍频程。它们具有线性或正交相位、位移不变性、一致的频率响应和多尺度性,对水平和垂直方向的刺激最敏感,而向对角方向敏感性逐渐减弱,在 45 度或 135 度方向处最不敏感。

HVS 的倍频程特征与方向选择性恰好与小波分解的特性具有高度的一致性,这就意味着使用一组二维小波分解构造不同方向上的多分辨滤波器,可对此进行有效的模拟,并且在实际应用中可取得较高的计算效率^{[13][15]}。

5 小波域结构相似度和 CSF 加权的评估方法

SAR 图像是一个灰度图像,人眼从图像上信息获取也是通过其明暗变化、几何形状、纹理细节等特性,并结合目标的电磁特性共同获得的。而 SAR 干扰就是通过电磁信号的伪装、遮盖重要区域在图像上的正常表达,从而扰乱或者阻止侦察方的信息获取。因此将结构相似度评估方法转变到小波域,并利用 CSF 加权,形成 CSF 加权的小波域结构相似度的评估方法 (WWSSIM-Weighted Wavelet domain SSIM),用于 SAR 干扰效果评估。

对 CSF 曲线进行初步处理,以便获得各个子频带的加权系数。

首先将其空间频率转换为归一化空间频率。因为空间频率是一个与视角有关的函数,而视角又是图像尺寸、观测距离的函数^[17],将空间频率归一化使其不受外在条件影响:

$$f(\text{周期/度}) = f_N(\text{周期/像素}) \cdot f_s(\text{像素/度}) \quad (8)$$

其中 $f \in [0, 0.5f_s]$, 所以 $f_N \in [0, 0.5]$ 即为归一化的空间频率。

由于本文引入的 WWSSIM 考虑进行 5 级小波分解,按照倍频程的关系将 CSF 离散化,对每一频程内的 CSF 函数取其均值作为离散频程内的绝对加权值。

经过以上初步处理后的离散化、归一化空间频率的 CSF 函数曲线如图 3 所示。

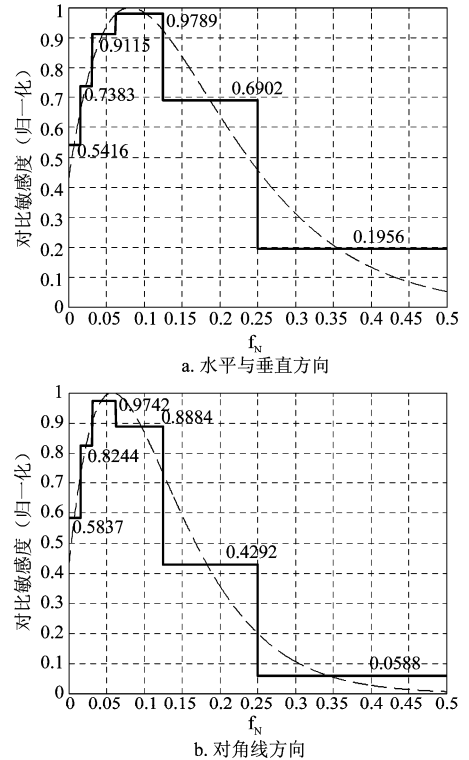


图 3 不同方向空间频率归一化 CSF 曲线及其离散频程加权系数

那么 WWSSIM 评估指标计算方法如下:

1. 对 SAR 原图像与干扰后的图像分别进行 5 级小波分解。
2. 对分解后的低频分量 LL, 令加权值归一化为 1。将离散化处理的 CSF 系数,根据各自与 LL 分量的比例计算不同方向上每一级小波分解分量的加权系数 w_i ,取值如表格 1 所示。

表格 1 不同频带及方向的加权系数

小波级数	HL, LH 加权系数	HH 加权系数
1	0.3351	0.1007
2	1.1825	0.7353
3	1.6771	1.5220
4	1.5616	1.6690
5	1.2649	1.4124

3. 利用式(1)-(4)计算干扰后的图像与原始图像在不同小波频带内的相似度,取指数加权因子 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 。

4. 将第3步计算所得加权求和得整个图像的 WWSSIM。

$$WWSSIM(X, Y) = \frac{1}{K} \frac{\sum_{i=1}^6 w_i \cdot wwssim_i(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^6 w_i} \quad (9)$$

其中 K 为归一化常量因子。

若 WSSIM 指标越大,则说明被干扰图像在视觉上与未被干扰的原图像之间的相似性越好,干扰效果较差;反之则代表干扰效果较好。

6 实验结果

选取某地 X 波段机载 SAR 的实测数据,取得大小为 1024×1024 的图像切片。原图如图 4. a 所示。进行对比的评估指标为均方误差(MSE),该指标计算方法为

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |f_{ij} - g_{ij}|^2 \quad (10)$$

其中 $\{f_{ij}\}$ 和 $\{g_{ij}\}$ 分别代表干扰图像与原图像的灰度,图像大小 $M \times N$ 。而 SAR 干扰评估常用的另一个指标——欧几里得空间距离的表达式为

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |f_{ij} - g_{ij}|^2} \quad (11)$$

可见这两种指标从本质上都是反映干扰能量造成像素绝对变化的统计量。对 SAR 干扰效果的度量,这两种指标认为:评估指标值越大干扰效果越好。另一个对比的评估指标为相关系数,其定义为

$$C = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_{ij} \times g_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f_{ij})^2 \times \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (g_{ij})^2}} \quad (12)$$

$\{f_{ij}\}$ 和 $\{g_{ij}\}$ 分别定义为被干扰 SAR 图像和原始 SAR 图像的灰度值。另外,在小波分解的每个子频带求取 CSF 加权的 MSE,最后利用 Minkowski 进行子频带指标合并,形成评估指标小波加权均方误差(WWMSE)^[13]。该指标也是一种能够反映人类视觉主观感受的静态图像评估方法。

以上所述三种评估方法将一并与 WWSSIM 进行对比试验。

实验 1:首先在原始回波数据中加入噪声调相信

号,干信比依次为 30dB、36dB 和 42dB。第 4 次试验将 36dB 干信比成像后的图像亮度提高 3 倍。成像结果依次为图 4 中的 a、b、c、d 4 幅子图像所示。

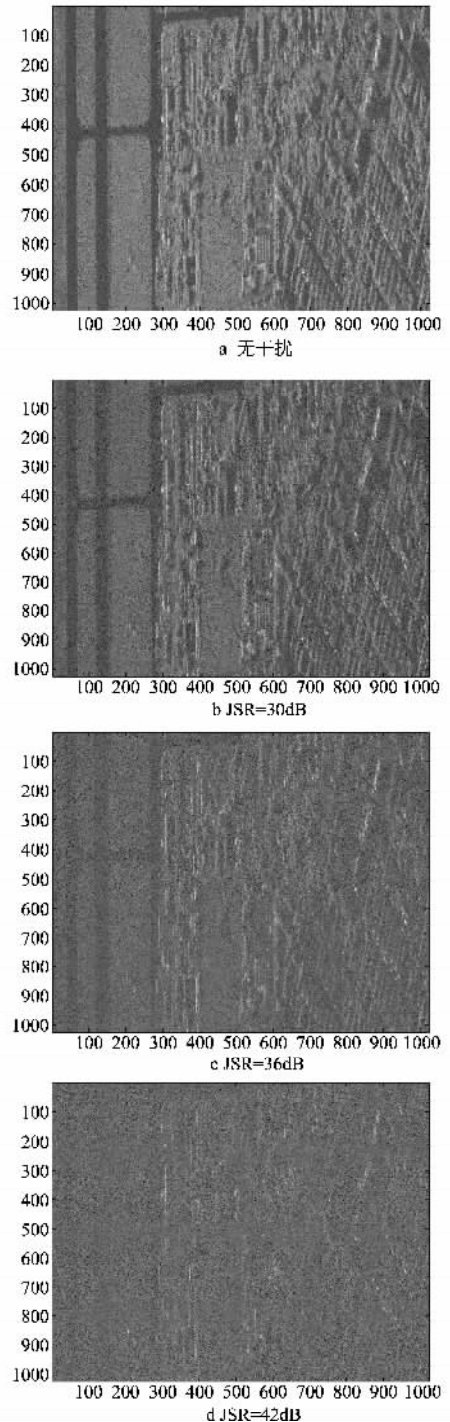


图4 无干扰及噪声调相干扰成像结果

评估结果如表格 2 中所示。该组实验表明:结合 HVS 特性的评估方法(WWMSE、WWSSIM)与其他客观评估指标一样,能反映干扰能量的增加而造成的图像质量恶化。

表格 2 实验 1 评估结果

	a	b	c
MSE	0.061	0.337	1.858
Correlation	0.970	0.906	0.813
WWMSE	24.423	223.408	1506.1
WWSSIM	0.953	0.854	0.633

为了更好的考察人眼主观感受与评估指标之间的联系,实验 2 在仿真没有对实测数据加入某一种实际的干扰样式,而是在图像域对其进行处理,模拟某一特定类型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。

考虑以下三种情况:1. 干扰能量在图像上不同分布空间;干扰能量在不同小波子频带分布;3. 干扰能量在水平、垂直空间频率分布或者在对角线空间频率分布。三组实验成像结果分别如图 5-图 7 所示。

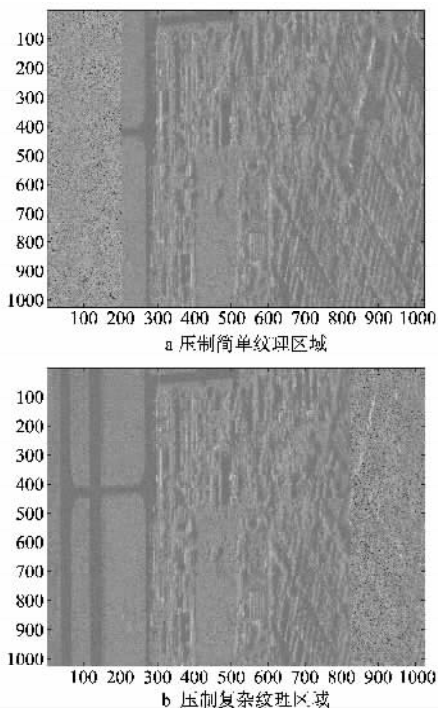


图 5 干扰能量不同分布空间

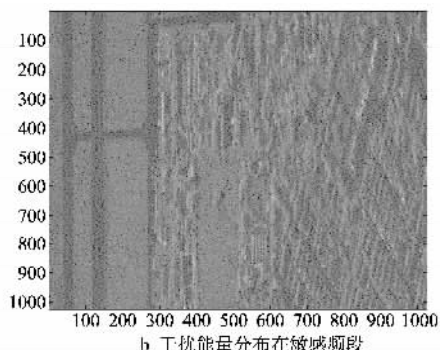
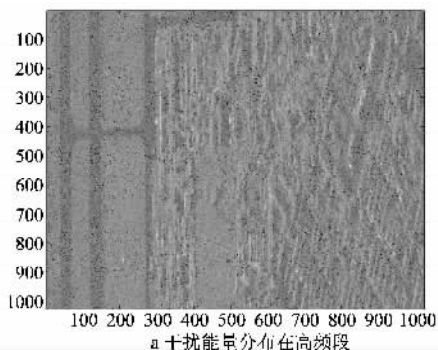


图 6 干扰能量在图像不同子频带分布

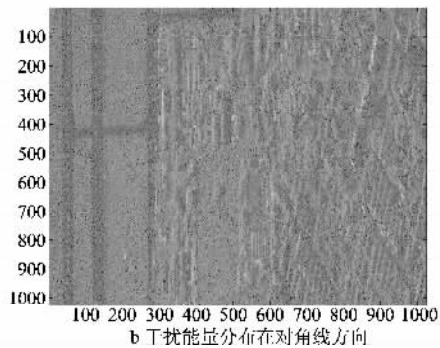
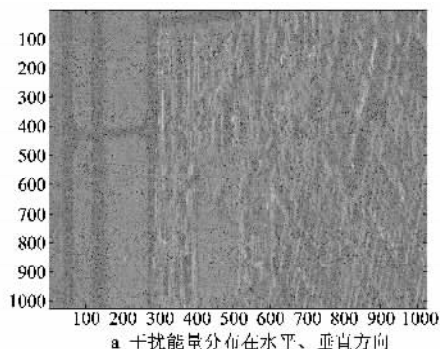


图 7 干扰能量在图像不同方向上分布

实验 2 的三组评估结果汇总于表格 3。

表格 3 实验 2 评估结果汇总

	A		B		C	
MSE	0.104	0.107	0.045	0.045	0.099	0.099
Correlation	0.942	0.941	0.972	0.973	0.943	0.944
WWMSE	356.876	336.470	0.244	6.212	3.628	2.842
WWSSIM	0.801	0.792	0.996	0.863	0.918	0.968

从成像结果来看,实验 2 的三组对比图片之间存在着明显的主观感受差异:干扰能量分布在纹理丰富区域的,图像损失信息量大,干扰效果较好;干扰能量分布在视觉敏感空间频率的,干扰效果的主观感受较好;干扰能量分布在人眼视觉较敏感的水平、垂直方向的,干扰效果主观感受上优于干扰能量分布在对角线

方向。但是传统的基于像素统计特性的评估指标: MSE 和相关系数对组内两幅对比图像评估结果相当接近,无法反映出肉眼明显可察觉的质量差异;而基于小波分解和 CSF 加权的两种评估指标则明显的体现出组内测试结果的反差。

因此,基于小波变换和 CSF 加权评估指标更能符合人眼观察的主观感受,这是传统的评估方法办不到的。

同时注意到, WWMSE 与 WWSSIM 也有性能上的差异。当干扰能量分布在不同空间区域时, WWMSE 评估方法无法正确反映被干扰图像相对于原图像的信息损失情况,此时 WWSSIM 评估指标则仍然能反映出这种差异。因此 WWSSIM 能够反映干扰能量分布在图像不同位置时的信息损失情况。

7 结论

本文提出小波域加权的结构相似度的 SAR 干扰效果评估方法,能在客观评价和主观感受上建立一定联系。对干扰效果的评估,不仅能够达到传统的客观评价方法一致的性能,而且在与人的视觉感知质量保持一致性方面明显优于 MSE、相关系数等传统方法,能够满足 SAR 对抗应用研究中对于干扰效果的客观评价的要求。相对于同样利用了 HVS 特性的 WWMSE,本文所使用的 WWSSIM 评估指标更加能够体现干扰能量作用于图像不同区域对图像信息破坏的作用。另外较之以往通过神经网络或者模糊推导的方法算法, WWSSIM 算法复杂度低,有利用工程实现。

参考文献

- [1] 张孝乐, 合成孔径雷达干扰及干扰效能评估研究 [D]. [硕士学位论文]. 电子科技大学, 2006.
- [2] 梁恒, SAR 图像干扰效果评估 [D]. [硕士学位论文]. 电子科技大学, 2006.
- [3] 何川, SAR 有源噪声干扰效能评估方法研究 [J]. 电子对抗技术, 2005, 20(3):29-32.
- [4] 徐美林, 对合成孔径雷达干扰与抗干扰及效能评估的研究 [D]. [硕士学位论文]. 电子科技大学, 2005.
- [5] 魏青, 合成孔径雷达成像方法与对合成孔径雷达干扰方法的研究 [D]. [博士学位论文]. 西安电子科技大学, 2007.
- [6] 马俊霞, 蔡英武, 陈惠连, SAR 压制式干扰仿真及效果评估 [J]. 信息与电子工程, 2004, 2(2):109-113.
- [7] 苗艳红, 赵国庆. SAR 雷达干扰效果的度量. 电子对抗技术, 2004, 19(6): 19-21.

- [8] 刘志伟, 许克峰, 基于图像信息损失率的合成孔径雷达干扰效果评估指标. 电子学报, 2007, 35(6):1042-1045.
- [9] 周广涛, 石长安, 杨英科, 李宏, 基于熵的 SAR 干扰效果评估方法. 航天电子对抗, 2006, 22(4):33-35.
- [10] 刘鹏军, 马孝尊, 武忠国, 王岩, 刘志浩, 基于 BP 神经网络的 SAR 干扰效果评估. 舰船电子工程, 2009, 29(2):88-90.
- [11] 焦逊, 陈永光, 李修和, 基于模糊推理的 SAR 干扰效果评估. 雷达科学与技术, 2006. 4(4):197-201.
- [12] Zhou Wang, Conrad Bovik. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4):600-612.
- [13] 丁绪星, 朱日宏, 李建欣. 一种基于人眼视觉特性的图像质量评价. 中国图象图形学报, 2004, (2):190-194.
- [14] 马文波, 赵保军, 任宏亮, 毛二可, 基于小波频带划分及 CSF 特性的图像质量评价方法. 激光与红外, 2007, 37(7):687-690.
- [15] 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. 电子学报, 2009, 37(4):845-849.
- [16] 孙运强, 激光干扰图像质量评价方法研究 [D]. [硕士学位论文]. 国防科学技术大学, 2006.
- [17] Beegan A P. Wavelet-based image compression using human visual system models [M]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University Press, 2001.

作者简介



刘 阳(1979-),男,出生湖南长沙。2003 年获得国防科技大学工学硕士学位,现为国防科技大学博士研究生,主要研究为合成孔径雷达对抗及仿真。

E-mail: liuyang. hn. cn@gmail. com



代大海(1980-),男,出生于河南光山。2008 年 12 月获国防科技大学信息与通信工程专业博士学位,现为国防科技大学讲师。研究方向为雷达极化信息处理、信号处理、目标检测与识别。

E-mail: ddh_nudt@yahoo. com. cn



王雪松(1972-),男,教授,博导,生于内蒙古包头。1999 年 6 月毕业于国防科技大学电子技术系获工学博士学位,现为国防科技大学教授、博士生导师。研究方向为雷达极化信息处理、信号处理、目标检测与识别。E-mail: wxs1019@vip. sina. com