

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.12.008

引用格式:付凯,夏靖波,张晓燕,等.一种基于云模型的网络态势综合评估方法[J].电讯技术,2016,56(12):1346-1351. [FU Kai, XIA Jingbo, ZHANG Xiaoyan, et al. A network situation integrated assessment method based on cloud model[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(12):1346-1351. ]

# 一种基于云模型的网络态势综合评估方法\*

付 凯\*\*<sup>1</sup>,夏靖波<sup>2</sup>,张晓燕<sup>1</sup>,董淑福<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 信息与导航学院,西安 710077;2. 厦门大学 嘉庚学院,福建 漳州 363105)

**摘 要:**针对网络态势评估中存在的模糊性、随机性和指标量化不统一等问题,提出了一种基于云模型的网络态势综合评估方法。综合考虑实数型、区间型和模糊型指标并统一用云模型量化表示,采用主观与客观相结合的赋权方式,并利用云相似性理论进行网络态势综合评估。对通信网络态势评估的实例分析表明,该方法能够合理地实现网络态势的定性及定量评估,并且保留了评估过程中的不确定性。

**关键词:**通信网;网络态势评估;云模型;云相似性理论

**中图分类号:**TN915      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-893X(2016)12-1346-06

## A Network Situation Integrated Assessment Method Based on Cloud Model

FU Kai<sup>1</sup>, XIA Jingbo<sup>2</sup>, ZHANG Xiaoyan<sup>1</sup>, DONG Shufu<sup>1</sup>

(1. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;  
2. Tan Kah Kee College, Xiamen University, Zhangzhou 363105, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of fuzziness, randomness and different standards of index quantification in network situation assessment, an integrated method for assessing network situation based on cloud model is proposed. Real number, interval number and fuzzy number are all expressed by cloud model, and similar cloud theory is utilized in network situation integrated assessment with integrating subjective and objective weights. Example analysis for communication networks shows that the proposed method can achieve rational network situation assessment qualitatively and quantitatively, and retain the uncertainty in the process of situation assessment.

**Key words:** communication network; network situation assessment; cloud model; similar cloud theory

### 1 引 言

随着信息栅格<sup>[1]</sup>、云计算、虚拟化<sup>[2]</sup>等信息技术的发展,通信网络已成为一个多网系交织、多业务承载的复杂系统,呈现出固定与移动网系相互融合、有线与无线手段综合运用等特点,这给通信网络管理与评估带来巨大挑战。网络态势感知是网络管理

的发展方向,是指对网络中各类设备运行状况、各类网络及用户行为所构成的整个网络的当前状态进行分析评估并预测其发展趋势<sup>[3-4]</sup>。网络态势评估是网络态势感知的核心环节,借助数学工具对当前网络状态进行合理评价。目前,网络态势评估的研究大多面向单一类型网络(如 Internet)并集中于网络

\* 收稿日期:2016-03-11;修回日期:2016-06-22      Received date:2016-03-11;Revised date:2016-06-22  
基金项目:航空科学基金项目(20141996018);陕西省自然科学基金项目(2012JZ8005)  
Foundation Item: The Aeronautical Science Foundation of China(20141996018); The Natural Science Fundamental Research Planned Project of Shaanxi Province(2012JZ8005)

\*\* 通信作者:fukaia3@163.com      Corresponding author:fukaia3@163.com

安全态势领域,评估方法主要包括基于数学模型<sup>[5]</sup>、基于知识推理<sup>[6]</sup>和基于模式识别<sup>[7]</sup>等 3 类。基于数学模型的方法通过权重分析、集对分析等建立明确的数学表达式,模型易于理解,但参数选择易受主观因素影响。基于知识推理的方法是在先验知识的基础上,采用 D-S 证据理论、贝叶斯网络、模糊推理等智能理论进行推理得到对当前态势的评价,但推理规则维护及开销是需要考虑的问题。基于模式识别的方法在对态势空间进行划分的基础上,利用粗集、神经网络、灰关联分析等理论进行模式匹配,引入机器学习机制使得评估结果更加准确,但也带来计算量大等问题。随着通信网络建设规模和业务范围的不断扩大,其复杂性和不确定性也随之增加。在面向多网系多指标复杂系统的网络态势综合评估中,由于测量环境及工具各异、专家知识及经验不同等原因,存在指标测量结果随机性大、专家主观判断模糊性大等问题,并且不同类型指标的量化标准也不同。云模型<sup>[8]</sup>作为一种定性定量转换模型,将概念的模糊性和随机性有机结合起来,在系统评估<sup>[9]</sup>、智能预测等方面具有广泛的应用。文献[10-11]提出了基于云模型的网络安全态势评估方法,有效处理了态势评估中的不确定性问题,使评估结果更加合理。

基于此,本文提出一种基于云模型的网络态势综合评估方法,综合考虑多种类型指标并统一用云模型量化表示,采用主客观相结合的赋权方法,并基于云相似性理论实现网络态势的定性及定量评估,最后通过实例分析证明了该方法的合理性。

## 2 云模型基础理论

### 2.1 云的定义及数字特征<sup>[12]</sup>

设  $U$  是一个用精确数值表示的定量论域,  $C$  是  $U$  上的一个定性概念,若定量值  $x \in U$ ,且  $x$  是定性概念  $C$  的一次随机实现,  $x$  对  $C$  的确定度  $\mu(x) \in [0,1]$  是具有稳定倾向的随机数,则  $x$  在论域  $U$  上的分布称为云,每一个  $x$  称为一个云滴。

云模型用期望  $Ex$ 、熵  $En$  和超熵  $He$  等 3 个数字特征来表征一个定性概念  $C$  的整体定量特性。其中,期望  $Ex$  是定性概念基本确定性的度量,反映了论域空间中最能代表定性概念的点;熵  $En$  是定性概念的不确定性度量,体现定性概念的随机性和模糊性之间的关联;超熵  $He$  是熵的不确定度量,反映了在论域空间中代表该定性概念所有点的不确定度

的凝聚性。

### 2.2 云的期望曲线及“3En”规则

由于正态分布的普适性,正态云是云模型中应用最广泛的一种。对于云滴变量  $x$ ,若满足  $x \sim N(Ex, En')$ ,其中  $En' \sim N(En, He)$ ,  $En \neq 0$ ,则把曲线  $y(x) = \exp[-(x-Ex)^2/2En^2]$  (1) 称为正态云的期望曲线,能够直观地描绘出云的基本几何形态(如图 1 所示)。在云模型中,不同云滴群对概念的贡献是不同的。对概念有贡献的云滴主要落在区间  $[Ex-3En, Ex+3En]$  中,称为“3En”规则。

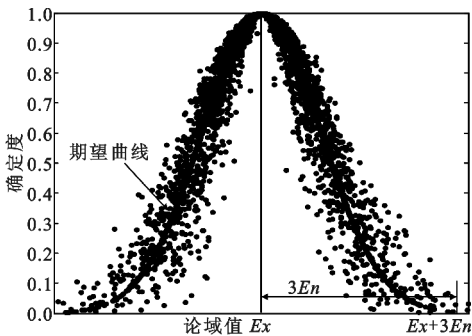


图 1 云模型示意图  
Fig. 1 Sketch map of cloud model

### 2.3 云相似性理论

相似性度量是一个常见的数学问题,广泛应用于数据挖掘、图像处理等领域。云模型之间的相似性度量主要应用于基于云模型的评估决策中,通过寻找待评对象云与评价等级云的最大相似度实现定性评价,其度量方法主要分为基于云滴距离、基于数字特征和基于相交面积等 3 类。文献[13]首次提出了相似云理论,并基于云滴距离计算云模型之间的相似度,但大量云滴计算带来时间复杂度高、结果不稳定等问题。文献[14]利用云模型的数字特征计算云模型之间的相似性,但忽略了云模型的不确定性,并且存在数字特征向量的部分分量过度占优问题。文献[15-16]基于云期望曲线的相交面积衡量云模型之间的相似性,计算复杂度较低且结果稳定。

## 3 网络态势综合评估方法

### 3.1 基本原理

本文提出的基于云模型的网络态势综合评估方法,综合考虑实数型、区间型和模糊型等多种态势指标进行归一化及云化处理,采用主观与客观相结合的赋权方法,利用云模型的计算规则生成待评对象

云并建立评价等级云,最后采用基于隶属度的云相似性度量方法进行网络态势的定性评估,并基于云模型相似度实现由定性评估到定量评估值的转换。网络态势评估流程如图 2 所示。

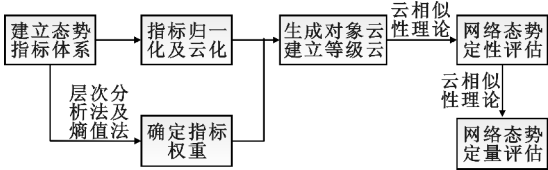


图 2 基于云模型的网络态势评估流程  
Fig. 2 Process of network situation assessment based on cloud model

3.2 实施步骤

(1) 网络态势指标归一化处理

本文研究面向多网系的网络态势综合评估问题,不同网系包含多种不同的指标。因此,应考虑可能存在的实数型、区间型和模糊型等多种类型的网络态势指标,且各指标区分效益型和成本型。实数型指标用  $p_i$  表示,区间型指标用  $[p_i^L, p_i^R]$  表示,模糊型指标用“优、良、中、差、特差”5 个等级表示。

对于效益型指标,做归一化处理如下:

$$e_i = \begin{cases} p_i / \max p_i, & \text{对于实数型指标} \\ [p_i^L / \max p_i^L, p_i^R / \max p_i^R], & \text{对于区间型指标} \end{cases} \quad (2)$$

对于成本型指标,做归一化处理如下:

$$e_i = \begin{cases} \min p_i / p_i, & \text{对于实数型指标} \\ [\min p_i^L / p_i^L, \min p_i^R / p_i^R], & \text{对于区间型指标} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\max p_i$  和  $\min p_i$  为实数型指标的理论最大值和最小值;  $\max p_i^L$  等同理。

对于模糊型指标,将其归一化与后面的云化处理同步完成。

(2) 指标云化处理

指标云化主要是将各类型指标转换为云模型  $C_i(Ex, En, He)$  表示,以应用于后续基于云模型的评估中。

对于实数型指标,根据  $n$  个抽样测量数据  $p_i(i = 1, 2, \dots, n)$  计算,  $Ex = \sum_{i=1}^n p_i / n$ ,  $En = (\max p_i - \min p_i) / 6$ ,  $He = k$  ( $k$  为较小的常数)。

对于区间型指标  $[p_i^L, p_i^R]$ ,  $Ex = (p_i^L + p_i^R) / 2$ ,  $En = (p_i^R - p_i^L) / 6$ ,  $He = k$ 。

对于模糊型指标,采用“优、良、中、差、特差”5 个等级的模糊评价价值,其对应的云模型如表 1 所示。其中,“极差”属于半降云,“优”属于半升云,其他等级对应完整的云<sup>[16]</sup>。

表 1 模糊评价价值及对应云模型

Tab. 1 Fuzzy assessment value and corresponding cloud model	
模糊评价价值	云模型
极差	$C(0.00, 0.05, 0.02)$
差	$C(0.30, 0.07, 0.02)$
中	$C(0.50, 0.08, 0.02)$
良	$C(0.70, 0.07, 0.02)$
优	$C(1.00, 0.05, 0.02)$

(3) 确定指标权重

本文采用主客观赋权相结合的方法确定指标权重,其中,主观权重  $x_i$  根据层次分析法<sup>[17]</sup>确定。层次分析法是一种系统化的综合分析方法,能够便捷地对复杂模糊的问题进行分析并做出决策,主要包括建立层次结构模型、构建判断矩阵、进行一致性检验等步骤;客观权重  $y_i$  根据熵值法<sup>[18]</sup>确定,熵可由指标云模型的  $En$  直接确定。熵值法是一种根据各项指标观测值所提供的信息量大小来确定指标权重的方法,指标观测值的差异越大则该指标越重要,其权重就越大。最后将两者进行乘法集成确定最终权重,即  $w_i = x_i y_i / \sum_{i=1}^n x_i y_i$ 。

(4) 生成待评对象云

对各指标云进行一维线性加权,得到待评对象云

$$C_z = \sum_{i=1}^n w_i \times C_i。$$

式中:  $w_i$  可以表示为  $C(w_i, 0, 0)$ 。按照云模型之间的运算规则,对于两个云  $C_1(Ex_1, En_1, He_1)$  和  $C_2(Ex_2, En_2, He_2)$ , 则有

$$C_1 + C_2 = C(Ex_1 + Ex_2, \sqrt{En_1^2 + En_2^2}, \sqrt{He_1^2 + He_2^2}), \quad (4)$$

$$C_1 \times C_2 = C(Ex_1 \times Ex_2, |Ex_1 \times Ex_2| \sqrt{(\frac{En_1}{Ex_1})^2 + (\frac{En_2}{Ex_2})^2}, |Ex_1 \times Ex_2| \sqrt{(\frac{He_1}{Ex_1})^2 + (\frac{He_2}{Ex_2})^2})。 \quad (5)$$

(5) 建立评价等级云

最终的网络态势分为“优、良、中、差、特差”5 个等级,各等级对应的云模型仍采用表 1 中的表示方式。

(6) 网络态势定性评估

网络态势定性评估主要依据待评对象云和评价等级云的相似度,找出与待评对象云相似度最大的等级云作为定性评价结果。文献[15]提出了一种新的一维正态云概念隶属度判定算法,综合考虑云模型公共面积和云滴所占比例两方面因素,并利用向量进行合成得到最终的隶属度,但此方法存在云滴计算复杂度高、向量部分分量过度占优等问题。该文献指出,云模型之间的隶属度不仅取决于其相交面积,而且取决于对象云落入概念云的云滴数量。



考虑将这两方面均有所体现又要避免上述问题,本文以相交面积与自身面积之比定义云模型之间的隶属度,进而以相互隶属度衡量云模型之间的相似度。其基本思想是如果云  $C_1$  对云  $C_2$  的隶属度较高,且云  $C_2$  对云  $C_1$  的隶属度也较高,则云  $C_1$  和  $C_2$  的相似度较高。定义云  $C_1$  对云  $C_2$  的隶属度为

$$B(C_1,C_2)=S_c/S_1。$$

(6)

式中: $S_1$  为云  $C_1$  的面积; $S_2$  为云  $C_2$  的面积; $S_c$  为云  $C_1$  和云  $C_2$  的相交面积。对于采用云期望曲线计算各云模型自身面积及相交面积的方法见文献[15],此处不再赘述。同理,云  $C_2$  对云  $C_1$  的隶属度为  $B(C_2,C_1)=S_c/S_2$ 。进而定义云模型之间的相似度为

$$D(C_1,C_2)=(B(C_1,C_2)+B(C_2,C_1))/2。$$

(7)

本文将云模型之间的相似度定义为两个云模型相互隶属度的均值,如果两个云的相互隶属度较高,则它们的相似度也较高,并且当相互隶属度都为 1 时两个云的相似度为 1。此方法本质上属于基于相交面积的云相似度量方法,同样具有计算复杂度低、结果稳定等优点。

按照式(7)计算待评对象云与各评价等级云的相似度  $D_i(i=1,2,\cdots,5)$ ,取  $\max D_i$  所对应的等级云代表的评语为网络态势定性评估结果。

(7)网络态势定量评估

定性评估能够直观地反映网络态势的总体情况,而定量评估主要用于获得精确的网络态势值,便于对比分析。考虑态势评估中的不确定性问题,本文基于云模型相似度提出一种由定性评估到定量评

估值的转换方式,以实现网络态势的定量评估。在定性评估中找出与待评对象云相似度最大与次大的两个等级云  $C_1$  和  $C_2$ (暂不考虑存在相似度相同的情况,并假设  $Ex_1<Ex_2$ ),其相似度分别为  $D_1$  和  $D_2$ 。令  $T_1=Ex_1+3En_1(1-D_1)$ ,  $T_2=Ex_2-3En_2(1-D_2)$ ,则网络态势定量评价值为

$$T=(T_1+T_2)/2。$$

(8)

上述转换方式主要依据云模型之间的相似度并结合“ $3En$ ”规则进行计算,即待评对象云与某评价等级云的相似度越高,则定量评价值与该等级云的期望  $Ex$  越接近。与直接采用待评对象云的期望  $Ex$  作为定量评估值相比,本文方法保留了态势评估中的不确定性,而且采用与待评对象云最相似的两个等级云计算均值的方式可以减小误差。

4 实例分析

某通信网络包含光纤通信网、卫星通信网、数据承载网、人工电话网等 10 个专业网系,涉及节点连通率、带宽利用率、时延稳定率等 27 个指标,其中既包含实数型、区间型和模糊型,又区分效益型和成本型,各指标类型及数据如表 2 所示(为方便仅给出网系编号及其所包含指标编号)。其中,实数型待评指标数据为多次测量结果的均值;在指标归一化处理时,对于效益型指标取  $\max p_i = 1$ ,  $[\max p_i^L, \max p_i^R] = [0.95, 1]$ ;对于成本型指标,取  $\min p_i = 0.1$ 。在指标云化处理时,为方便统一取  $He=0.02$ 。

表 2 通信网络指标类型及数据  
Tab. 2 Index type and data of a communication network

网系	网系指标	指标类型	待评指标数据	待评指标数据 归一化结果	待评指标数据 云化结果
网系 1	指标 1	实数型,效益型	0.82	0.82	$C(0.82,0.07,0.02)$
	指标 2	区间型,效益型	$[0.61,0.89]$	$[0.64,0.89]$	$C(0.76,0.04,0.02)$
	指标 3	模糊型,效益型	优	—	$C(1.00,0.05,0.02)$
网系 2	指标 1	实数型,效益型	0.75	0.75	$C(0.75,0.05,0.02)$
	指标 2	实数型,效益型	0.92	0.92	$C(0.92,0.06,0.02)$
	指标 3	模糊型,效益型	良	—	$C(0.70,0.07,0.02)$
网系 3	指标 1	区间型,效益型	$[0.68,0.95]$	$[0.71,0.95]$	$C(0.83,0.06,0.02)$
网系 4	指标 1	区间型,效益型	$[0.59,0.83]$	$[0.62,0.83]$	$C(0.72,0.03,0.02)$
网系 5	指标 1	实数型,效益型	0.73	0.73	$C(0.73,0.03,0.02)$
	指标 2	实数型,效益型	0.95	0.95	$C(0.95,0.04,0.02)$
	指标 3	实数型,效益型	0.92	0.92	$C(0.92,0.04,0.02)$
	指标 4	实数型,效益型	0.82	0.82	$C(0.82,0.05,0.02)$
	指标 5	模糊型,效益型	优	—	$C(1.00,0.05,0.02)$
网系 6	指标 1	实数型,效益型	0.74	0.74	$C(0.74,0.05,0.02)$
	指标 2	实数型,效益型	0.89	0.89	$C(0.89,0.06,0.02)$
	指标 3	实数型,效益型	0.94	0.94	$C(0.94,0.04,0.02)$
	指标 4	实数型,效益型	0.59	0.59	$C(0.59,0.07,0.02)$
	指标 5	实数型,效益型	0.68	0.68	$C(0.68,0.03,0.02)$
	指标 6	模糊型,效益型	良	—	$C(0.70,0.07,0.02)$

续表 2

网系	网系指标	指标类型	待评指标数据	待评指标数据 归一化结果	待评指标数据 云化结果
网系 7	指标 1	实数型,效益型	0.84	0.84	$C(0.84,0.04,0.02)$
	指标 2	实数型,效益型	0.79	0.79	$C(0.79,0.05,0.02)$
	指标 3	实数型,成本型	0.16	0.63	$C(0.63,0.03,0.02)$
网系 8	指标 1	实数型,效益型	0.93	0.93	$C(0.93,0.06,0.02)$
	指标 2	实数型,成本型	0.19	0.53	$C(0.53,0.05,0.02)$
	指标 3	模糊型,效益型	良	—	$C(0.70,0.07,0.02)$
网系 9	指标 1	区间型,效益型	$[0.80,0.88]$	$[0.84,0.88]$	$C(0.86,0.01,0.02)$
网系 10	指标 1	区间型,效益型	$[0.73,0.87]$	$[0.77,0.87]$	$C(0.82,0.02,0.02)$

利用层次分析法得到表 2 中各指标的主观权重为  $x_i = (0.385\ 0, 0.190\ 6, 0.021\ 4, 0.080\ 8, 0.040\ 1, 0.007\ 8, 0.047\ 0, 0.029\ 9, 0.017\ 3, 0.011\ 5, 0.011\ 5, 0.011\ 5, 0.003\ 6, 0.014\ 9, 0.014\ 9, 0.014\ 9, 0.011\ 3, 0.011\ 3, 0.005\ 2, 0.007\ 1, 0.005\ 4, 0.005\ 4, 0.011\ 6, 0.009\ 2, 0.002\ 1, 0.012\ 0, 0.016\ 3)$ 。利用熵值法得到指标客观权重为  $y_i = (0.054\ 3, 0.031\ 0, 0.038\ 8, 0.038\ 8, 0.046\ 5, 0.054\ 3, 0.046\ 5, 0.023\ 3, 0.023\ 3, 0.031\ 0, 0.031\ 0, 0.038\ 8, 0.038\ 8, 0.038\ 8, 0.046\ 5, 0.031\ 0, 0.054\ 3, 0.023\ 3, 0.054\ 3, 0.031\ 0, 0.038\ 8, 0.023\ 3, 0.046\ 5, 0.038\ 8, 0.054\ 3, 0.007\ 8, 0.015\ 5)$ 。通过乘法集成得到指标最终权重为  $w_i = (0.492\ 2, 0.139\ 2, 0.019\ 5, 0.073\ 8, 0.044\ 0, 0.010\ 0, 0.051\ 5, 0.016\ 4, 0.009\ 5, 0.008\ 4, 0.008\ 4, 0.010\ 5, 0.003\ 3, 0.013\ 6, 0.016\ 4, 0.010\ 9, 0.014\ 4, 0.006\ 2, 0.006\ 7, 0.005\ 2, 0.004\ 9, 0.002\ 9, 0.012\ 7, 0.008\ 4, 0.002\ 7, 0.002\ 2, 0.006\ 0)$ 。

计算待评对象云为  $C_x(0.808\ 2, 0.035\ 4, 0.010\ 5)$ ,利用正向云发生器<sup>[12]</sup>生成待评对象云和各评价等级云,从而得到网络态势图,如图 3 所示。

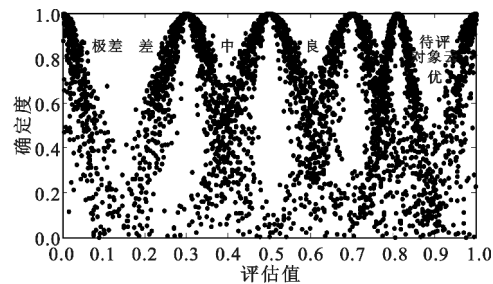


图 3 基于云模型的网络态势图

Fig. 3 Network situation chart based on cloud model

计算待评对象云与各评价等级云的相似度,并与数字特征法<sup>[14]</sup>、期望曲线法<sup>[15]</sup>作对比,如表 3 所示。其中,期望曲线法是指利用式(1)计算待评对象云的期望值(本文中  $E_x=0.808\ 2$ )对各评价等级

云的隶属度。

表 3 待评对象云与评价等级云的相似度

Tab. 3 Similarity between target cloud and ranking cloud

方法	相似度				
	极差	差	中	良	优
数字特征法	0.05	0.98	0.99	0.99	1.00
期望曲线法	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00
本文方法	0.00	0.00	0.01	0.34	0.05

由表 3 可知,数字特征法计算的各相似度区分度不大,与实际不符;期望曲线法和本文方法取最大相似度后得到的定性评估结果均为良。由态势图可以看出评估结果比较合理,且本文方法判定对象云与“优”、“中”代表的等级云也有较小的相似度,体现了态势评估中的不确定性。

根据表 3 得到  $D_1=0.34$  和  $D_2=0.05$ ,计算可得  $T_1=0.838\ 6, T_2=0.857\ 5$ ,则网络态势定量评价值为  $T=(T_1+T_2)/2=0.848$ 。

5 结 论

本文针对网络态势评估中存在模糊性、随机性和指标量化不统一等问题,提出了一种基于云模型的网络态势综合评估方法,在各类指标云化的基础上利用云相似性理论进行网络态势评估。实例分析表明,该方法能够综合考虑多种类型指标,合理地实现网络态势的定性及定量评估,并且保留评估过程中的不确定性。本文在云模型生成方法上进行了简化处理,对于不同指标的量化标准还需要做进一步的研究。

参考文献:

[1] HUNG B,DEFRANCESCO D,CHENG B N,et al. An evaluation of IP header compression on the GIG joint IP modem system[C]//Proceedings of 2014 IEEE Military Communications Conference. Baltimore, USA: IEEE, 2014:1484-1490.

[2] 贾伟,夏靖波. 一种生存性军事虚拟网络映射新方法[J]. 电讯技术,2015,55(5):545-551.

JIA Wei,XIA Jingbo. A new approach for survivable mili-

- tary virtual network mapping[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(5): 545-551. (in Chinese)
- [3] BASS T. Intrusion systems and multisensor data fusion[J]. Communications of the ACM, 2000, 43(4): 99-105.
- [4] 柏骏,夏靖波,钟贇,等. 网络运行态势感知技术及其模型[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2015, 16(1): 16-22.  
BAI Jun, XIA Jingbo, ZHONG Yun, et al. Network running situation awareness technology and its model[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 16(1): 16-22. (in Chinese)
- [5] 吴琨,白中英. 集对分析的可信网络安全态势评估与预测[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(3): 112-118.  
WU Kun, BAI Zhongying. Trusted network security situational awareness and forecast based on SPA[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(3): 112-118. (in Chinese)
- [6] ZHAO J H, ZHOU Y, SHUO L X. A situation awareness model of system survivability based on variable Fuzzy set[J]. Telkommika, 2012, 10(8): 2239-2246.
- [7] 谢丽霞,王亚超,于巾博. 基于神经网络的网络安全态势感知[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(12): 1750-1760.  
XIE Lixia, WANG Yachao, YU Jinbo. Network security situation awareness based on neural networks[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(12): 1750-1760. (in Chinese)
- [8] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.  
LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6): 15-20. (in Chinese)
- [9] ZHANG L M, WU X G, DING L Y, et al. A novel model for risk assessment of adjacent buildings in tunneling environments[J]. Building and Environment, 2013, 65(7): 185-194.
- [10] 杨宏宇,褚润林,李东博. 一种新的网络安全态势评估方法[J]. 微电子学与计算机, 2015, 32(1): 29-34.  
YANG Hongyu, CHU Runlin, LI Dongbo. A new method for network security situation assessment[J]. Microelectronics & Computer, 2015, 32(1): 29-34. (in Chinese)
- [11] 张拥军,唐俊. 基于云模型的网络安全态势分析与评估[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(1): 63-67.  
ZHANG Yongjun, TANG Jun. Analysis and assessment of network security situation based on cloud model[J]. Computer Engineering & Science, 2014, 36(1): 63-67. (in Chinese)
- [12] 李德毅,杜鹄. 不确定性人工智能[M]. 2版. 北京:国防工业出版社, 2014: 44-65.  
LI Deyi, DU Yi. Artificial intelligence with uncertainty[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 44-65. (in Chinese)
- [13] 张勇,赵东宁,李德毅. 相似云及其度量分析方法[J]. 信息与控制, 2004, 33(2): 129-132.  
ZHANG Yong, ZHAO Dongning, LI Deyi. The similar cloud and the measurement method[J]. Information and Control, 2004, 33(2): 129-132. (in Chinese)
- [14] 张光卫,李德毅,李鹏. 基于云模型协同过滤推荐算法[J]. 软件学报, 2007, 18(10): 2403-2411.  
ZHANG Guangwei, LI Deyi, LI Peng, et al. A collaborative filtering recommendation algorithm based on cloud model[J]. Journal of Software, 2007, 18(10): 2403-2411. (in Chinese)
- [15] 李海林,郭崇慧,邱望仁. 正态云模型相似度计算方法[J]. 电子学报, 2011, 39(11): 2561-2567.  
LI Hailin, GUO Chonghui, QIU Wangren. Similarity measurement between normal cloud models[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(11): 2561-2567. (in Chinese)
- [16] 查翔,倪世宏,谢川,等. 云相似度的概念跃升间接计算方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(7): 1676-1682.  
ZHA Xiang, NI Shihong, XIE Chuan, et al. Indirect computation approach of cloud model similarity based on conception skipping[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(7): 1676-1682. (in Chinese)
- [17] SAATY T L. Decision making-the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP)[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2004, 13(1): 1-35.
- [18] 周华仁,张晟,穆松,等. 综合评价方法及其军事应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2015: 18-19.  
ZHOU Huaren, ZHANG Sheng, MU Song, et al. Comprehensive evaluation method and its military application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 18-19. (in Chinese)

### 作者简介:



付凯(1987—),男,山东济宁人,2012年获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为网络管理与安全;

FU Kai was born in Jining, Shandong Province, in 1987. He received the M. S. degree in 2012. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns network management and safety.

Email: fukaia3@163.com

夏靖波(1963—),男,河北秦皇岛人,教授,主要研究方向为网络管理与安全;

XIA Jingbo was born in Qinhuangdao, Hebei Province, in 1963. He is now a professor. His research concerns network management and safety.

Email: jbxia@ sina.com

张晓燕(1970—),女,陕西西安人,副教授,主要研究方向为图像处理;

ZHANG Xiaoyan was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1970. She is now an associate professor. Her research concerns image processing.

Email: zxyxjwxj@163.com

董淑福(1970—),男,山东青岛人,教授,主要研究方向为通信网络技术、无人机信息系统。

DONG Shufu was born in Qingdao, Shandong Province, in 1970. He is now a professor. His research concerns communication network technology and UAV information system.

Email: shufudong@163.com