

SAR 图像质量评价综述

王哲远, 李元祥, 郁文贤

(1. 上海交通大学, 上海 200240; 2. 上海市智能探测与识别重点实验室, 上海 200240)

摘要: 由于特殊的成像方式, SAR 图像与光学图像相比有许多不同特性, 使得如何定量分析其图像质量水平成为难点, 并严重影响 SAR 图像的应用。为此, 在广泛文献调研的基础上, 该文对 SAR 图像质量的主客观评价方法以及最新研究进展进行综述, 以期更好地指导 SAR 图像解译工作。客观评价方面, 对基本的评价指标进行了全面的归纳与总结, 重点介绍以应用适合度为代表的综合客观评价方法, 并讨论借鉴可见光、红外图像质量评价的 SAR 图像评价方法。主观评价方面, 对主流的美国国家图像解译度分级标准指标的研究现状进行详细的归纳与总结。最后, 分析当前 SAR 图像质量评价存在的问题, 指出了该领域的发展趋势。

关键词: 合成孔径雷达; 图像质量; 客观评价; 主观评价; NIIRS

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2016.05.001

中图分类号: TP753 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2016)147-0001-10

Review on SAR Image Quality Assessment

WANG Zhe-yuan, LI Yuan-xiang, YU Wen-xian

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Intelligent Sensing & Recognition, Shanghai 200240, China)

Abstract: Due to the special imaging method, SAR image has many different characters from optical image, making it difficult to quantitatively measure the SAR image quality level, and the application of SAR image is severely influenced. On the basis of extensive literature investigation, this paper reviews the SAR image quality assessment methods of both objective and subjective evaluation, in order to better guide the SAR image interpretation. The objective evaluation part summarizes the basic image parameters and focuses on the introduction of comprehensive evaluation methods represented by “application suitability”. We also discuss SAR image assessment methods derived from visible IR sensors in detail. For subjective evaluation, different methods based on SAR NIIRS are reviewed. Finally, major problems in current research and future developments are discussed.

Key words: Synthetic Aperture Radar; image quality; objective evaluation; subjective evaluation; NIIRS

0 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 作为国际雷达遥感领域的研究热点之一, 其图像解译一直比较困难, 一方面是因为它有较强的目标方位敏感性, 另一方面是因为它的图像质量问

题较为特殊。SAR 图像的质量受两方面因素的影响, 一类来自 SAR 系统自身, 包括雷达系统、校正系统、成像算法等。与光学图像不同, SAR 图像反映的是物体对于电磁波的后向散射系数, 因此具有强烈的斑点噪声, 还具有重影、非均匀增益以及运动模糊等特有的质量问题。另一类与地物目标及其所

收稿日期: 2015-10-23 修订日期: 2015-11-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (61331015、U1406404)。

作者简介: 王哲远 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事 SAR 图像目标检测及其质量评价研究。

E-mail: snswordsman@163.com

通信作者: 李元祥 (1968—) 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为图像处理与模式识别、通信网络仿真等。

E-mail: yuanxli@sjtu.edu.cn

在场景有关,包括目标的几何形状、运动速度、介电常数等^[1]。

SAR 图像质量与 SAR 图像解译算法的性能紧密相关,不同质量的 SAR 图像可相应地完成目标发现、识别、确认和描述等不同级别的解译任务。因此,对 SAR 图像进行质量评价是一项具有重要意义的基础性工作,不但用于确定图像信息的可用性,指定所需解译度的图像质量,便于以解译度为依据进行相关图像的收集与管理,还可以帮助设计与评估未来的 SAR 成像系统,评估传感器的性能等。

本文对近些年来 SAR 图像质量评价的研究发展进行了归纳与总结。通常,SAR 图像评价质量的方法分为两种,一种是客观评价方法,通过计算图像的一些客观指标对其质量进行评价^[2]。另一种是主观评价方法,凭感知者的主观感受评价对象的质量,直接反映给人眼的感觉,比较符合实际,但费时,且不易操作,如常用的美国国家图像解译度分级标准(National Imagery Interpretability Rating Scale, NIIRS)。本文最后对当前 SAR 图像质量评价存在的问题进行分析,并讨论 SAR 图像质量评价的发展趋势。

1 客观评价

客观评价通过构建与图像能力含义相关联的数学模型,将待评价的图像进行分析,得到评测结果。因此不会受人为因素影响,使用方便快捷,计算准确。

1.1 基本评价指标

作为一个复合属性,SAR 图像质量涉及许多独立的组成要素,例如分辨率、噪声水平等等,称为“质量因素”。每个“质量因素”可以由一个或几个数值来定量描述,例如在距离向和方位向上点扩散函数(Point Spread Function,PSF)的-3 dB 宽度,噪声等效散射系数($NE\sigma_0$)等,而这些数值则构成了各自的“质量指标”。一些质量因素具有局部特征,而其他一些则可以被认为是全局性的(整图范围);有些是与任何类型的 SAR 图像都有关的,而另一些则只与特定的模式有关。本小节将以此对目前常用的客观质量评价指标进行归纳与讨论,不同于传统的将客观指标笼统划分为基于点目标的和基于区域的两类指标进行描述^[3]。

1) 全局质量评价

① 均值与方差^[4]

图像均值指的是整幅图像或某一特定区域的平均强度,反映了图像所包含目标的平均后向散射系

数的水平,由式(1)计算。

$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I_{i,j} \quad (1)$$

其中, $I_{i,j}$ 为图像在点 (i,j) 处的强度值, $M \times N$ 为图像尺寸。

图像方差则代表了图像区域中所有像素点偏离均值的程度,反映了图像的不均匀性,由式(2)计算。

$$\sigma^2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (I_{i,j} - \mu)^2 \quad (2)$$

其中, σ 为图像的标准差。

均值与方差是反映图像整体特征的指标。一般情况下,目标物体的类型不同,反映到图像上就会有不同的均值与方差;图像中的区域地形差异越大,人造目标越多,就会导致更大的图像方差。SAR 图像的均值与方差是许多客观质量评价指标的计算基础。

② 动态范围与量化噪声

图像动态范围定义为图像中的最大值和最小值之比,一般用分贝数表示,由式(3)计算。

$$D = 10 \lg \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (3)$$

其中, I_{\max} 和 I_{\min} 分别代表 SAR 图像强度的最大值和最小值。

图像的动态范围描述当辐射分辨率的值符合系统设计时雷达后向反射系数的范围,反映了图像区域后向散射系数的差异。不同的场景具有不同的动态范围。一般而言,海洋图像由于地物分布较稀疏,动态范围通常较小,而山区图像的动态范围一般较大。动态范围的不足会展览主瓣,进而增大旁瓣比,最后将导致图像特征出现模糊。

与动态范围相关联的一个量就是量化噪声。当测量值以数据方式存储时,量化噪声就会被引进。这一问题通常发生在最初始的 SAR 数据获取阶段,它的影响可以通过 SAR 预处理减弱或消除。决定是否在量化噪声的方法较为简单,即检查图像中低后向散射区域的灰度直方图分布是否均匀。

③ 辐射灵敏度

辐射灵敏度的衡量指标是噪声等效散射系数($NE\sigma_0$),亦即产生与接收机噪声水平相当的信号电平所对应的后向散射系数值。定义为

$$NE\sigma_0 = \frac{(4\pi)^3 R^3 (k_0 T) \cdot \text{Loss} \cdot 2v}{G^2 \cdot \lambda^3 \cdot \bar{P} \cdot \rho_r} \quad (4)$$

对于反射系数等于 $NE\sigma_0$ 的目标,在最终的 SAR 图像中将与噪声电平一样;而对于反射系数小于 $NE\sigma_0$ 的目标,在最终的 SAR 图像中将被淹没在噪

声里,无法识别。

④ 辐射分辨率与等效视数

辐射分辨率描述每个像素点的辐射质量,亦即区分目标后向散射系数的能力,是衡量 SAR 图像灰度级分辨能力的一种量度,它相当于黑白照片中区分不同灰度等级的能力,它的好坏直接影响 SAR 图像量化和判读应用。辐射分辨率的大小由目标相干斑点和信噪比决定,由式(5)计算

$$\gamma = 10 \lg \left(1 + \frac{\sigma}{\mu} \right) = 10 \lg \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\text{ENL}}} \right) \quad (5)$$

其中, μ 和 σ 分别表示一块均匀区域的强度值的均值和标准差。

式(5)中的 ENL 为图像均匀区域的等效视数(Equivalent Number of Looks, ENL),由式(6)计算。

$$\text{ENL} = \left(\frac{\mu}{\sigma} \right)^2 \quad (6)$$

等效视数也是一种衡量 SAR 图像中斑点噪声相对强度的指标,可以表征图像区分具有不同后向散射特性的区域的能力高低。等效视数越大,就表明图像上斑点噪声越弱。等效视数不仅取决于 SAR 卫星特定的工作模式,还取决对 SAR 图像预处理的地面工作站。这就意味着应从图像本身估计等效视数,或者通过一系列的图像计算把它作为工作模式和地面工作站参数的函数来对待。

对于辐射分辨率,董戈^[5]通过数值分析,指出目前应用的 SAR 图像辐射分辨率工程估算式只能定性分析 SAR 单视图像的信噪比和多视数对 SAR 图像辐射分辨率的影响。董戈还推导出了一个新的 SAR 图像辐射分辨率工程估算式,通过理论和数值分析证明其误差明显小于目前应用的工程估算式并适合于定量分析。

⑤ 辐射误差、准确度和稳定度

辐射误差 $\delta\Gamma$ 是评价 SAR 图像相对辐射定标性能的指标,可以通过计算预期的均匀区域的后向散射系数的辐射方差得到。与辐射误差相关的量是辐射准确度(绝对辐射定标)和稳定度(是否随时间变化)。在海洋图像中,如果没有专门的定标设施,这些指标是难以估量的。

⑥ 空间分辨率

空间分辨率是衡量 SAR 系统性能和确定 SAR 图像应用效果的关键性指标,分为方位向分辨率 ρ_a 和距离向分辨率 ρ_r , 定义为 SAR 图像中所能分辨的两个相邻地物目标之间的最小距离,计算表达式如下:

$$\rho_a = \frac{L}{2}, \rho_r = \frac{c}{2B \sin \theta} \quad (7)$$

其中, L 为天线尺寸, c 为光速, B 为雷达系统成像带宽, θ 为入射角。

由式(7)可以看出,对于理想的 SAR 系统来讲,其方位向分辨率仅取决于真实孔径尺寸,距离向分辨率仅取决于入射角和发射脉冲信号带宽。因此,方位向分辨率对于整幅图片来说一般是一个常数,而距离向分辨率 ρ_r 则随着目标区域与卫星距离的靠近 ρ_a (即入射角减小)而变差。在 SAR 图像(例如 ScanSAR 图像)中,同一幅图像的不同子测绘带会有不同的分辨率。为了能正确地解译被测目标的尺寸和粗略估计卫星的最小可探测目标的雷达横截面积(依赖于背景杂波电平),空间分辨率极其重要。

在 SAR 图像中,空间分辨率通常由点目标冲激响应(Impulse Response Function, IRF) $h(t)$ 分析得出,它们之间的关系可由图 1 阐述。

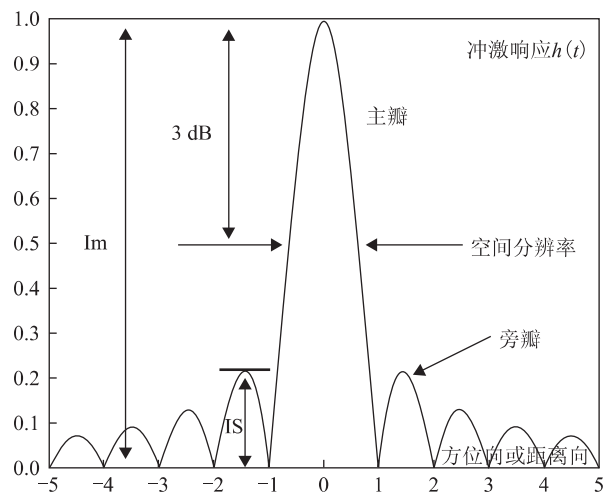


图 1 点目标冲激响应函数 $h(t)$

在图 1 中,空间分辨率定义为点目标冲激响应的主峰强度在距离向或方位向衰减至 -3 dB 时的宽度,因此,它也可以由式(8)^[3]从图像直接计算求出。

$$\rho = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\text{sum}(P_{-3\text{dBleft},n} : P_{-3\text{dBright},n})}{\rho_{\text{pixel}}} \quad (8)$$

其中, $\text{sum}(P_{-3\text{dBleft},n} : P_{-3\text{dBright},n})$ 表示在距离向或方位向上左 -3 dB 点与右 -3 dB 点之间的像素数; ρ_{pixel} 表示像素分辨率; N 是在 SAR 图像中提取的点目标的数目。

对于较低分辨率的 SAR 产品,如中等大小的船只等目标通常落在一个分辨率单元中,因而可以被当作点目标来用于式(8)的计算。当空间分辨率提高时,应用更低尺寸的点目标计算以避免测量误差。距离向分辨率应在距离向较近的位置测量,以得出用于质量分析的最差的分辨率性能。

正确定位点目标的位置是该计算的基础。为了避免点目标定位偏差引入的误差,栗毅等^[6]提出了通过计算复数 SAR 图像的相干相关函数(Coherent Correlation Function, CCF)计算的方法。如果在图像中找不到可用的合适点目标,近似的空间分辨率可以通过计算图像的自协方差方程推导出。SAR 成像的独特性质使得该方法具有较高的准确度。

⑦分辨体积^[7]

SAR 图像的辨识不仅取决于图像的空间分辨率,雷达系统的噪声和回波信号的衰落也会对图像的懂度产生严重影响。因此,SAR 图像的最终分辨特性不仅仅取决于由距离分辨率与方位分辨率构成的几何分辨率面积,而且还取决于雷达的辐射分辨率特性。由此,产生了雷达图像分辨体积 V 的概念:

$$V = \rho_r \cdot \rho_a \cdot \gamma \quad (9)$$

显然,越小的图像分辨体积对应着越高的图像解译度。但这一指标仅仅将空间分辨率与辐射分辨率相乘,未体现具体应用的要求。

2) 局部质量评价

①峰值旁瓣比和积分旁瓣比

峰值旁瓣比(Peak-to-Sidelobe Ratio, PSLR)和积分旁瓣比(Integrated Sidelobe Ratio, ISLR)是 SAR 识别强目标附近弱目标能力的度量,即是弱目标被强目标“掩盖”的程度度量。

峰值旁瓣比定义为冲激响应的最高旁瓣峰值强度与主瓣峰值强度的比值:

$$\text{PSLR} = 10 \lg \frac{I_s}{I_m} \quad (10)$$

其中, I_s 表示最高旁瓣峰值强度; I_m 表示主瓣峰值强度,如图 1 所示。

与峰值旁瓣比相比,积分旁瓣比更侧重于度量旁瓣对主瓣的相对重要程度,定义为冲击响应函数各旁瓣的能量之和与主瓣能量的比值:

$$\text{ISLR} = 10 \lg \frac{\int_{-\infty}^a |h(\tau)|^2 d\tau + \int_b^{\infty} |h(\tau)|^2 d\tau}{\int_a^b |h(\tau)|^2 d\tau} \quad (11)$$

其中, $h(\tau)$ 表示距离向或方位向的冲击响应函数; $[a, b]$ 表示主瓣区间。

峰值旁瓣比和积分旁瓣比高意味着点目标的能量被分散的更开,这会严重影响地球物理反演模型的计算,导致强目标会呈明亮的十字型显示,由旁瓣能量和目标周围的小点卷积产生。这种亮十字在实

际中会产生虚警,并掩盖附近目标。

②模糊比

模糊性表现为强目标的重影,在距离向和方位向都会出现,与源目标相隔一段距离,该距离由 SAR 系统参数决定。特别地,沿方位向,在重影距离的整数倍还有可能高阶重影。当目标与背景对比明显时,模糊性便会十分显著。

评价图像的模糊性的指标为模糊比(Ambiguity-to-Signal Ratio, ASR),它定义为由回波时间或多普勒频率偏移的模糊区域产生的目标重像与成像目标的能量强度之间的比值^[8]。模糊比分为方位模糊比(Azimuth Ambiguity-to-Signal Ratio, AASR)和距离模糊比(Range Ambiguity-to-Signal Ratio, RASR),分别由式(12)和式(13)计算。

$$\text{AASR} = \frac{\text{所有方位模糊区回波总功率}}{\text{主波束内回波信号功率}} \quad (12)$$

$$\text{RASR} = \frac{\text{所有距离模糊区回波总功率}}{\text{主波束内回波信号功率}} \quad (13)$$

距离模糊通常由照射图像中不同区域的不同发射脉冲回波同时到达接收机造成,方位模糊则是较高频率的多普勒回波被雷达脉冲重复频率混迭所致。原理上,我们可以通过检查在模糊度距离上是否存在更强的源目标来抑制由方位模糊造成的虚假检测。然而,在 SAR 图像中,不同的组成波束通常具有不同的脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF),导致模糊性出现在不同的距离上。为了在这种情况下识别模糊重影,首先需要获知波束边缘的准确位置,需要注意的是,在光束重叠区域,重影模糊会成倍出现。在距离向上,距离模糊发生的距离通常在比方位模糊更远,大概为 100 km 的数量级。因此识别距离模糊更加困难,距离模糊比也难以直接从图像本身计算得出。

1.2 SAR 图像质量的综合评价

随着 SAR 遥感应应用数量的逐渐增加,以及它们在运营业务中的逐渐运用,对图像质量提出了更为严格的要求。加之 SAR 图像的独特成像与复原方法,单一的图像质量评价指标通常难以对图像质量做出准确评价。因此,可基于各基本质量评价指标,给出综合质量评价指标,以获得不同图像质量较好的区分度。

1) 应用适合度

有时,即使在某些质量指标上不符合规格,比如缺失部分数据或者人为干扰,一幅图像仍可用于某些具体应用,并得出有用的结果。因此,意大利 NATO 海下研究中心的 Michele Vespe 和 Harm

Greidanus^[9]提出了基于应用的应用适合度指标,用以评价 SAR 图像。它以一种严格依赖于具体应用的方式,将所有提取的质量指标合并成一个单一的参数。

构造“应用适合度”的第一步就是将图像质量的各个组成指标置于同一基准至上,即对不同的质量指标进行归一化处理。每一个质量指标 ($NE\sigma_0$ 、 γ 、 ρ_a 等),都被映射到一个与具体应用相关的适合度指标,称作 $\Lambda_x = \Lambda_{NE\sigma_0}$, Λ_γ , Λ_{ρ_a} 等。这种映射方式由式(14)决定^[9]。

$$\Lambda_x = 1 - \left[1 + \exp\left(2 \frac{Req - x}{Tol - Req}\right) \right]^{-1} \quad (14)$$

其中 Req (Requirement) 为应用需求值, Tol (Tolerance) 为应用容忍值,两者都取决于指标 x 在具体应用中的要求。指标 x 同过式(14)被映射到 $[0, 1]$ 区间, $\Lambda_x = 0$ (对应 $x \gg Tol$) 表示,就质量因素 x 而言,该图像并不适合特定应用; $\Lambda_x = 0.5$ (对应 $x = Req$) 表示,就质量因素 x 而言,该图像适合特定应用的基本要求; $\Lambda_x = 1$ (对应 $x \ll Req$) 表示,该图像在质量因素 x 上完全胜任特定应用。

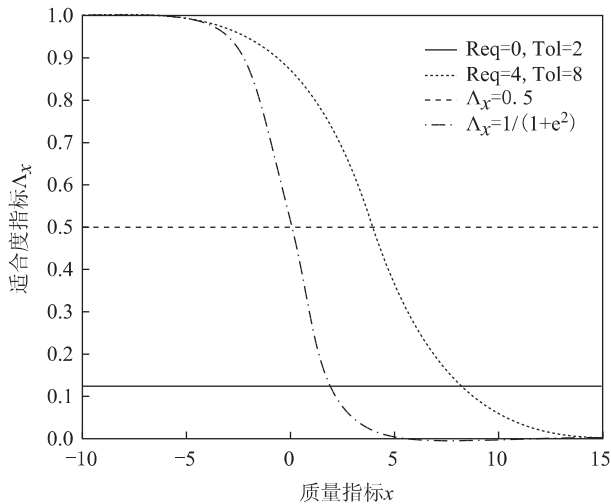


图2 质量指标 x 与 Λ_x 在不同的 Req 与 Tol 取值下的关系图

Λ_x 与 x 的关系见图2,图中, Tol 决定了适合度指标函数的斜率。Tol 与 Req 相近,就表明质量指标必须在较小的容忍范围内接近应用需求值。Tol 与 Req 之间较大的差值意味着对质量指标在应用需求值较为宽松的范围的要求。当 $x = Tol$ 时,应用适合度指标 $\Lambda_x = \frac{1}{1 + e^2} \approx 0.1192$ 。

接下来,将各个全局质量评价方面的指标值 Λ_x 做几何平均,以此得出全局(就整幅图像而言)适合度指标(Global Index, GI):

$$GI = (\Lambda_{NE\sigma_0} \cdot \Lambda_\gamma \cdot \Lambda_{\rho_a} \cdot \dots)^{1/N} = \left(\prod_x \Lambda_x \right)^{1/N} \quad (15)$$

其中, N 是需要考虑的全局质量指标数目。如果某一指标无法测量或在处理的图像模式中不适用,就将其对应的 Λ_x 设置为 1。与传统的将不同指标相加做处理,相乘处理保证了某一指标的较低值将会拉低整体 GI 值。这与实际相符,因为某一指标的不适合将会导致整幅图像难以被使用。

相应地,将各个局部质量评价方面的指标值 Λ_x 做几何平均,就得到了局部适合度指标(Local Index, LI):

$$LI = (\Lambda_{PSLR} \cdot \Lambda_{ISLR} \cdot \dots)^{1/N} = \left(\prod_x \Lambda_x \right)^{1/N} \quad (16)$$

最终,将全局适合度和局部适合度相结合,就得到了应用适合度指标 Q :

$$Q = \sqrt{GI \cdot LI} \quad (17)$$

这一指标综合考虑了图像的全局特性和局部特性,通过基于具体应用指定的 Req 和 Tol 的参数值,能较好地反映一幅图像对某一应用的适合程度。该指标已被用于舰船检测以及漏油探测等具体应用中,并取得不错效果。

2) 其他

近些年来,一些基于 SAR 成像特性的综合质量评价方法也被提出。

① 归一化雷达散射截面积

种劲松等^[10]通过对海洋纹理特征的质量分析,提出了一组基于归一化雷达散射截面积(Normalized Radar Cross Section, NRCS)的海洋图像质量评价指标。在实际 SAR 图像中被证明是有效的。与应用于陆地点目标的传统评价指标相比,这类 NRCS 指标可以直接从图像中求得,计算简便。相比普通的纹理评价,这类指标考虑的 SAR 的成像特性,能很好地区分海面上的亮线与暗线。在此基础上,建立更为完善的 SAR 还有图像评价体系将成为未来的一个研究方向。

② 基于假设检验的质量评价

李连华研究小组^[11]通过假设检验的方法,对图像的多种客观指标进行判定,建立了一套适用于 SAR 图像的质量评价体系。该评价体系中的假设检验分为参数与非参数两种。参数假设检验包含 u 检验,卡方检验和 F 检验;非参数假设检验由 $K-S$ 检验和皮尔森卡方检验组成。通过以上假设检验,将 SAR 图像质量指标分为点目标特征与分布目标

特征两类进行分析与评价。点目标特征包含空间分辨率、等效分辨率、峰值旁瓣比和积分旁瓣比等;分布目标特征包含均值、方差、等效视数和辐射分辨率等。基于 u 检验的 SAR 陆地与海洋图像的实验表明,将假设检验用于 SAR 图像质量评价是可行与有效的。

1.3 对光学、红外图像质量评价模型的借鉴研究

相对于 SAR 图像质量评价,光学以及红外图像的质量评价模型较为成熟。因此,通过借鉴光学、红外的质量评价模型进行 SAR 图像质量评价研究,具有一定的可行性。

1) 基于 MTF 的 SAR 质量评价

对光学传感器而言,标准条状带被广泛用于图像质量评价,如图 3 所示。在光学图像中,可以通过由条状带获取的调制传输函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 进行质量评价,而不需要点扩散函数 PSF 的提取。

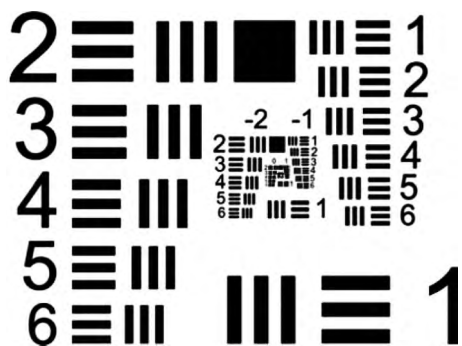


图 3 美国空军用于成像质量评价的标准条状带目标

基于此, Karsten 等^[12]提出了用于 SAR 传感器采样的条状带试验场的概念并进行了实地搭建,然后通过 SAR 传感器多功能相控阵成像雷达 (Phased Array Multifunctional Imaging Radar, PAMIR) 系统对试验场进行了成像实验。结果分析表明,条状带可以被清楚的辨别出来。雷达后向反射系数与条状带的宽度与纹理特征也有直接关联,通过调节后者,就可以在 SAR 图像中引入不同对比度的条状带。半个世纪以来,可见光传感器的成像质量可以由用户对条状带直接评价而获得。同样,条状带的引入,使得非专业人员对 SAR 图像质量中的分辨率和对比度进行评价成为可能。对于难以获得可靠的目标识别性能的高分辨率 SAR 图像的质量评价,标准条状带的搭建可以成为一个解决的方案。

在条状带的基础上,对应于光学评价中的调制传输函数,刘兴钊等^[13]定义了与 SAR 图像条状带对应的 MTF 函数,即,在某一空间频率下, SAR 成

像的后向散射调制 (Backscattering Modulation, BM) 与真实场景下的后向散射调制之比:

$$MTF = \frac{M_{\text{image}}}{M_{\text{scene}}} \quad (18)$$

$$M_{\text{image}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} \quad (19)$$

$$M_{\text{scene}} = \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{P_{\text{max}} + P_{\text{min}}} \quad (20)$$

其中, I_{max} 和 I_{min} 为 SAR 图像中的后向散射极值, P_{max} 和 P_{min} 为真实场景的后向散射极值。

基于以上定义,通过对实地搭建的条状带进行 SAR 成像实验,就可特出 MTF 关于不同空间频率的特征曲线。研究结果表明,改曲线代表了 SAR 成像系统的反演能力。相比于传统的点扩散函数法,基于 MTF 的 SAR 图像质量评价更为准确有效。

2) 基于人眼视觉特性的 SAR 质量评价

传统的 SAR 图像质量评价指标主要是基于点目标与面目标的特性提出的,缺少重要的人类视觉的主观信息。将人眼视觉特性引入 SAR 图像质量评价中来,是未来的一个研究方向。

李春升等^[14]提出了一种基于人类视觉系统 (Human Visual System, HVS) 的新型 SAR 图像质量评价算法,即 HVSNR (Human Visual System Signal-to-Noise Ratio)。这一算法无需参考图像,而是基于人眼系统的生物特性与离散小波变换之间的相似性提出,算法示意图见图 4。首先,对 SAR 图像进行五层小波变换,获取不同空间频率的子图;计算各子图的基本质量评价指标,如均值,方差,梯度,信息熵等;通过对比敏感函数 (Contrast Sensitivity Function, CSF) 得出不同频率子图的权值并进行加权计算,就可以得出原始图像的 HVSNR 指标。对机载 SAR 图像的电脑仿真验证了这一算法的有效性,一般而言, HVSNR 值越大,图像越符合人眼主观感受,因而质量越高。该算法为无参考质量评价,将对未来的 SAR 图像质量评价产生积极意义。

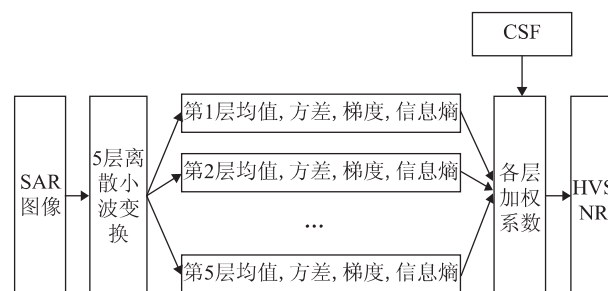


图 4 基于 CSF 加权的 HVSNR 算法示意图

HVS 系统对空间频率和图像的结构信息较为敏感,其主要功能即是提取图像的结构信息,因此,基于结构失真的图像质量评价方法,简称为结构相似度(Structure Similarity, SSIM)评价方法在可见光图像中发展较为成熟。改进的 SSIM 算法通过引入边缘检测,提升了评价效果。然而,边缘检测对于 SAR 图像本身十分困难,使得 SSIM 算法并不能很好的兼容 SAR 图像。为了解决这一问题,焦淑红等^[15]通过引入 SAR 图像纹理信息对原有 SSIM 算法进行了修正与完善,提出了适用于 SAR 图像的 SSIM 评价算法,基于纹理特征的 SSIM 算法(Texture-based SSIM, TSSIM)。仿真结果表明,提出的 TSSIM 在 SAR 图像评价上比传统的 SSIM 与峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)算法具有更好的效果。TSSIM 不仅可以反映 SAR 图像质量,还可以评估图像中不同区域的干扰强度差别。TSSIM 的完善需要 SAR 图像数据集的建立以及更为准确的客观指标的提出,这将是该算法的发展方向。

2 主观评价

主观评价基于的是人的感觉,又可分为间接评价和直接评价。间接的图像质量评价可分为三类,分别基于图像的视觉特性、被感知程度和任务执行情况。而直接评价使用目标识别的概率、目标识别的时间度量或距离度量来表示图像质量。例如:在质量水平为 60 分的图像上,识别出某一型号的装甲车的概率为 70%就是对目标质量的一种直接评价。

2.1 NIIRS 准则

图像质量的主观评价技术一直都在快速发展,美国国家图像解译度分级标准 NIIRS 是涌现出的较为主流的方法^[16]。NIIRS 由美国国防航空侦察署于 1974 年发布,并在之后不断改进。其基础是,图像质量越高,图像解译专家就能执行更多更高要求的图像解释任务。NIIRS 评级是由图像解译专家使用相应类型图像的 NIIRS 标准进行打分确定的。它根据图像解译专家经验得到从 0~9 级的 10 等级尺度来代表图像的可解译程度。等级越高,表明对应图像的可解译性也就越高,将用户的解译任务需求反映到了图像质量的评价过程之中。NIIRS 具有高精度、不需测试靶标、可预估的特点。通过通用图像质量方程(General Image Quality Equation, GIQE),可在卫星设计成型前预估其获得图像的 NIIRS 等级。

对于不同的传感器,NIIRS 标准具有不同的描

述,主要分为可见光(Electrical Optical, EO) NIIRS,红外(Infrared Radiation, IR) NIIRS,雷达(SAR) NIIRS 和多光谱(Multi-Spectral, MS) NIIRS。现行的 SAR NIIRS 标准归纳为表 1。

表 1 SAR NIIRS 标准

NIIRS 等级	描述
0	无法解译
1	探测港口,运输交通线,大面积空地
2	探测大型飞机,田径场,军事设施
3	探测中型飞机,堑壕,货船上部结构,铁路调车场
4	区分固定翼飞机与旋翼式飞机,开阔海湾与封闭海湾;探测缆车,并排的车辆,桥梁
5	记数中型直升机,轨道车;区分渡河装备与重型装甲车
6	区分可变翼与固定翼战斗机,小型支援车辆与坦克;探测铁路火车上的货物
7	辨认小型战斗机型号;区分要塞中的电动拖车与厢式货车
8	辨认铁轨的每个结点;区分 HIND 与 HIP 直升机的机身差异
9	探测大型飞机的主要部件;辨认 EW/GCI/ACQ 雷达阵列的天线形状

国内对 NIIRS 准则的研究分为两个方面,分别是 NIIRS 的分析研究和应用。在 NIIRS 分析研究方面,国防科大、北京市遥感信息研究所、北京空间机电研究所等单位对 NIIRS 的来源、标准开发过程、存在的问题等方面有不同程度的研究;在 NIIRS 的应用方面,国内多家遥感载荷研制机构对载荷研制的指标确定、检测校正中形成了一些应用,但在开发 SAR 图像评价分级标准的理论与规范方面,国内还基本处于空白。

2.2 GIQE 模型

对于 EO 和 IR 系统,图像的 NIIRS 值可以直接由通用质量方程 GIQE 计算得出,一般精度可达 0.1。然而,对 SAR 图像而言,并未有相应的质量方程可供计算。一幅 SAR 图像的 NIIRS 值通常是由一些经验丰富的判读人员评价得出,评价过程费时费力,且对于非专业人士来说难以实行。因此,适用于 SAR 图像的通用质量方程模型的研究具有十分重要的意义。

探求 SAR NIIRS 质量方程模型的第一步,通常是建立 SAR 图像数据集,整理记录每张 SAR 图像

的 NIIRS 值以及各系统参数和图像指标。将 NIIRS 值看作基于这些参数的函数,通过统计回归分析,得出在特定条件下的最优估计。Gutchess 等^[17]根据这一方法,得出了 SAR NIIRS 质量方程的估计模型如下。

$$NIIRS_{SAR} = 5.606 - 0.763r + 3.657\varphi - 3.422\varphi^2 \quad (21)$$

其中, r 为图像分辨率, φ 为俯视角。该模型的相关系数 R^2 为 0.79。

在此基础上,Gutchess 等人通过引入图像评价尺度与元数据信息对式(21)进行修正,将 R^2 提升至 0.84,修正过后的质量方程为

$$NIIRS_{SAR} = 5.949 - 0.793r - 0.055\sigma_{cfar-clutter} + 0.03\mu_{cfar-target} + 5 \times 10^{-4} POE + 0.068\sigma_{cfar-target} + 3.252\varphi - 2.916\varphi^2 \quad (22)$$

其中, $\sigma_{cfar-clutter}$ 和 $\sigma_{cfar-target}$ 分别为背景杂波像素和目标像素的 CFAR 统计特性的标准差, $\mu_{cfar-target}$ 为目标像素的 CFAR 统计特性均值。POE 为图像的边缘概率(Probability of Edge, POE)。

此外,探求适合 SAR 图像的用质量方程模型,还可以通过对 EO/IR 图像的质量方程进行类比。Nolan 等^[18]通过总结 EO/IR 图像的质量方程模型,提出了式(23)所示的 SAR NIIRS 计算模型。

$$NIIRS_{SAR} = a - b \log_{10} GSD + c \log_{10} (\log_{10} (1 + SNR)) \quad (23)$$

其中,GSD 为地面采样距离,SNR 为系统信噪比。通过对 MSTAR(45°俯角)和 COTCHA 数据(15°俯角)进行基于 GSD 和 SNR 的二维回归分析,Nolan 等人初步确定了式(23)中参数的取值,见表 2。

表 2 式(23)参数拟合结果

数据集	标准差	R^2	a	b	c
Both	1.02	0.72	5.94	-1.78	3.09
GOTCHA	0.73	0.77	5.29	-1.91	0.32
MSTAR	0.91	0.81	6.55	-1.94	4.09

2.3 NIIRS 与目标探测、识别和辨认概率之间的关系

随着传感成像技术的发展,执行低空、地面侦查任务与高空侦查任务的关系的区分正日益模糊。通过研究遥感图像的 NIIRS 值与执行具体鉴别任务的概率之间的转换关系,就可以更好地指导遥感图像的后续处理工作^[19]。Driggers 等^[20]通过 EO/IR 与 SAR NIIRS 之间的相似性,借助于红外图像下鉴

别概率与 NIIRS 之间的关系,初步推导了 SAR 图像 NIIRS 值与鉴别概率之间的内部关系,如图 5 所示。

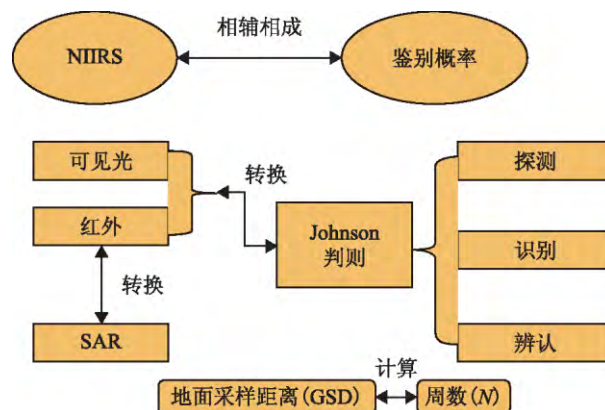


图 5 NIIRS 值与鉴别概率之间的转换算法示意图

图 5 中,可见光与红外的模型的鉴别概率通过 Johnson 准则得出。Johnson 准则以概率的方式定量描述了观察者分辨条状目标的能力与他们执行军事目标检测能力之间的关系。而可见光与红外图像的 NIIRS 值则由 GIQE 计算得出。两者之间的联系主要由 GIQE 中的地面采样距离(Ground Sample Distance, GSD)与 Johnson 准则中的等效周期数 N 实现:

$$N = \frac{\text{目标尺寸}}{2GSD} \quad (24)$$

对于 SAR 图像,需要先将 SAR NIIRS 值转换为相同标准下 EO/IR 的 NIIRS 值,这通过比较 SAR 与可见光/红外的 NIIRS 标准中的相似判定规则所对应的数值来确定^[21]。以此为媒介,就可以推导出 SAR 图像 NIIRS 值与探测、识别、辨认某一尺寸军事目标的概率之间的关系。研究结果表明,图像的 NIIRS 评级越高,在图像上能进行的鉴别任务越精确,对应某一任务的鉴别概率也越高。

3 存在的问题及发展趋势

自上个世纪 50 年代后期至今,SAR 图像质量评价已经有了较为可观的发展。然而,与 SAR 图像解译的研究相比,质量评价的研究仍有滞后,一个有效的 SAR 图像质量评价体系的建立与应用仍面临不少基础性理论和技术问题。其中,一些较为迫切的问题有待解决,其发展趋势也值得关注。

3.1 存在的问题

1)难以针对具体应用来准确评估 SAR 图像质量

现有的 SAR 质量评价的基本质量指标大都没有将图像的具体应用环境作为考虑的因素,仅是单

纯对图像特性进行比较,因此,图像对用户任务(如目标检测、识别等)的执行性能就常常无法被准确反映出来。虽然为了改善客观评价指标的评价效果,以应用适合度为代表的综合质量指标已被提出。但对其的研究并不很充分,指标中的一些关键参数需要凭靠研究人员的经验选取,在一定程度上降低了评价精度和评价系统的鲁棒性。为了在以后能够更加准确地确定应用需求值和应用容忍值这两个参数,大量与实际 SAR 图像应用相结合的工作是必须的。

2) 借鉴其他类型图像质量评价研究成果的过程中缺乏对系统差异性的处理

由于 SAR 系统成像模式与光学和红外存在区别,在借鉴的基础上如何合理调整是需要在今后的研究中进行解决的问题。另一方面, SAR 图像与光学图像,在人眼判读上固有的视觉差异,也使得基于人眼视觉特性的 SAR 质量评价体系在评价效果上达不到光学图像的水准。

3) 主观评价需解决效率问题

主观评价以用户的主观感受为前提,其中的直接评价更对侦察图像战术价值的描述简单明了。然而,这些主观标准的构成多是一些描述性的语言和参照物,也易受一些与图像质量无关的因素影响,比如目标所处的背景,观测人员的经验、视觉疲劳程度和厌倦情绪等。为了降低个人因素在主观评价过程中的影响,需要对图像判读人员进行专项训练,并要综合多名图像分析人员所做的评价,而这又导致评价过程费时费力,缺乏经济性。

4) 主观评价的性能估计精度受 SAR 图像数据集制约

对于 NIIRS 准则的研究虽已有四十多年之久,但目前的大多数研究都受到数据集规模所限,所建立的质量方程并不是最优的。很多模型结果也仅是考虑了几个较为重要的系统参数,对其他参数与 NIIRS 值的影响研究的并不充分。为了使基于 NIIRS 准则的 SAR 目标鉴别性能估计达到光学后红外系统的精度级别,大量的实质性工作仍需开展。首先, 2.2 节中的 SAR NIIRS 质量方程需要进一步完善;其次,也需要提出类似于最小可分辨温差/对比度(Minimum Resolvable Temperature/Contrast, MRT/MRC)的 SAR 应用模型并完善。目前的研究工作都是基于分辨率受限的传感器,而对于灵敏度受限的传感器则未涉及,这方面的研究有待开展。

3.2 发展趋势

SAR 图像质量评价一直以来都是 SAR 系统设

计阶段研究的话题。如今,正有越来越多的图像和研究成果可供使用。如何用新的方法对 SAR 图像的质量进行评价,并用评价结果帮助简化其他相关应用的解决,这将是以后 SAR 图像质量评价发展的方向。该领域仍有以下问题值得深入研究和探索:

1) 建立多指标的图像质量评价模型

客观指标方面,综合评价图像质量将成为未来发展主流。由单一指标衡量各种图像的客观质量往往只能反映图像的整体质量,不能反映其局部失真信息。故分层次、多指标组合将是图像质量评价建模的一个发展方向。

2) 面向任务的 SAR 图像质量评价

面向任务(以检测识别为主)的 SAR 图像质量评估是对 SAR 图像进行有效管理和使用的重要保障。以目标检测为例,实际情况时,不同的应用场景,如海面目标检测和城市街区目标检测因为场景的不同,将在可检测性方面存在明显的差异。因此,需根据目标典型场景来深入研究目标可检测性、可识别性的数学描述,研究影响检测识别性能的因素及建模方法,由此来研究面向检测、识别任务的 SAR 图像质量评估方法将在实际应用中更具有指导性。

3) 面向应用的 SAR 图像质量分级

分析不同认知和解译应用层次需求对 SAR 图像质量的要求,研究 SAR 图像质量的分级标准及其描述。通过模型分析、数据训练、智能分类器设计等途径,建立 SAR 目标特征向量显著性统计量与 SAR 图像各质量等级间的映射模型,实现 SAR 图像的自动质量分级。

4) NIIRS 与目标识别性能间的关系

主观指标方面,对 SAR NIIRS 的研究将更多的与目标探测、目标识别及目标鉴别概率联系起来,不同指标之间的关系研究有待深入进行。

此前,欧美等国已陆续发展出满足其各自需要的评估准则,而我国至今还未形成自己的图像评估规范,严重制约了我国 SAR 图像认知与解译技术的发展。而我们近年来在 SAR 数据认知与解译方面的研究基础,使我们合理相信,结合有限应用场景和目标、面向检测识别任务的 SAR 图像质量评价有望在短期内取得突破。

4 结束语

对 SAR 图像进行质量评价是一项具有重要意义的基础性工作,不但用于确定图像信息的可用性,指定所需解译度的图像质量,便于以解译度为依据

进行相关图像的收集与管理,还可以帮助设计与评估未来的 SAR 成像系统,评估传感器的性能等。本文回顾前瞻,对 SAR 图像质量评价的研究工作进行了总结。对一些主要问题以及当前的主流研究方向

做了扼要的阐述,以期引起更多的研究者对该领域问题进行关注。限于篇幅,许多细节问题未做深究。相信随着我国 SAR 图像应用的逐步需求,对该质量评价领域的研究会继续深入。

参考文献:

- [1] OLIVER C J, QUEGAN S. Understanding synthetic aperture radar images[M]. Boston & London: Artech House Publishers, 1998.
- [2] MARTINEZ A, MARCHAND J L. SAR image quality assessment[J]. Revista de Teledetección, 1993; 1-7.
- [3] LU X, SUN H. Parameter assessment for SAR image quality evaluation system[C]. Asian and Pacific Conf. on Synthetic Aperture Radar, APSAR, 2007; 58-60.
- [4] 匡纲要, 高贵, 蒋咏梅. 合成孔径雷达目标检测理论、算法及应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2007.
- [5] 董戈. 合成孔径雷达图像辐射分辨率工程估算公式的校正[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(12): 1901-1907.
- [6] ZHANG H, LI Y, SU Y. SAR image quality assessment using coherent correlation function[C]. 5th Int. Congr. on Image and Signal Processing, CISP 2012; 1129-1133.
- [7] 王卫威. 基于最优估计的 SAR 图像提高分辨率方法研究[D]. 国防科学技术大学, 2008.
- [8] 王建国, 邱会中, 黄顺吉. 合成孔径雷达图像质量的评估指标[J]. 电子科技大学学报, 1992, 21(5): 486-490.
- [9] MICHELE V, HARM G. SAR image quality assessment and indicators for vessel and oil spill detection[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(11) PART2: 4726-4734.
- [10] CAI Y N, CHONG J S. Parameter assessment for texture feature quality evaluation in sar ocean image[C]. Proc. Asia and Pacific Conf. on Synthetic Aperture Radar, APSAR, 2009; 852-855.
- [11] WANG X, WANG H, MENG C, et al. Hypothesis test on quality measures for synthetic aperture radar images[C]. Proc. Int. Conf. on Image Analysis and Signal Processing, IASP, 2011; 123-127.
- [12] SCHULZ K, THIELE A, ULRICH T, et al. A new concept for sar image quality assessment realizing bar patterns in sar images[C]. Proc. EUSAR, 2008.
- [13] LIN X, WANG K, LIU X, et al. A new MTF-based image quality assessment for high-resolution SAR sensors[J]. IGARSS, 2013; 1305-1308.
- [14] LIU Y, YU Z, LI C. A novel quality evaluation algorithm for sar image based on human visual system[J]. IGARSS, 2013; 3096-3099.
- [15] JIAO S, DONG W. SAR image quality assessment based on ssim using textural feature[C]. 7th Int. Conf. on Image and Graphics, 2013; 281-286.
- [16] LEACHTENAUER J C. National imagery interpretability rating scales; overview and product description[C]. Proc. APRS/ASCM Annu. Conv. and Exhibition Technical Papers; Remote Sensing and Photogrammetry, 1996, 1: 262-272.
- [17] DANIEL G, JOHN M I, MON Y, et al. Snorrason, predicting the effectiveness of sar imagery for target detection[C]. Proc. SPIE. 2011; 8051.
- [18] ADAM R N, STEVEN G G, MICHAEL B. Performance estimation of sar imagery using niirs techniques[C]. Proc. SPIE. 2012; 8394.
- [19] JOHN M I, ERIC N. Image quality and performance modeling for automated target detection[C]. Proc. SPIE. 2009; 7335.
- [20] DRIGGERS R G, COX P, KELLEY M. The national imagery interpretation rating system and the probabilities of detection, recognition, and identification[J]. Optical Engineering, 1997, 36(7): 1952-1959.
- [21] DRIGGERS R G, RATCHES J A, LEACHTENAUER J C, et al. Synthetic aperture radar target acquisition model based on a national imagery interpretability rating scale to probability of discrimination conversion[J]. Optical Engineering, 2003, 42(7): 2104-2112.