

基于证据推理的卫星遥感探测效能评估

谢剑锋,王 鹏,何川东,崔 莉,岑 卓

(北京市遥感信息研究所,北京 100192)

摘要:针对卫星遥感探测评估问题,根据遥感卫星的系统特点,构建了卫星遥感探测效能的评估指标体系,以此为基础,提出利用D-S证据推理方法,有效融合专家系统信息,降低卫星遥感探测评估中的不确定性,建立基于证据推理的卫星遥感探测效能评估模型;最后对卫星遥感探测评估问题进行仿真计算,仿真结果表明:该模型能够实现确定信息和不确定信息的结合,使卫星遥感探测效能评估更结合实际、更加科学合理。

关键词:卫星;遥感探测;效能评估;证据推理

本文引用格式:谢剑锋,王鹏,何川东,等.基于证据推理的卫星遥感探测效能评估[J].四川兵工学报,2015(2):98-101.

Citation format:XIE Jian-feng, WANG Peng, HE Chuan-dong, et al. Effectiveness Evaluation for Satellite Remote Sensing Detect Based on Evidential Theory[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015(2):98-101.

中图分类号:E917;G311

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2015)02-0098-04

Effectiveness Evaluation for Satellite Remote Sensing Detect Based on Evidential Theory

XIE Jian-feng, WANG Peng, HE Chuan-dong, CUI Li, CEN Zhuo

(Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100192, China)

Abstract: For solving the problems of the evaluation of satellite remote sensing detect, we built the evaluation index system of the satellite remote sensing detection efficiency based on the characteristics of remote sensing satellite system, which aimed to set up the satellite remote sensing detection effectiveness evaluation model based on evidential reasoning by using the D-S evidence theory and combining the information from expert system in reliability evaluation effectively and decreasing the uncertainty of the reliability evaluation of satellite remote sensing detect. Finally, simulation calculation on the evaluation of satellite remote sensing detection was processed, and the results show that this model could realize the combination of information and uncertain information, and could make the satellite remote sensing detection effectiveness evaluation more practical, more scientific and reasonable.

Key words: satellite; remote sensing detect; effectiveness evaluation; evidential theory

随着空间技术的不断发展,卫星性能不断提高,数量不断增加,卫星遥感探测也在各领域中发挥着越来越重要的作用^[1]。科学有效地评估卫星效能,对提高遥感卫星的使用效益具有重要的现实意义,也可为卫星的发展前景和改进方向提供决策依据。卫星遥感探测系统是一个复杂的系统,包含着多种不确定因素,常用的评估方法如模糊综合评价法、层

次分析法、人工神经网络等,能够将定性和定量分析有机结合,尽量减少个人主观臆断所带来的弊端,降低评估过程中的人为因素的影响。然而,卫星遥感探测效能评估过程中,存在着不确定性的数据,而上述方法相对而言不适合处理不确定性因素问题,因此,本文引入D-S证据推理^[2]理论,该方法能够很好地表示“不确定性”等重要概念,已广泛应用于其

他一些领域的评估与评价,如文献[3],该方法的处理过程更加符合人们的思维方式,Dempster-Shafer 合成法则可以综合不同数据源的知识或数据,把不确定性降到最低。

本文通过构建卫星遥感探测效能评估指标体系,建立基于 D-S 证据推理的评估模型,对卫星遥感探测效能进行了评估,并通过仿真实例验证了此方法是合理可行的。

1 D-S 证据理论的基本原理

D-S 证据推理方法(即 Dempster-Shafer 方法,简称 D-S 方法)是利用证据理论所得到的不确定性推理方法。证据理论是 A. P. Dempster 于 1967 年提出,由他的学生 G. Shafer 于 1976 年出版的《证据的数学理论》^[2]一书所发展。

1.1 证据理论的数学模型

1) 辨别框。证据理论中,证据不仅是人们分析命题求取其基本可信度所依据的事物的属性与客观环境(实证据),还包括人们的经验、知识和对该命题所作的观察和研究^[4]。对于一个要评价的问题,假设所有可能的评价结果的集合用 Θ 表示,则称 Θ 为辨识框架。而我们关心的任一命题都是 Θ 的一个子集。

2) 基本概率分配函数。基本概率分配函数是一个 $[0, 1]$ 之间的正数,它与支持某一假定的证据相联系,其大小表示该证据支持或反对该假定的精确程度,通常用 $m(A)$ 表示, A 代表的是辨别框架中的任一子集。一个基本分配函数须满足以下条件

$$\begin{cases} 0 \leq m(A) \leq 1 & \forall A \subseteq \Theta \\ m(\phi) = 0 \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \end{cases}$$

3) 信任函数。对于 $2^\Theta \in [0, 1]$,信任函数定义为

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (\forall A \subseteq \Theta) \quad (1)$$

$Bel(A)$ 表示对 A 的总信任度,基中, 2^Θ 为辨别框构成的假设空间。由定义可知, $Bel(\phi) = 0, Bel(\Theta) = 1$ 。

4) 似真函数。似真函数 Pl 的定义为,对于 $2^\Theta \in [0, 1]$:

$$\begin{aligned} pl(A) &= 1 - Bel(\bar{A}) = \sum_{B \cap A = \phi} m(B), \\ \forall A \subseteq \Theta, \bar{A} &= \Theta - A \end{aligned} \quad (2)$$

$Pl(A)$ 表示不否定 A 的信任度, $Pl(A) \geq Bel(A)$ 。

1.2 证据理论的合成法则

不同来源的多个证据对同一假设的影响的支持通过 Dempster 合成法则来反映。对于同一辨别框上的两个信任函数 Bel_1 和 Bel_2 ,合成后的信任函数为

$$Bel = Bel_1 \oplus Bel_2 \quad (3)$$

基本概率分配函数为

$$m(A) = \begin{cases} K^{-1} \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j) & A \neq \phi \\ 0 & A = \phi \end{cases} \quad (4)$$

其中,

$$K = \sum_{A_i \cap B_j \neq \phi} m_1(A_i) m_2(B_j) = 1 - \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i) m_2(B_j) \phi,$$

为归一化常数,反映对于同一假设各证据相互之间的矛盾程度。在这里使用 K 是为避免将概率值分配给空集,当 K 为 0 时,两证据完全冲突,不能合成,因此,为了有效解决之间的冲突,对合成法则改进作如下改进。

设证据集为 $H = \{H_1, H_2, \dots, H_n\}$,权重为 $W = \{\omega_1, \omega_2,$

$\dots, \omega_n\}, \omega_i \in [0, 1], \sum_i \omega_i = 1. \omega_{\max} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$,相对权重向量 $W' = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\} / \omega_{\max}$,则证据的基本可信度的“折扣率”为 $\alpha_i (0 < \alpha_i < 1)$,且 $1 - \alpha_i = \omega_i / \omega_{\max}, i = 1, 2, \dots, n$ 。利用折扣率对原始基本概率分配函数进行调整,调整后的基本概率分配函数为

$$m'_i(A_k) = (1 - \alpha_i) m_i(A_k) \quad (5)$$

$$m'(\Theta) = (1 - \alpha_i) m_i(\Theta) + \alpha_i \quad (6)$$

式(5)、式(6)中, $k = 1, 2, \dots, l, l$ 为辨别框中非 Θ 基本概率分配函数个数。将 $m'_i(A_k), m'(\Theta)$ 代入到原合成公式中,便得到新的合成公式。改进后的信任函数为

$$Bel'(A_k) = \sum_{B \subseteq A} m'(A_k) \quad (\forall A \subseteq \Theta) \quad (7)$$

2 建立评估模型

以某国在轨某型遥感卫星为研究对象,应用 STK 工具,对其 7 d 内的卫星遥感探测效能进行仿真计算。

2.1 建立评估指标体系

卫星遥感探测效能,是在一定时间内,卫星遥感探测目标的种类、次数、时间间隔及其定位误差等^[5]。遵循建立指标体系的一般原则,在全面分析卫星系统的基础上,参照文献[6-7],主要考虑卫星遥感探测目标能力、区域目标覆盖能力、探测平均响应时间、探测最大响应时间、卫星遥感探测时间分辨率等方面,建立卫星遥感探测效能评估指标体系如图 1 所示。各指标值含义及其计算方法,另有其他文章详细介绍,本文不再赘述。

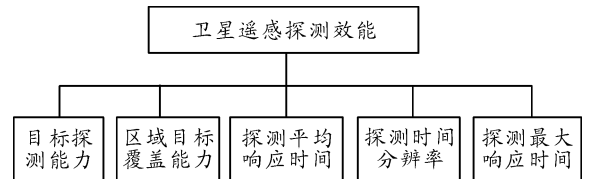


图 1 卫星遥感探测效能评估指标体系

2.2 确定评价等级

根据心理学的研究,通常情况下,等级划分的数目一般不超过 7 个,以便符合人们辨识力的实际界限,本文将评价等级分为 $H: \{H_1: 优, H_2: 良, H_3: 一般, H_4: 差, H_5: 很差\}$ 5 个等级。

假设有 E_1, E_2, \dots, E_m 等 m 位专家对卫星遥感探测效能进行评估,每位专家对应的有一可信度 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$,

$C_{ij}(H_k)$ 为专家 i 给出的对应的指标 j 效能等级为 k 的不确定性描述,则基本概率分配函数为

$$m_{ij}(H) = \begin{cases} \alpha_1 \cdot C_{ij}(H_1) & H = H_1 \\ \vdots & \\ \alpha_1 \cdot C_{ij}(H_l) & H = H_l \\ 1 - \alpha_1 & H = \Theta \end{cases}$$

设 m_1 和 m_2 为进行折扣计算后的基本概率分配函数,对它们的合成算法如式(8)所示:

$$m_1(H_k) \oplus m_2(H_k) = m_1(H_k) + m_2(H_k) + m_2(H_k)m_2(\Theta) + m_1(\Theta)m_2(H_k) / (m_1(H_2)m_2(H_2) + m_1(H_k)m_2(\Theta) + m_1(\Theta)m_2(H_2) + \dots + m_1(H_l)m_2(H_l) + m_1(H_l)m_2(\Theta) + m_1(\Theta)m_2(H_l) + m_1(\Theta)m_2(\Theta)) \quad (8)$$

按照改进的合成原则,经过 $m-1$ 次合成后,得到最终合成结果 $M(X_k)$,则信任度函数为

$$Bel'(H_k) = \sum_{X \subseteq X_k} M(X_k) \quad (\forall X_k \subseteq \Theta) \quad (9)$$

计算出各个效能指标状态值后,可以对其进行分布式描述。

3 算例

基于证据论理的卫星遥感探测效能评估,数据来源于 STK 仿真,并邀请 10 位相关方面的专家对各指标值进行无量纲化处理并进行评估。设定 10 位专家的可信度分别为 $\alpha_1=0.9, \alpha_2=0.7, \alpha_3=0.85, \alpha_4=0.75, \alpha_5=0.85, \alpha_6=0.8, \alpha_7=0.9, \alpha_8=0.75, \alpha_9=0.8, \alpha_{10}=0.7$ 。各专家的判断权值为 $u = (u_1, u_2, \dots, u_{10}) = (0.1, 0.1, 0.08, 0.1, 0.12, 0.1, 0.1, 0.12, 0.1, 0.08)$ 。

以探测时间分辨率为例,专家组给出的评估结果如表 1

所示。

表 1 探测时间分辨率效能评估表

	优	良	一般	差	很差
专家 1	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1
专家 2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2
专家 3	0.3	0.4	0.15	0.1	0.05
专家 4	0.1	0.2	0.4	0.2	0.1
专家 5	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1
专家 6	0.1	0.4	0.2	0.2	0.1
专家 7	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2
专家 8	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1
专家 9	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1
专家 10	0.2	0.2	0.35	0.15	0.1

由表 1 可得到原始基本概率分配函数,如表 2 所示。

由式(5)、式(6),计算改进后的基本概率分配函数如表 3 所示。

根据式(4)和式(8)逐次对表 3 的基本概率分配函数进行合成,经过 9 次合成后,结果为:(0.221 5, 0.395 4, 0.253 8, 0.087 6, 0.037 8, 0.004 0),由此可得到信任函数 $Bel(H) = \{(H_1:0.221 5), (H_2:0.395 4), (H_3:0.253 8), (H_4:0.087 6), (H_5:0.037 8), (H_6:0.004 0)\}$,即效能是“优”的程度为 22.15%,是“良”的程度为 39.54%,是“一般”的程度为 25.38%,是“差”的程度为 8.76%,是“很差”的程度为 3.78%,如图 2 所示。

表 2 探测时间分辨率效能评估原始基本概率分配函数表

	专家评分权重	优	良	一般	差	很差	Θ
m_1	0.1	0.18	0.18	0.27	0.18	0.09	0.1
m_2	0.1	0.21	0.14	0.14	0.07	0.14	0.3
m_3	0.08	0.255	0.34	0.1275	0.085	0.0425	0.15
m_4	0.1	0.075	0.15	0.3	0.15	0.075	0.25
m_5	0.12	0.17	0.255	0.17	0.17	0.085	0.15
m_6	0.1	0.08	0.32	0.16	0.16	0.08	0.2
m_7	0.1	0.09	0.18	0.27	0.18	0.18	0.1
m_8	0.12	0.3	0.225	0.075	0.075	0.075	0.25
m_9	0.1	0.32	0.16	0.16	0.08	0.08	0.2
m_{10}	0.08	0.14	0.14	0.245	0.105	0.07	0.3

表3 改进后的探测时间分辨率效能评估基本概率分配函数表

	专家评分权重	优	良	一般	差	很差	Θ
m'_1	0.1	0.15	0.15	0.225	0.15	0.075	0.25
m'_2	0.1	0.175	0.117	0.117	0.058	0.117	0.417
m'_3	0.08	0.17	0.227	0.085	0.057	0.028	0.433
m'_4	0.1	0.062	0.125	0.25	0.125	0.062	0.375
m'_5	0.12	0.17	0.255	0.17	0.17	0.085	0.15
m'_6	0.1	0.067	0.267	0.133	0.133	0.067	0.333
m'_7	0.08	0.075	0.15	0.225	0.15	0.15	0.25
m'_8	0.12	0.3	0.225	0.075	0.075	0.075	0.25
m'_9	0.1	0.267	0.133	0.133	0.067	0.067	0.333
m'_{10}	0.08	0.093	0.093	0.163	0.07	0.047	0.533

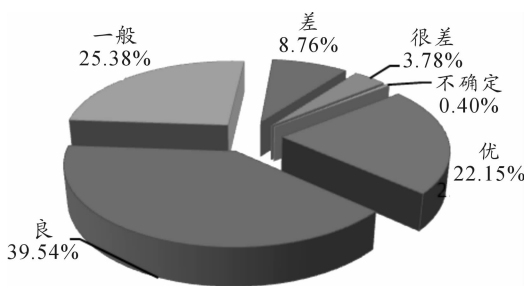


图2 探测时间分辨率效能计算结果

依此方法,对其他几个指标进行评估,以此类推,将所有指标进行证据合成计算,便可得到最终的效能评估值。

4 结论

在建立卫星遥感探测效能评估指标体系的基础上,应用D-S证据推理理论,研究了基于证据推理的卫星遥感探测效能评估方法,构建了评估模型。通过实例分析,可以看出该方法在评估过程中,能够合成地考虑各种因素,又可排除影响较小的次要因素,能够解决权重和不完备对不确定性的影响,提高了评估精度。

参考文献:

- [1] 慈元卓,李菊芳,贺仁杰. 不确定环境下多星联合观测调度问题研究[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(5):876-883.
- [2] SHAFER G. A Mathematical Theory of Evidence [M]. Princeton NJ:Princeton University Press,1976.
- [3] 周美春,钱新,钱瑜. 证据推理法在战略环境评价中的应用[J]. 中国环境科学,2008(11):1042-1046.
- [4] 朱静. 基于D-S证据理论的网络安全风险评估模型[D]. 北京:华北电力大学,2008.
- [5] 吴炜琦,张育林. 基于Agent的卫星体系效能评估仿真方法[J]. 计算机仿真,2007(7):47-50.
- [6] 董成喜,吴德伟. 利用粗糙集评估卫星导航系统效能[J]. 电光与控制,2008(11):84-87.
- [7] 王玉菊,岳丽军. 基于模糊层次分析法的卫星探测效能评估算法[J]. 系统仿真学报,2012(8):1665-1668.

(责任编辑 杨继森)

(上接第79页)

- [3] 梁森,梁磊,米鹏. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构的新进展[J]. 应用力学学报,2010,27(4):767-771.
- [4] 李烜,梁森,吴宁晶,等. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构阻尼性能的实验研究[J]. 科学技术与工程,2010,10(6):1510-1513.
- [5] 张忠胜,梁森. 嵌入式中温共固化复合材料阻尼结构制作工艺及层间结合性能[J]. 航空学报,2013,34(8):1972-1979.
- [6] 米鹏,梁森,张义霞. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构低

- 速冲击性能的数值模拟[J]. 振动与冲击,2012,31(14):98-101.
- [7] 付铁柱,蔡怀勋,汪星平. 氟橡胶及硫化机理概述[J]. 化工生产与技术,2011,18(5):1-5.
- [8] Dick. Rubber. Technology: Compounding and Texting for Performance [M]. München:Carl Hanser Verlag,2001.
- [9] 左孔成,张林,彭金方,等. 填料形态对丁腈橡胶杂化阻尼复合材料动态力学性能影响[J]. 功能材料,2014(5):5065-5069.

(责任编辑 杨继森)