

## 航天遥感监测信息态势感知能力分析\*

杨长风, 郁文贤, 粟毅

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 针对遥感监测信息的效用评估问题,提出了一种态势感知能力定量分析的新方法。首先利用 NIIRS 等级尺度和 GIQE 模型建立了遥感图像与地面目标检测率之间的联系,由此得到这些目标在监视区域出现的概率分布。然后,以地面目标在监视区域的实际分布表示使用者信息需求,并利用信息理论中的 Kullback-Leibler 距离来度量不确定性分布和信息需求之间的差异,从而得到不同遥感侦察与监视系统态势感知能力曲线,给出了传输处理时延对态势感知能力曲线的影响。

关键词 侦察与监视 态势感知 效能

中图分类号 :TP79 文献标识码 :A

## The Situation Awareness Evaluation of S&amp;R Systems

YANG Chang-feng, YU Wen-Xian, SU Yi

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** A new way related to the performance analysis of Surveillance and Reconnaissance Systems is proposed to evaluate the situation awareness. At first, NIIRS and GIQE are used to find the relationship between the remote images and targets' detection probability, so the probability distribution of the targets in the surveillance area is gotten. Secondly, considering the real distribution of the targets as the users' need for information, we use Kullback-Leibler distance in the information theory to measure the difference between the probability distribution of the targets and the users' need for information. Finally, a situation awareness curve of different S&R systems is derived and the impact analysis of the transmission and processing delay on the curve follows.

**Key words** S&R; situation awareness; effectiveness

遥感侦察与监视系统(S&R系统)在国民经济的各个方面发挥着越来越重要的作用,比如港口船队监视、高速公路车况监视、停车场监视以及军事战场侦察与监视等等。研究S&R系统态势感知能力对于评估已有遥感系统性能、开发满足需求的遥感系统具有重要意义。前人也对该问题及相关领域进行了大量的研究,得到一些与态势感知能力评估有关的模型和方法。

国家图像可解译性等级尺度(NIIRS)和通用图像质量方程(GIQE)是定性评估遥感图像可解译性的有用模型,但是还不能对可解译性作定量描述。而且该模型只针对独立目标,缺乏分析监视区域总体态势感知能力的方法,同时也无法分析卫星重返周期以及解译传输时延对态势感知能力的影响。

经典的效能评估方法通过将侦察与监视系统的参量指标或性能指标融入到具体的应用过程中,对比分析应用结果,来达到评估态势感知效用的目的。例如,把C<sup>4</sup>ISR系统和想定联系起来,通过分析系统尺度参数(DP,如空间分辨率)的变化、性能度量(MOP,如检测率)对效能度量(MOE,如目标指定率)的作用,进而分析对行动效能度量(MOFE)的影响。但由于系统的复杂性以及人的参与,难以建立精确的模型,导致该方法难以实用。

Hans Keithley等在研究融合系统效能时提出以使用者的信息需求作为评价基准,避开讨论使用者运用情报的人为不确定因素,从而使问题大大简化。但是由于使用者的信息需求难以量化表达,如不同使用者针对不同的任务会提出不同的信息需求并采用不同的术语,所以很难将它们统一起来。这就限

\* 收稿日期 2004-10-28

基金项目 国家部委基金资助项目

作者简介 杨长风(1958—)男,博士生。

制了该方法的推广。

Bar, D.R. 和 T. Sherrill<sup>[5]</sup>提出了“信息增益”的概念,利用 Shannon 熵来度量目标位置的不确定性,用“信息增益”定量表示某条信息的价值。但是他们定义的“信息增益”可能为负值,会产生和主观经验不一致的结果。

## 1 态势感知能力定量分析新方法

分析 S&R 系统态势感知能力,首先需要建立遥感图像和地面独立目标检测率之间的联系,这就用到国家图像可解译性等级尺度(NIIRS)和通用图像质量方程(GIQE),由于 NIIRS 只是一些描述性的说明,还需借鉴目标检测率模型建立不同 NIIRS 等级的遥感图像对独立地面目标的检测率。2.1 节和 2.2 节分析了不同目标在不同性能 S&R 系统中的检测率。

得到遥感图像中独立目标检测率后,需在此基础上分析监视区域的总体态势感知能力。最简单的总体态势感知能力分析方法是直接将独立目标的检测率加权求和,以平均检测率来度量监视区域总体态势感知能力。但这种方法存在加权系数难以确定、物理概念不清晰等问题,也不便于讨论通信和处理时延对平均检测率的影响。由此,本文在 2.3 节建立了监视区域目标分布模型,在 2.4 节中以信息使用者的信息需求为基准,利用 Kullback-Leibler 距离来度量 S&R 系统对这个基准的符合程度。

### 1.1 NIIRS 和 GIQE 模型

S&R 图像的可解译性与图像的分辨率、尺度、对比度和信噪比等多种因素有关,一般由国家图像可解译性等级尺度 NIIRS(national imagery interpretability scale)表示<sup>[1]</sup>。NIIRS 是根据图像解译专家经验得到的从 0~9 级的 10 等级尺度,等级越高,表明图像的可解译性越高。

以 NIIRS 为基础,通用图像质量方程(GIQE, general image quality equation)用于预测和评估 S&R 系统的可解译性能<sup>[1]</sup>,即利用 S&R 系统的物理参数来预测该系统提供图像的 NIIRS 等级。可见光 GIQE 模型为:

$$NIIRS = 10.251 - a \lg GSD_{CM} + b \lg RER_{CM} - 0.656 H_{CM} - 0.344 (G/SNR) \quad (1)$$

其中,  $GSD_{CM}$  为地面采样间隔的几何平均值(inch);  $RER_{CM}$  为规范化相对边缘响应的几何平均值;  $H_{CM}$  为调制传递函数补偿 MTFc(modulation transfer function compensation)导致的上冲几何平均高度;  $G$  是由于 MTFc 导致的噪声增益;  $SNR$  为信噪比;  $a = \begin{cases} 3.32, & \text{当 } RER \geq 0.9 \\ 3.16, & \text{当 } RER < 0.9 \end{cases}$ ,  $b = \begin{cases} 1.559, & \text{当 } RER \geq 0.9 \\ 2.817, & \text{当 } RER < 0.9 \end{cases}$ 。目标几何特征(外表、尺寸、对比度)的影响在  $GSD$  项和  $SNR$  项中表现,对大多数应用来说一般假设一个标准的目标对比度;大气影响在  $SNR$  项中表现;成像路径的长度也会影响到  $GSD$ ;传感器的影响被  $GSD$  和有关 MTF 项(包括  $RER$ 、 $H$  和  $G$  等项)表现;图像处理的影响在 MTFc 中表现,一般假设有一个足够好的硬拷贝显示。文献 1 对 GIQE 中各参量影响进行了实验分析,结果表明  $GSD$  和  $RER$  是影响 GIQE 的重要参数,而  $H$ 、 $G/SNR$  对 GIQE 的影响相对较小。

### 1.2 目标检测率模型(TAS 模型)<sup>[2]</sup>

利用前面讨论的 NIIRS 和 GIQE,可以定性描述某遥感监测系统的可解译性能,但是还不能对可解译性定量描述,因此有必要研究目标检测率模型。20 世纪 50 年代,Johnson 根据大量的实验得到 TAS 模型,经过修正的 TAS 模型如下:如果要得到 50% 的检测率,需要包含在目标特征尺寸(目标的特征尺寸指目标被观察到面积的平方根)内的线对数目  $N_{50}$  为 1,如果已知包含在目标特征尺寸内的线对数目  $N$ ,该目标的检测率可由 TTPF(目标转移概率函数)给出:

$$P(N) = \frac{(N/N_{50})^{2.7+0.7N/N_{50}}}{1+(N/N_{50})^{2.7+0.7N/N_{50}}} \quad (2)$$

由公式(2)计算目标检测率必须得到  $N$ (包含在目标特征尺寸内的线对数目),显然  $N$  值和目标尺寸、目标/背景对比度以及图像质量都存在关系。Shumaker D. J.<sup>[3]</sup>利用下式计算  $N$ :

$$N = \rho_{\max} \frac{d_c}{R} \quad (3)$$

其中,  $R$  (km)是从传感器到目标的距离,  $d_c$  (m)为目标的特征尺寸,  $d_c = \sqrt{W_{igt}H_{igt}}$  这里  $W_{igt}$  和  $H_{igt}$  指目标被观察到的宽度和长度,  $\rho_{max}$  (周期数/毫弧度)指最大的可分辨空间频率。对于一个 S&R 系统来说,其最小的地面采样间隔  $GSD_{min}$  (m)和最大的可分辨空间频率  $\rho_{max}$  (周期数/毫弧度)是直接对应的,存在以下关系:

$$2GSD_{min} = \frac{R}{\rho_{max}} \tag{4}$$

而  $GSD_{min}$  可利用 GIQE 得到:

$$GSD_{min} = 10^{\frac{10.251 + \lg RER_{GM} - NIIRS - 0.656H - 0.344G/SNR}{a}} \tag{5}$$

那么包含在目标特征尺寸  $d_c$  (m)内的线对数目  $N$  可直接由  $GSD_{min}$  (m)来计算得到:

$$N = \frac{d_c}{2GSD_{min}} \tag{6}$$

### 1.3 监视区域目标分布模型

假设监视区域  $C$  可分割为许多小的不重叠的单元  $C_1, C_2, \dots, C_N$  ( $C = C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_N$ ), 监视区域中的目标  $T_1, T_2, \dots, T_M$  ( $T = \{T_m | 1 \leq m \leq M\}$ ) 分别独自散布在这些小单元中,任一目标  $T_m$  ( $T_m \in T$ ) 出现在任一给定单元  $C_n$  ( $C_n \subset C$ ) 中的概率设为  $P_{(m,n)} \in (0, 1)$ , 则有:

$$\sum_{n=1}^N P_{(m,n)} = 1, \quad 1 \leq m \leq M \tag{7}$$

可利用前面讨论的 NIIRS、GIQE 模型和 TAS 模型来计算目标  $T_m$  的检测率,从而得到任一目标  $T_m$  ( $T_m \in T$ ) 在监视区域  $C$  中的初始分布  $p_0 = [P_{(m,1)} P_{(m,2)} \dots P_{(m,N)}]$

由于遥感图像的传输、处理和解译都存在时延,而被监视的时敏目标位置可能发生变动,因此目标群  $T$  在监视区域  $C$  中的分布是变化的。假设目标在每个小的时间间隔  $s$  内的移动一般不超过一个单元,当  $s \leq \frac{R}{v_{max}}$  式成立时,该假设条件就可被满足,其中,  $v_{max}$  为该时敏目标的最大速度,  $R$  为每个单元的限定范围。可假设每一个目标在每行中服从简单的对称随机走动,即在每个小的时间间隔  $s$  内,目标保持静止的概率为  $q$ ,那么目标向两边相邻单元机动的概率为  $\frac{1-q}{2}$ 。在边沿处,目标向相邻单元机动概率则为  $1-q$ 。这实际上是一个各态历经的 Markov 链<sup>[4]</sup>,经过  $k$  个小的时间间隔  $s$  后,任一目标  $T_m$  ( $T_m \in T$ ) 在监视区域  $C$  中的分布可由下式得到:

$$p_k = p_0 \times P^k \tag{8}$$

其中,  $P$  是  $N \times N$  的转换矩阵,

$$P = \begin{bmatrix} q & 1-q & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{1-q}{2} & q & \frac{1-q}{2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1-q}{2} & q & \frac{1-q}{2} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{1-q}{2} & q & \frac{1-q}{2} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1-q & q \end{bmatrix} \tag{9}$$

### 1.4 信息需求及 Kullback-Leibler 距离

为避开使用者运用情报这种人为不确定因素对效能分析的影响,可以以使用者的信息需求作为评价基准。对于使用者来说,目的是发现监视区域的目标,那么就可以用目标  $T_m$  ( $T_m \in T$ ) 在监视区域  $C$  的实际分布  $r_m = [r_{(m,1)} r_{(m,2)} \dots r_{(m,N)}]$  来表示使用者的信息需求。其中,  $r_{(m,n)} \in (0, 1)$  表示目标  $T$

$m(T_m \in T)$  出现在任一给定单元  $C_n (C_n \subset C)$  中的概率。

通过遥感监视系统获得的监视区域目标分布为  $p_k$ , 使用者的信息需求由监视区域中实际的目标分布  $r_m$  来表示, 那么, 遥感侦察与监视系统满足使用者信息需求的程度可通过度量两个概率分布  $r_m$  和  $p_k$  之间的差异来表示, 这就使效能分析问题转化为计算两概率分布差异的数学问题。

Kullback-Leibler 距离是度量两个概率分布差异的经典方法, 对于两个概率分布  $p$  和  $q$ , Kullback-Leibler 距离可由下式表示:

$$K(p, q) = A \sum_x p(x) \ln \frac{p(x)}{q(x)} + B \sum_x [1 - p(x)] \ln \frac{1 - p(x)}{1 - q(x)} \quad (10)$$

上式中  $A, B$  为常数, 一般取  $A = 1, B = 1$ , 如取  $A = 1, B = 0$  则  $K(p, q)$  就表示交互熵。  $K(p, q)$  表示两概率分布之间的差异, 如果两概率分布完全相同, 则  $K(p, q) = 0$ , 否则  $K(p, q) > 0$ 。也就是说, Kullback-Leibler 距离不可能出现和主观经验不符的负值。这里用 Kullback-Leibler 距离来度量侦察与监视系统对使用者信息需求的满足程度。

### 1.5 算法实现步骤

算法实现步骤如下:

(1) 分割监视区域为不重叠的单元  $C_1, C_2, \dots, C_N$ , 监视区域中感兴趣目标  $T_1, T_2, \dots, T_M$  分布在不同的单元内, 直接可得目标在监视区域内的实际概率分布  $r_m = [r_{(m,1)}, r_{(m,2)}, \dots, r_{(m,N)}]$ ;

(2) 计算不同 NIIRS 等级的遥感监测系统对目标的检测率, 分别由式(5)、式(6)和式(2)计算(一般来说, 参量  $RER$  取 0.75、 $H$  取 1.4、 $G$  取 10 和  $SNR$  取为  $6\sigma^{11}$ ), 可得不同 NIIRS 等级的 S&R 系统探测到的目标初始分布  $p_0$ ;

(3) 利用(10)式分析无时延条件下不同 NIIRS 等级的遥感监测系统对使用者信息需求的满足程度;

(4) 考虑传输和处理时延的影响, 先如前所述确定小的时间间隔  $s$ , 再利用式(8)计算不同时延条件下目标分布的变化情况(参量  $q$  不妨取值 0.5), 得到不同时延  $k \times s$  条件下的目标分布  $p_k$ , 然后利用(10)式分析不同时延条件下不同 NIIRS 等级的遥感监测系统对使用者信息需求的满足程度。

## 2 应用实例

假设监视区域大小为  $1000m \times 1000m$ , 划分为 100 个  $100m \times 100m$  单元 ( $R = 100m$ ), 在该区域内有 3 个感兴趣的目标  $T_1(3, 5), T_2(5, 3), T_3(7, 7)$ , 目标大小分别为  $1m \times 1m, 2m \times 4.5m$  和  $9m \times 4m$ , 则其特征尺寸分别为  $1m, 3m$  和  $6m$ , 目标最大机动速度为  $v_{max} = 1m/s$ , 则小的时间间隔  $s$  可取为  $100s$ 。

首先, 可得到目标在监视区域内的实际概率分布  $r = (r_1, r_2, r_3)$ , 图 1 是实际概率分布累加后的结果。其次, 计算不同 NIIRS 等级的遥感监测系统对目标的检测率, 三个特征尺寸  $d_c$  分别为  $1m, 3m$  和  $6m$  的目标在不同 NIIRS 等级 S&R 系统中的检测率(如图 2 所示)。然后可得不同 NIIRS 等级的 S&R 系统探测到的目标初始分布  $p_0$ , 图 3 是 NIIRS 等级为 4 的 S&R 系统探测到的目标初始分布累加后的结果。考虑传输和处理时延的影响, 计算时延 30min 条件下(即  $k \times s = 1800, k = 18$ )目标分布的变化情况, 可得到  $p_{18}$ , 不同时延条件下不同 NIIRS 等级的 S&R 系统对使用者信息需求的满足程度如图 4 所示。

## 3 结 论

图 3 定量表示出了不同尺寸独立目标在不同质量的可见光遥感监测图像中检测率的差异。从图 4 中可以看出, 如果 S&R 系统能提供大于 NIIRS 5 级的图像, 则在不考虑传输处理时延的情况下, 该 S&R 系统能满足使用者要求。NIIRS 5 级的图像所对应的空间分辨率大约为  $1m$ , 因此对于该监视场景, 空间分辨率高于  $1m$  的 S&R 系统能力是足够的。这个结论和解译专家的经验值相吻合。另外, 从图 4 中还可看到, 传输和处理时延对效能影响很大, 时延超过半小时后遥感监视系统的效能急剧变坏, 相当于或低于 NIIRS 2.8 级的 S&R 系统在不考虑时延情况下的效能。

本文综合了几种效能分析方法的优点, 通过对地面目标部署的不确定性建模, 将复杂的效能评估问

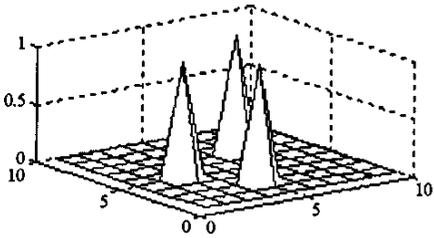


图 1 目标实际分布

Fig.1 Real distribution of the targets

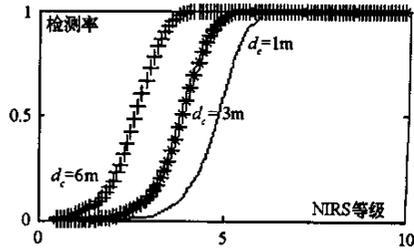


图 2 不同目标在不同 NIRS 下检测率

Fig.2 Detection ratio of various targets varying as NIRS

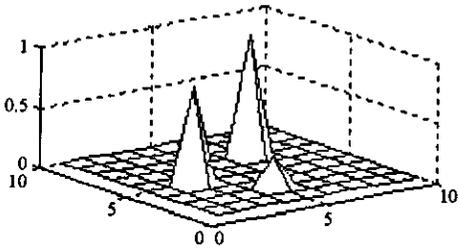


图 3 探测到的目标初始分布

Fig.3 Original distribution detected of the targets

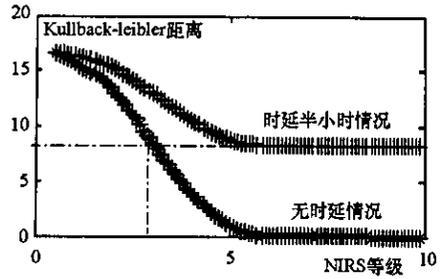


图 4 不同 NIRS 等级遥感监测系统在不同时延时对信息需求满足程度

Fig.4 Grade of satisfaction to information varying as NIIRS of remote surveillance systems with various levels of delay

题转化为概率分布之间的差异度量问题,提出了一种新的评估 S&R 系统效能的方法,新方法可研究传输和处理时延的影响。另外,本文提出的方法可推广用于红外和合成孔径雷达等其它 S&R 系统效能评估,以及用于评价多源图像融合的效能。

参考文献:

[ 1 ] Leachtenauer J C , et al. Surveillance and Reconnaissance Imaging Systems[ M ]. Artech , Boston , 2001 .  
 [ 2 ] Driggers R G , et al. Sensor Performance Conversions for Infrared Target Acquisition and Intelligence-surveillance-reconnaissance Imaging Sensors [ J ]. Applied Optics , 1999 , 38 ( 28 ) : 5936 - 5943 .  
 [ 3 ] Shumaker D. Wood J , et al. FLIR Performance Handbook[ M ]. Alexandria , VA :DCS Corporation , 1988 .  
 [ 4 ] Goodman R. Introduction to Stochastic Model[ M ]. The Benjamin Cummings Publishing Co. , Menlo Park , 1988 .  
 [ 5 ] Sherrill T , et al. Quantifying Situation Awareness in Janu[ R ]. Operations Research Center Technical Report , U.S. Military Academy , West Point , 1998 .

