

评估跳频通信抗干扰能力的灰关联方法的改进^①

肖晨飞^{②***} 陈建忠^{**} 牛英滔^{**} 惠显杨^{* ***}

(^{*}解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

(^{**}南京电讯技术研究所 南京 210007)

摘要 为了提高评估跳频通信系统抗干扰能力的准确性,对典型的灰关联评估方法进行了改进,设计了一种新的评估方法。该方法在建立指标体系的基础上,根据指标对抗干扰能力的影响趋势的不同,采用多种方法计算不同指标的灰关联度系数,另外根据指标对抗干扰能力的影响程度,用一种混合聚类法实现灰关联度信息的合成。对该方法进行了仿真和验估,结果表明,该方法充分考虑了评估对象的特殊性以及指标的多样性,能够避免误判现象,提高评估准确性。

关键词 灰关联分析, 能力评估, 抗干扰通信

0 引言

跳频通信(hopping frequency communication)具有良好的抗干扰性能,在军事通信中得到了广泛应用。在现代军事通信电子对抗战中,拥有较好的抗干扰能力是保证军用无线通信装备正常通信,完成作战任务的技术基础,而对军用无线通信装备抗干扰能力的评估,则是指挥通信作战的前提。从已有资料来看,目前常用的抗干扰能力评估方法有多属性决策法^[1]、模糊综合评估法^[2]、能力指数评估法^[2]以及灰关联评估法等。在多种经典评估法中,灰关联评估法因其基础理论成熟、模型简单且适合不同系统或方案之间的比较而得到广泛运用。然而,与其他评估法一样,该方法在具体应用时,其评估准确性依然受到质疑。主要表现在:(1)对经典理论和方法生搬硬套,对评估对象特殊性研究不够,易使评估工作脱离实际,灰关联度系数算法单一,如文献[3]、[4]采用灰关联法对战术通信网抗干扰能力和跳频通信系统进行的评估,指标虽然不同,但均

只采用同一种计算方法求解灰关联度系数。(2)灰关联度的聚类方法较为单一,易产生误判的情况,如文献[5]、[6]采用算术平均法聚类,若尝试改变聚类方法,则可能得到不同结论,且其对所用方法的合理性未有说明。本文根据评估对象的特殊性,主要从这两个方面进行了改进,以达到提高评估科学性和准确性的目的。

本文对指标及其灰关联度系数的计算进行了研究,完成了指标收集整理工作,并设计了多种灰关联度系数算法;采用离差最大化方法,完成了指标赋权的过程;针对评估对象多样性的要求,设计了一种混合聚类方法,并对方法的合理性进行了论证,完成了指标信息的聚类和信息合成;结合算例对评估方法进行了仿真和验证。

1 指标体系与灰关联信息的计算

灰关联分析法的基本思想是通过研究一族曲线之间的相似程度,来判断各序列所代表的系统相互关系是否紧密,曲线越接近,序列之间的关联度就越

^① 国家自然科学基金(61102091)资助项目。

^② 男,1989年生,硕士;研究方向:军事通信抗干扰;联系人,E-mail:1009816253@qq.com;chenfeishaw@gmail.com
(收稿日期 2015-02-06)

大,反之越小^[7]。若将其运用在评估领域中,可将各指标值看作一条曲线上的各个点,研究该曲线与理想点组成的曲线之间的相似程度。若理想值表示相关能力最强时的指标值,则与之相似程度越高的指标所反映的能力也越强。

1.1 指标体系的建立

根据各指标间的某种联系,将指标进行聚类,并建立相应的指标体系是评估的第一步。本文从文献[2]中收集抗干扰能力的影响指标,主要从“空域”、“频域”、“功率域”三个方面,将指标归为三大类,进而分别反映“空域”、“频域”、“功率域”抗干扰能力。另外,将次关键的影响指标归为“其它”类,作为影响抗干扰能力的补充因素,如图1所示。最终对各装备的综合抗干扰能力的优劣做出评判。

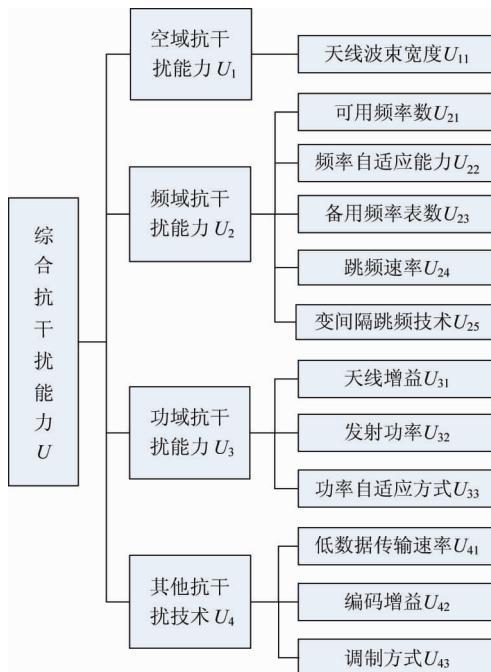


图1 跳频通信装备抗干扰能力指标体系

1.2 灰关联度系数的确定

灰关联度系数反映了实际指标值和理想指标值之间的相似程度,是灰关联法的基石。该环节在本质上和指标的去量纲化较为相似,但更注重突出同一指标在不同装备中的差距和比较。按照常规的灰关联法,假设装备 A_i 关于指标 G_j 的指标值为 a_{ij}, a_j^+ 为该指标的理想值,表示指标最优的情况,则指标 a_{ij} 的灰关联度系数如式(1)所示。

$$\kappa_{ij} = \frac{\min_i \min_j V_{ij}^+ + \rho \max_i \max_j V_{ij}^+}{V_{ij}^+ + \rho \max_i \max_j V_{ij}^+} \quad (1)$$

其中 $V_{ij}^+ = |a_{ij} - a_j^+|$, ρ 为分辨系数^[8],一般取 $\rho = 0.5$ 。

式中 V_{ij}^+ 定义的前提是假设指标值与相关能力呈线性正比(反比)关系。然而在实际情况中,两者呈非线性关系也很常见,单纯使用线性法求解灰关联度系数,会影响该环节以及以该环节为基础的后续评估的准确性。因此,为了增加评估的准确性和科学性,本文按照具体情况对指标值与相关能力的非线性进行研究,并在此基础上设计了三种非线性灰关联度系数计算法,以适应评估指标的具体要求。一般来说,指标值与相关能力关系趋势主要分为4种,如图2所示。其中 x_1, x_2, x_3 和 x_4 可根据具体指标值进行替换。

对于“凸型”走势曲线,可用对数关系曲线来拟合,即可通过对实际指标值进行对数求解,底数为 α ,将计算结果作为转换后的指标,再将其按线性型的标准进行处理。同理,对于“凹型”曲线则可用指教关系曲线来拟合,设置指数为 β ,进行转换计算。数值转换如式

$$V_j^+ = |r_{ij} - r_j^+| = \begin{cases} |a_{ij} - a_j^+|, & \text{线性} \\ |\log_\alpha a_{ij} - \log_\alpha a_j^+|, & \text{凸型} \\ |\beta^{a_{ij}} - \beta^{a_j^+}|, & \text{凹型} \end{cases} \quad (2)$$

所示,其中 α 和 β 可根据曲线走势的急缓进行设置。对于“S型”曲线,可采用拼接拟合法,即将“凹型”和“凸型”曲线进行部分截取和拼接,从而实现指标值的转换。

从上述分析可知,灰关联度系数计算式因评估对象而异,因此,较之常规方法,本方法对不同评估对象的适应性更强,更能满足实际工作需求。

对于难以给出确定值的定性指标,一般只能给出“好”“中”“差”这样的评语,此时需对其进行“灰量”的“白化”处理。首先根据评估指标的技术发展状况,设定指标所拥有的等级数目,其后,定义“白化权函数”如下式所示:

$$f[u(t)] = t/\tau, \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

其中 $u(t)$ 表示指标定性评语的灰量, t 表示该指标

的评价等级为 t 级。由此式可算出指标对应的灰关联度。如“频率自适应技术”,按功能由弱到强,可分为“无此功能”、“仅删除受扰频率”、“可删除/恢复受扰频率”和“可删除/恢复受扰频率且可切换至

备用频率”4 种,并分别给出“差”、“一般”、“较好”和“好”等评价,故该指标的等级数目 $\tau = 4$,根据式(3)可求得 4 种评语对应的灰关联度分别为 0.25、0.5、0.75 和 1。

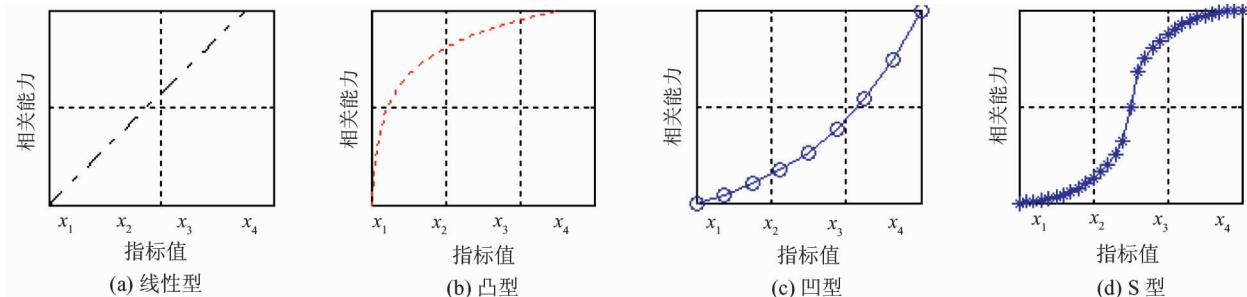


图 2 四类指标变化对相关能力的影响

由此也可以看出,对某一指标研究越深,其评估拥有的等级数也越多,当 τ 趋于无穷时,定性指标也变成定量指标。

2 权重设置

本节将采用基于灰关联度系数的离差最大化法^[9]为指标赋权。其思想是基于同一指标在不同装备间关联度系数的差值,若差值较大,说明该指标对能力评估后的排序影响大,则该指标应设置较大权重,反之亦然。特别地,若差值为 0,说明其对评估结果无影响,应将权重设为 0。不难看出,该方法强调指标间的差异,并对此差异进行放大,这样有助于各装备抗干扰能力之间的评比和排序。另外,此方法完全基于客观数据,与专家评分等主观法相比,避免了过多主观因素的介入,且不需要过多的统计数据,操作简单。

设装备 A_i 关于指标 G_j 的灰关联度系数为 κ_{ij} ,根据文献[8]的定义方式,该指标的差值 D_j 为

$$D_j = \sum_{i=1}^n D_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n |\kappa_{ij} - \kappa_{kj}| \quad (4)$$

将抗干扰能力所有影响指标的差值相加,则有

$$D = \sum_{j=1}^m D_j = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n |\kappa_{ij} - \kappa_{kj}| \quad (5)$$

于是可构造如式

$$w_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n |\kappa_{ij} - \kappa_{kj}|}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n |\kappa_{ij} - \kappa_{kj}|} \quad (6)$$

所示的权重设置模型。式中 w 表示指标 G_j 的权重, n, m 分别为装备和抗干扰能力影响指标的个数。

一般来说,权重反映了指标各自的重要程度。从此客观赋权法来看,虽然其优点显著,但与主观赋权法相比,其仅从数据着手,没有真正对指标的重要性进行比较,因此,可能会产生与实际相悖的结论。对于这一问题,可将“指标重要性”置于“灰关联度聚类”环节中考虑,可避免上述问题的发生,且效果比主观赋权或主客观结合的组合赋权更好。

3 灰关联度的聚类

3.1 聚类方法存在的问题及其分析

当完成上述两项工作后,则可进行灰关联度聚类。此时,选择合适的聚类方法非常重要。常用的方法有“调和平均”、“算术平均”、“几何平均”和“平方根平均”^[10],其中算术平均法因其运算简单、容易理解等优点,得到了更广泛的运用。然而,从目前资料来看,许多评估工作未能根据具体情况,仅用算术平均法对灰关联度进行聚类,可能会造成误判的现象。本节重点在于对该现象进行分析和指标归类,并设计合理的方法进行关联度聚类,从而提高评

估准确性。首先,结合图3对此现象进行分析(假

设 x 和 y 的权重均为0.5)。

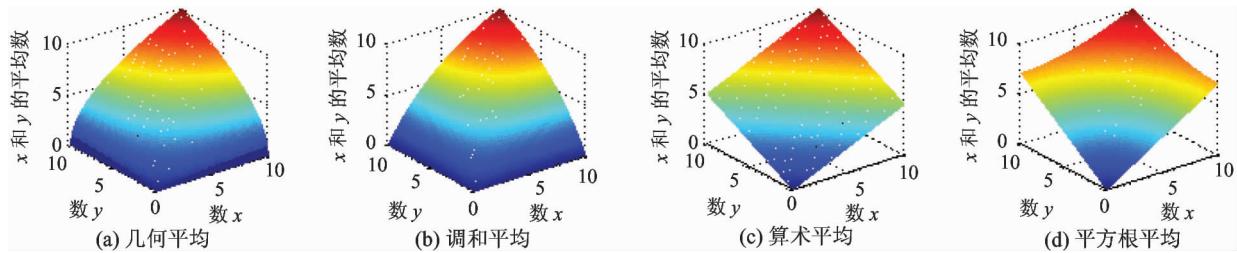


图3 四种平均算法计算结果比较

对于一般的指标来说,当某一指标变弱时,可通过其他指标的增强进行能力上的补偿,这类指标较适合进行算术平均聚类,如图3(c)所示。若数 x 下降度为3,数 y 增长度为3,二者平均数仍然可以保持不变。然而,对于某些关键技术指标,若该指标恶化,会造成系统整体能力急剧下降,甚至无法通过其他方法补偿。例如,某关键指标性能“较差”,其它指标为“一般”,从实际分析,系统的相关能力应该“较差”,然而采用算术平均法则可能得到“一般”的误判。这种情况在指标数目众多时容易发生,且仅通过“加大权重”的方式也不易改善,因此算术平均法不再适用。对于此类“惩罚型”指标,可采用几何平均或调和平均进行聚类,但考虑到几何平均的数学模型更为简单,因此本文采用几何平均法。如图3(a)所示,若数 x 恶化至0~1,无论数 y 怎么增长,其平均数也难以改善。除此之外,有些指标适合用平方根平均法进行关联度聚类,可称之为“鼓励型”指标。此类指标的特点是:改善影响大,恶化影响小。如图3(d)所示,尽管 x 值下降至0~1,通过提升 y 值,平均值仍然能保持大于5的状态。

3.2 聚类方法的设计

在明确指标类别后,则根据上述归类原则,对评估对象的影响指标进行归类。一般来说,对抗干扰能力起关键性作用的指标,如跳频体制中的跳频速率、频率自适应技术等,可归为“惩罚型”,可以看出,若通信方的跳频速率低于干扰方,或无频率自适应功能,这对对抗干扰能力带来的负面影响是无法弥补的。其次,对于功率自适应技术、变间隔跳频技术这类指标,可以看出,在其性能较好时对抗干扰能力提升较大,而在性能较差时负面影响较小,因此,

归为“鼓励型”指标。最后,可将重要性稍逊于“惩罚型”且提升或恶化效益可以互补的指标划入“常规型”行列。

完成指标分类工作后,则进行聚类方法的设计。通常,在指标体系所包含的指标中,既有“常规型”,也有“惩罚型”和“鼓励型”,因此,设计的方法必须要反映出各类指标的特点。本文在此设计了一种混合平均算子对灰关联度进行聚类。假设抗干扰能力影响指标共 $(a+b+c)$ 项,首先对指标进行重新排序,第 $1 \sim a$ 项属“常规型”, $(a+1) \sim (a+b)$ 属“鼓励型”, $(a+b+1) \sim (a+b+c)$ 属“惩罚型”;其次按照顺序先后对三类指标进行聚类,即先聚类常规指标,然后将常规指标的聚类结果作为一项鼓励型指标与其它鼓励型指标进行聚类,最后再将结果与其余惩罚型指标进行聚类,得出最终结果,如下式所示:

$$E = \prod_{k=a+b+1}^{a+b+c} \kappa_k^{w_i} \left\{ \frac{\left[\sum_{k=a+1}^{a+b} \kappa_k^2 w_k + \left(\frac{1}{\sum_{k=1}^{a+b} w_k} \sum_{k=1}^a \kappa_k w_k \right)^2 \sum_{k=1}^a w_k \right]^{\frac{1}{2}}}{\sum_{k=1}^{a+b} w_k} \right\}^{\sum_{k=1}^{a+b} w_k} \quad (7)$$

其中 E 为聚类后的综合关联度, w_i 表示指标 i 的权重值。

3.3 聚类方法设计合理性的论证

式(7)的设计是基于“先常规,再鼓励,后惩罚”的聚类顺序,然而根据排列组合原理,3类指标共有6种聚类的顺序,即“惩鼓常”、“惩常鼓”、“鼓常

惩”、“鼓惩常”、“常惩鼓”、“常鼓惩”,因此为了证明式(7)的合理性,必须将“常鼓惩”与其它 5 种顺序进行比较。对于惩罚型指标,其变化对综合关联度的影响曲线走势要与图 3(a)、(b)类似,而鼓励型,则必须与图 3(d)相近。假定现有两组指标信息如表 1、表 2 所示,其中 3 类指标各有两个,分别采用 6 种不同顺序进行灰关联度聚类,最终得出的结果如图 4 和图 5 所示。

表 1 指标信息(1)

指标类型	指标	灰关联度	权重
惩罚型	c_1	0.1 ~ 1	0.3
	c_2	0.1 ~ 1	0.2
鼓励型	b_1	0.6	0.2
	b_2	0.8	0.1
常规型	a_1	0.7	0.1
	a_2	0.7	0.1

表 2 指标信息(2)

指标类型	指标	灰关联度	权重
惩罚型	c_1	0.6	0.3
	c_2	0.8	0.2
鼓励型	b_1	0.1 ~ 1	0.2
	b_2	0.1 ~ 1	0.1
常规型	a_1	0.7	0.1
	a_2	0.7	0.1

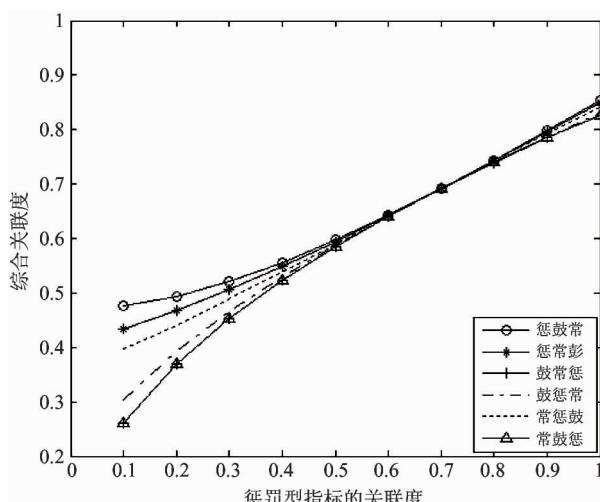


图 4 表 1 指标信息聚类结果的曲线图

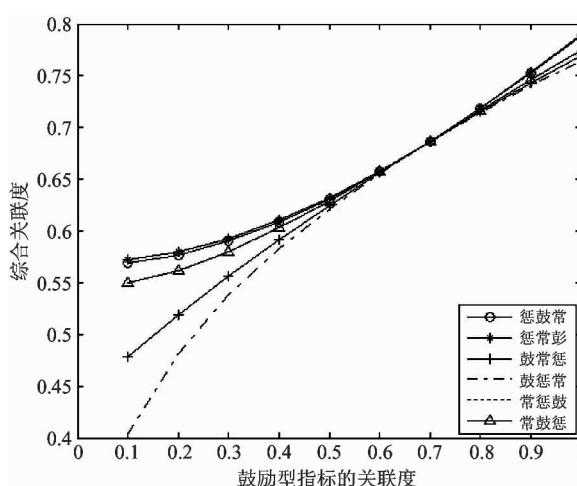


图 5 表 2 指标信息聚类结果的曲线图

结合图 3 可知图 4 中的“鼓常惩”、“鼓惩常”和“常鼓惩”符合要求;同理,图 5 中的“惩鼓常”、“惩常鼓”和“常鼓惩”符合要求。此时,仅“常鼓惩”顺序符合两项要求,另一方面,该顺序将其余类型指标的聚类结果看作一项“惩罚型”指标,说明“惩罚型”重要程度最高,这和直观上的认识也是相吻合的,故基于此顺序设计的式(7)较为合理。

经过对混合聚类法的论证还可以发现,该方法充分考虑了指标重要性对评估的影响,间接地弥补了第 2 节中单纯使用客观赋权法而忽视指标重要性所带来的不足。另一方面,与主观赋权或主客观结合的组合赋权相比,“客观赋权 + 混合聚类”对指标重要程度的反映更为准确。通过变化指标参数的方式测试评估系统,可以看出,若仅采用主观或组合赋权法,当指标数较多时,即使很重要的指标也很难占有绝对意义上较大的权重(如大于 0.5),这导致评估系统对具体指标的变化不敏感,使得评估者难以区分评估结果相近装备的好坏,而本节设计的混合聚类法却可以解决此种情况带来的问题,从而进一步提高评估的准确性。

综合上述,与常规的平均算子相比,该算子体现各指标的特点,突出了指标变化对系统能力的影响,同时,也反映了各指标对于相关能力的重要程度,即上节权重设置所忽视的问题,从而进一步提高评估的准确性。

4 算例仿真

现有待评估跳频通信装备有3类: A_1, A_2, A_3 ,根据指标的不同类型并结合式(1)~(4)对指标进行分析和处理后,其灰关联度系数如表3所示。

表3 三种装备的指标信息

指标	灰关联度系数			指标类型	
	A_1	A_2	A_3		
U_{11}	1.000	0.714	0.449	线性型	惩罚型
U_{21}	0.468	1.000	0.381	凸型	常规型
U_{22}	1.000	0.750	0.500	定性型	惩罚型
U_{23}	0.800	1.000	0.600	线性型	鼓励型
U_{24}	0.823	1.000	0.500	线性型	惩罚型
U_{25}	0.500	0.500	1.000	定性型	鼓励型
U_{31}	1.000	0.644	0.524	线性型	常规型
U_{32}	1.000	0.375	0.225	凸型	常规型
U_{33}	0.667	0.533	1.000	定性型	鼓励型
U_{41}	0.388	0.235	1.000	凸型	常规型
U_{42}	0.750	1.000	0.531	线性型	常规型
U_{43}	1.000	0.800	0.600	线性型	常规型

按照上述赋权法,求得底层指标的权重信息分别为 $w_{u1} = (1)$, $w_{u2} = (0.245, 0.200, 0.159, 0.198, 0.198)$, $w_{u3} = (0.277, 0.451, 0.272)$, $w_{u4} = (0.468, 0.287, 0.245)$ 。根据式(7),可求得各装备抗干扰能力的灰关联度,如表4所示。最后,需要对上层指标进行分析、赋权和聚类,以确定各装备综合抗干扰能力关联度。

表4 各装备抗干扰能力评估结果

抗干扰能力	灰关联度		
	A_1	A_2	A_3
空域抗干扰	1	0.714	0.449
频域抗干扰	0.695	0.867	0.610
功域抗干扰	0.922	0.493	0.596
其他抗干扰技术	0.494	0.768	0.845
综合抗干扰	0.802	0.696	0.597

一般来说,与其他抗干扰方法相比,在频谱资源紧张和电磁干扰功率较大的环境下,空域抗干扰方

法操作简单、成本较低,效果更为显著,是通信抗干扰的首选;当干扰在空间上无法避开时,则考虑在频率域上实施抗干扰措施,与功域抗干扰方法相比,该项措施对干扰的影响消除得更彻底,然而由于频谱资源的紧张,难以达到理想效果,因此比之空域抗干扰方法稍逊一筹;当上述两种方法都无效时,只有采取功率硬抗的手段,即功域抗干扰方法,该方法操作成本高,且收效有限,实属下策。因此,可根据方法的优劣性,将“空域抗干扰”设为“惩罚型”指标,“频域抗干扰”设为“鼓励型”指标,而“功域抗干扰”以及“其它”次关键指标看作“常规型”指标。

然后,对综合抗干扰能力的4项指标进行赋权,权重信息为 $w_u = (0.280, 0.228, 0.167, 0.325)$ 。按照上述聚类原则,可得出最终的评估结果,即综合抗干扰能力的灰关联度,如表4所示。评估结果表明: $\kappa_1 > \kappa_2 > \kappa_3$,即装备 A_1 综合抗干扰能力最好,而 A_3 最差。

5 结论

为了提高灰关联评估法的准确性,本文在灰关联分析思想的基础上,提出了一种针对跳频无线通信抗干扰能力的评估新方法。与经典灰关联评估法相比,本文方法重点对灰关联度系数的获取和信息聚类方式进行了改善。首先,设计了4种数学映射式用以实现不同类型指标的原始值和灰关联度系数之间的转换,反映出指标变化对抗干扰能力的影响趋势,增加该环节的准确性与科学性;其次,对当前的聚类方法存在的问题进行了论述,并设计了一种混合聚类法,用于灰关联度的聚类,反映了各类指标变换对抗干扰能力的影响程度以及各指标的重要性,进一步增加了评估的准确性。因此,本文方法具有较好的参考意义和应用前景。然而,本文方法仅在评估对象简单和指标较少的情况下运用,当对象和环境复杂时,由于过多追求对象的特殊性,方法的运算量和复杂度可能会水涨船高,因此,下一步工作将对这一问题进行改善。

参考文献

- [1] Wei G W. Some induced geometric aggregation operators with intuitionistic fuzzy information and their application to group decision making. *Applied Soft Computing*, 2010, 10(2): 45-50
- [2] 姚富强. 通信抗干扰工程与实践. 第 2 版. 北京:电子工业出版社, 2012. 367-376
- [3] 蔡艳军. 灰色层次分析法分析战术通信网抗干扰效能评估. *火力与指挥控制*, 2012, 37(6): 106-108
- [4] 谢轲, 陈建行, 高留洋. 应用灰关联评估方法分析跳频通信系统. *现代电子技术*, 2013, 36(7): 33-40
- [5] Zhu Y M, Wang R R, Chen Y. Research on grey relational evaluation of innovation ability of the aviation industry cluster. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services (GSIS), Nanjing, China, 2011. 101-105
- [6] Zhang Y, Meng X L. Research on economic evaluation model for distribution network operation based on grey relation method. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Weihai, China, 2011. 1485-1489
- [7] 卫贵武. 基于模糊信息的多属性决策理论与方法. 北京:中国经济出版社, 2010. 61-63
- [8] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用. 北京:科学出版社, 1999. 75-79
- [9] Zhang N, Yan L, Wang H C, et al. Method for hybrid multiple attribute decision making based on the maximum deviation. In: Proceedings of the IEEE Chinese Control and Decision Conference, 2008. 1995-2000
- [10] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究:[博士学位论文]. 厦门:厦门大学, 2000. 62-65

Improvement of the method for evaluation of hopping frequency communication systems' anti-jamming capacity based on grey relation analysis

Xiao Chenfei * **, Chen Jianzhong **, Niu Yingtao **, Hui Xianyang * **

(* College of Communication Engineer, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007)

(** Nanjing Telecommunication Technology Research Institute, Nanjing 210007)

Abstract

In order to improve the accuracy of anti-jamming capacity evaluation of a hopping frequency communication system, a new evaluation method was proposed based on the improvement of the classical evaluation method using grey relation analysis. Under the index system, the new method utilizes several means to calculate the grey relation ratio of different indices according to the difference of indices' influential tendencies to the anti-jamming capacity. On the other hand, it uses a hybrid clustering algorithm to synthesize relation information according to the influences of indices on the anti-jamming capacity. The method was testified by simulation, and the results show that it fully considers the specific characteristics of evaluation targets and the diversity of indices, so it can prevent wrong judgments and have a higher evaluation accuracy.

Key words: grey relation analysis, capacity evaluation, anti-jamming communication