

# 基于改进雷达图法的侦察装备效能评估

王念胜<sup>1,2</sup>, 杜碧辉<sup>3</sup>, 彭维仕<sup>1</sup>, 李宸<sup>1,4</sup>, 王晓云<sup>5</sup>

(1. 武警工程大学装备管理与保障学院, 西安, 710086; 2. 武警陕西省总队汉中支队, 陕西汉中, 723000;  
3. 武警陕西省总队参谋部情报处, 西安, 710054; 4. 武警内蒙古自治区总队机动支队, 呼和浩特, 010050;  
5. 武警北京总队执勤第四支队, 北京, 100000)

**摘要** 为科学、合理和直观地评估部队侦察装备的效能,提出一种基于改进雷达图法的侦察装备效能评估方法。首先,根据部队现役侦察装备的特点以及在使用过程中发挥的效能,建立侦察装备效能评估指标体系,基于线性尺度变换法对上述侦察装备效能指标进行归一化。其次,利用指数标度法确定侦察装备效能评估指标的权重,解决了其他权重标度法权重计算不准确的问题。再次,基于改进雷达图法评估侦察装备的效能,解决了评估指标顺序不一致导致评估结果不唯一的问题。最后,通过实例验证了正确性和合理性。

**关键词** 侦察装备;装备效能;雷达图

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.06.016

**中图分类号** E933.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)06-0103-07

## An Effectiveness Evaluation Method of Reconnaissance Equipment Based on Improved Radar Chart

WANG Niansheng<sup>1,2</sup>, DU Bihui<sup>3</sup>, PENG Weishi<sup>1</sup>, LI Chen<sup>1,4</sup>, WANG Xiaoyun<sup>5</sup>

(1. School of Equipment Management and Support, People Armed Police Engineering University, Xi'an 710086, China; 2. Hanzhong detachment of Shaanxi Provincial Armed Police Corps, Hanzhong 723000, Shaanxi, China; 3. Information Department of Staff Department of Shaanxi Provincial Armed Police Corps, Xi'an 710054, China; 4. Maneuvering detachment of Inner Mongolia autonomous region Armed Police Corps, Hohhot 010050, China; 5. The fourth duty detachment of Beijing Armed Police Corps, Beijing 100000, China)

**Abstract** In order to evaluate the effectiveness of the troop reconnaissance equipment scientifically, reasonably and intuitively, an evaluation method of the effectiveness of the troop reconnaissance equipment based on the improved radar chart method is proposed. First of all, according to the characteristics of the troop reconnaissance equipment in active service and the effectiveness of the equipment in use, an evaluation index system of the effectiveness of the reconnaissance equipment is established, and based on the linear scale transformation method, the effectiveness index of the above reconnaissance equipment is normalized. Secondly, the index scale method is utilized for determining the weight of effectiveness evaluation index of reconnaissance equipment, solving the problem of inaccurate weight calculation of other weight scale

**收稿日期:** 2021-03-27

**基金项目:** 国家自然科学基金(71801222);陕西省自然科学基金(2018JQ6019);博士后创新人才支持计划资助项目(BX201700104)

**作者简介:** 王念胜(1987—)男,山东德州人,硕士生,研究方向为武警侦察装备、特战侦察、效能评估。E-mail:439975506@qq.com

**通信作者:** 彭维仕(1987—)男,广西全州人,副教授,博士,研究方向为效能评估方法、误差谱理论。E-mail:peng\_weishi@163.com

**引用格式:** 王念胜,杜碧辉,彭维仕,等.基于改进雷达图法的侦察装备效能评估[J].空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(6):103-109. WANG Niansheng, DU Bihui, PENG Weishi, et al. An Effectiveness Evaluation Method of Reconnaissance Equipment Based on Improved Radar Chart[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(6): 103-109.

method. Then, the improved radar chart method is utilized for solving the problem that the evaluation result is not unique because of the inconsistent evaluation index sequence. Finally, an example is given to verify the correctness and rationality of the proposed model.

**Key words** reconnaissance equipment; equipment effectiveness; radar nephogram

侦察装备是部队获取情报资源的重要手段,如何评估侦察装备的效能,成为军事领域研究的热点问题。

目前,研究侦察装备效能评估的方法主要有:灰色理论法、模糊层次分析法、FAHP法、ADC法、灰色云模型法、德尔菲法。文献[1]针对侦察装备系统性能参数的不确定性,把灰色理论与层次分析法相结合,运用灰色层次分析综合评估模型,对侦察系统的效能进行评估;文献[2]根据激光侦察装备的工作原理,用系统分析的方法,对系统的可用度向量、可信度矩阵和能力向量进行建模,定量评价激光侦察装备综合系统效能;文献[3~4]运用了模糊综合评判法(FAHP)、ADC法和云模型求解法对预警机的侦察效能进行评估;文献[5]在建立侦察装备评估体系的基础上,利用德尔菲法来确定体系各指标的权重比例,再利用模糊综合评价法计算最终的评估结果,提出一种基于德尔菲法和模糊综合评价法的侦察装备运用效能评估方法。综上所述:层次分析法、模糊综合评判法、云模型求解法和德尔菲法均不能直观的反映侦察装备总体的效能;文献[6]提出的雷达图扇形面积虽然能解决因指标排序不一致导致评估结果不唯一的问题,但是扇形面积构成的雷达图无法直观的区别系统总效能的优劣。

为了解决雷达图因指标排序不一致导致评估结果不唯一的问题,本文提出一种改进雷达图法,并对部队侦察装备的效能进行评估。首先,根据部队现役侦察装备的特点以及在使用过程中发挥的效能,建立侦察装备效能评估指标体系;进一步,基于线性尺度变换法对上述侦察装备效能指标进行归一化。其次,利用指数标度法确定侦察装备效能评估指标的权重,以解决其他权重标度法权重计算不准确的问题。然后,基于改进雷达图法评估部队侦察装备的效能,以解决评估指标顺序不一致导致评估结果不唯一的问题。最后,通过实例验证所提评估模型的正确性和合理性。

### 1 建立侦察装备效能评估指标体系

#### 1.1 基于性能的侦察装备效能评估指标体系构建

以侦察装备的结构特点及其技、战术性能指标为依据,从侦察装备的产品性能与任务方向分析其

效能,得到侦察装备效能评估指标体系,见图1。

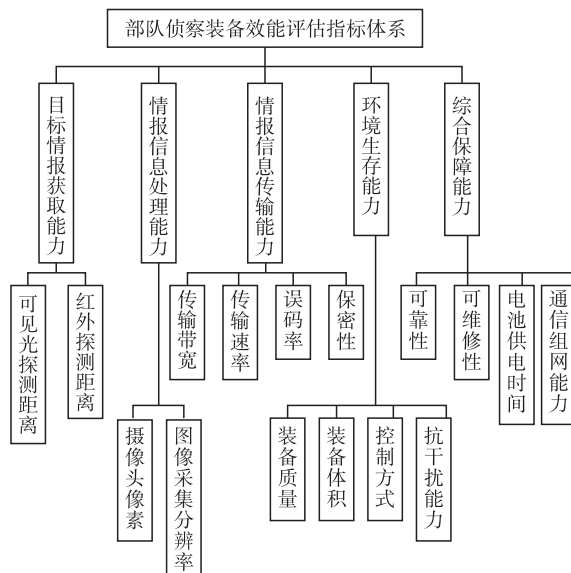


图1 部队侦察装备效能评估指标体系

进一步,可将上述指标分成两大类,效益型指标  $v^{se}$  和成本型指标  $v^{ce}$ ,如表1所示。

表1 侦察装备效能评估指标分类

效益型 指标 $v^{se}$	可见光探测距离 $D$	保密性 $B$
	红外探测距离 $W$	控制方式 $N$
	摄像头像素 $Q$	抗干扰能力 $e$
	图像采集分辨率 $U$	可靠性 $u$
	传输速率 $\eta$	可维修性 $k$
	传输带宽 $L$	电池供电时间 $t$
	误码率 $F$	通信组网能力 $b$
成本型指标 $v^{ce}$	装备质量 $M$	装备体积 $V$

#### 1.2 基于线性尺度变换的侦察装备效能评估指标归一化

假设有  $m$  个待评侦察装备  $E_1, E_2, \dots, E_m$ ,  $n$  个评估指标  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ , 令指标的原始矩阵为:

$$J = \begin{matrix} & Y_1 & Y_2 & \dots & Y_n \\ E_1 & v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ E_2 & v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ E_m & v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{matrix} \quad (1)$$

为了方便,采用线性尺度变换法进行规范化,对于效益型指标有:

$$v_{ij}^{se} = v_{ij}^x / \sum_{j=1}^n v_{ij}^x \quad (2)$$

同理,对于成本型指标有:

$$v_{ij}^{cs} = 1 - v_{ij}^c / \sum_{j=1}^n v_{ij}^c \quad (3)$$

式中:  $v_{ij}^{cs}$ 、 $V_{ij}^{cs}$  表示第  $i$  个待评的侦察装备中第  $j$  个效益型、成本型指标的规范化值;  $V_{ij}^x$ 、 $V_{ij}^c$  表示效益型和成本型指标;  $i$  满足  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $m$  表示  $m$  款待评的侦察装备;  $j$  满足  $j = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  表示  $n$  个单项指标。从而得到指标的归一化矩阵:

$$J^* = \begin{matrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{matrix} \begin{matrix} Y_1 & Y_2 & \cdots & Y_n \\ \left[ \begin{matrix} v_{11}^* & v_{12}^* & \cdots & v_{1n}^* \\ v_{21}^* & v_{22}^* & \cdots & v_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1}^* & v_{m2}^* & \cdots & v_{mn}^* \end{matrix} \right] \end{matrix} \quad (4)$$

## 2 侦察装备效能评估指标权重计算

### 2.1 基于指数标度法构造判断矩阵

由文献[7]可知:指数标度法与 1~9 标度法相比,能够真正反映思维一致性程度,精确度更高。因此,我们采用指数标度法构造判断矩阵:

$$C = \begin{matrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_p \\ \vdots \\ Y_n \end{matrix} \begin{matrix} Y_1 & Y_2 & \cdots & Y_q & \cdots & Y_n \\ \left[ \begin{matrix} a^{c_{11}} & a^{c_{12}} & \cdots & a^{c_{1q}} & \cdots & a^{c_{1n}} \\ a^{c_{21}} & a^{c_{22}} & \cdots & a^{c_{2q}} & \cdots & a^{c_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a^{c_{p1}} & a^{c_{p2}} & \cdots & a^{c_{pq}} & \cdots & a^{c_{pn}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a^{c_{n1}} & a^{c_{n2}} & \cdots & a^{c_{nq}} & \cdots & a^{c_{nm}} \end{matrix} \right] \end{matrix} \quad (5)$$

式中:  $a$  为常数,  $c_{pq}$  表示  $Y_p$  对于  $Y_q$  的相对重要性。

### 2.2 求解判断矩阵最大特征值

1) 对式(5)中矩阵的列求和:

$$t_q = \sum_{p=1}^n a^{c_{pq}} \quad (6)$$

2) 对  $t_q$  进行归一化:

$$g_q = \frac{t_q}{\sum_{q=1}^n t_q} \quad (7)$$

得指标权重向量:

$$G = [g_1 \quad g_2 \quad \cdots \quad g_q \quad \cdots \quad g_n] \quad (8)$$

3) 计算矩阵  $C$  的最大特征值  $\lambda_{max}$ :

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n \frac{d_{kk}}{g_q} \quad (9)$$

$d_{kk}$  由下式计算得到:

$$D = J \times G^T = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{kk} \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 2.3 进行一致性检验

对判断矩阵  $C$  进行一致性检验( $R_C$ ), 即:

$$R_C = \frac{\lambda_{max} - n}{R_1} \quad (11)$$

当  $R_C < 0.1$ , 认为  $C$  的一致性可以接受, 否则, 要对常数  $a$  进行调整。

## 3 基于改进雷达图法评估侦察装备效能

### 3.1 绘制侦察装备雷达图

根据式(4)和式(8)可得侦察装备效能评估指标的归一化值和权重, 则按照以下步骤绘制侦察装备的雷达图。

**Setp1** 以  $O$  为圆心, 绘圆。根据评估指标的数量, 用数轴将圆分为  $n$  份, 每份的夹角为  $\alpha_{ij} = 2\pi g_j$ ,  $g_j$  表示第  $j$  个指标的权重值, 则该夹角的大小可反应指标的权重。

**Setp2** 将归一化后的数值  $v_{ij}^*$  逆时针方向依次标定在各个数轴上。

**Setp3** 用直线连接各个相邻指标, 得到不规则多边形, 即为侦察装备效能评估雷达图, 如图 2 所示。

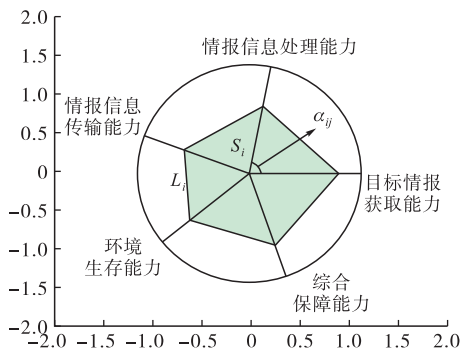


图 2 某款侦察装备效能评估雷达图

### 3.2 侦察装备雷达图特征提取

传统的雷达图因指标的排列顺序不同, 构成的雷达图也不同。因此, 我们对  $m$  款侦察装备第  $i$  个待评装备的  $n$  个评估指标进行全排列, 全排列矩阵为:

$$K = \begin{matrix} T_1 \\ \vdots \\ T_k \\ \vdots \\ T_{Num} \end{matrix} \begin{matrix} \left[ \begin{matrix} v_{i1}^{*1} & v_{i2}^{*1} & \cdots & v_{in}^{*1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{i1}^{*k} & v_{i2}^{*k} & \cdots & v_{in}^{*k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{i1}^{*r} & v_{i2}^{*r} & \cdots & v_{in}^{*r} \end{matrix} \right] \end{matrix} \quad (12)$$

式中:  $Num = n!$ , 表示  $n!$  种排列方式,  $T_k$  表示指标  $\{v_{i1}^*, v_{i2}^*, \dots, v_{in}^*\}$  对应的第  $k$  种排列方式。绘制雷达图并置于平面直角坐标系中, 提取雷达图 3 个特征参数:  $S_i^{*k}$ ,  $L_i^{*k}$ ,  $(x_i^{*k}, y_i^{*k})$  分别表示第  $i$  个待评侦察装备  $n$  个评估指标第  $k$  种排列方式雷达图的面积<sup>[8]</sup>、周长<sup>[9]</sup>和重心<sup>[10]</sup>坐标:

$$S_i^{*k} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} v_{ij}^{*k} v_{i(j+1)}^{*k} \sin \alpha_{ij} \quad (13)$$

$$L_i^{*k} = \sum_{j=1}^n \sqrt{v_{ij}^{*k2} + v_{i(j+1)}^{*k2} - 2v_{ij}^{*k} v_{i(j+1)}^{*k} \cos \alpha_{ij}} \quad (14)$$

$$\begin{cases} x_i^{*k} = \frac{\sum_{j=1}^n \left[ v_{ij}^{*k} \cos(j-1) \frac{2\pi}{n} + v_{i(j+1)}^{*k} \cos\left(j \frac{2\pi}{n}\right) v_{ij}^{*k} v_{i(j+1)}^{*k} \right]}{3 \sum_{j=1}^n v_{ij}^{*k} v_{i(j+1)}^{*k}} \\ y_i^{*k} = \frac{\sum_{j=1}^n \left[ v_{ij}^{*k} \sin(j-1) \frac{2\pi}{n} + v_{i(j+1)}^{*k} \sin\left(j \frac{2\pi}{n}\right) v_{ij}^{*k} v_{i(j+1)}^{*k} \right]}{3 \sum_{j=1}^n v_{ij}^{*k} v_{i(j+1)}^{*k}} \end{cases} \quad (15)$$

式中:当  $j = n$  时,  $v_{i(j+1)}^{*k} = v_{i1}^{*k}$ 。

根据式(15)进一步可得雷达图偏心率,即:重心  $G$  与圆心  $O$  的距离,

$$R_i^{*k} = \sqrt{x_i^{*k2} + y_i^{*k2}} \quad (16)$$

为了保证评估结果的唯一性,本文采用求解指标所有排序的雷达图的平均面积  $\bar{S}_i$ 、平均周长  $\bar{L}_i$  和平均偏心率  $\bar{R}_i$  的方法来得到唯一解。

$$\bar{S}_i = \frac{\sum_{k=1}^{Num} S_i^{*k}}{Num} \quad (17)$$

$$\bar{L}_i = \frac{\sum_{k=1}^{Num} L_i^{*k}}{Num} \quad (18)$$

$$\bar{R}_i = \frac{\sum_{k=1}^{Num} R_i^{*k}}{Num} \quad (19)$$

由文献[9]和文献[11]可得,同等面积的雷达图,周长越小,雷达图越接近于一个圆,各单项指标效能越均衡。因此,我们可以用平均面积  $\bar{S}_i$  对应的同等面积的圆的周长  $2\pi\sqrt{\bar{S}_i/\pi}$  与平均周长  $\bar{L}_i$  的比值  $2\pi\sqrt{\bar{S}_i/\pi}/\bar{L}_i$  来评估该款侦察装备各单项指标效能的均衡程度。但是,仅用周长比值  $2\pi\sqrt{\bar{S}_i/\pi}/\bar{L}_i$  来评估,一方面不够直观,另一方面无法对指标的异常值进行识别,因此,我们引入雷达图的重心和偏心率特征。综上所述,我们评估系统的总体效能要综合考虑系统各单项指标效能的总和以及各指标的均衡程度。因此,用平均面积  $\bar{S}_i$  度量待评侦察装备各单项指标效能的总和  $E_i^{\circ}$ ,用周长比值  $2\pi\sqrt{\bar{S}_i/\pi}/\bar{L}_i$  和平均偏心率  $\bar{R}_i$  评估侦察装备各指标的均衡程度  $E_i^h$ ,并且  $\bar{S}_i$ 、 $\bar{L}_i$  和  $\bar{R}_i$  能唯一确定。

### 3.3 构造侦察装备系统总体效能评价模型

综合考虑侦察装备各单项指标效能的总和以及各单项指标的均衡程度,构造系统总体效能评价模型如下:

$$E = f(\bar{S}_i, \bar{L}_i, \bar{R}_i) \quad (20)$$

上述问题也就转化成了一个多目标优化的问题,多目标转化为单目标的方法有很多,本文采用加权法和加权乘法。

利用加权法可得:

$$E^A = f^A(\bar{S}_i, \bar{L}_i, \bar{R}_i) = \omega_1 \bar{S}_i + \omega_2 \frac{2\pi\sqrt{\bar{S}_i/\pi}}{\bar{L}_i} + \omega_3 \frac{1}{\bar{R}_i} \quad (21)$$

式中: $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  为对应的权重,满足  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ ,一般由评估者根据实际情况设定。式(22)表示各单项指标的均衡程度,该数值越大,表示装备的各单项指标越均衡。

$$E^h = \omega_2 \frac{2\pi\sqrt{\bar{S}_i/\pi}}{\bar{L}_i} + \omega_3 \frac{1}{\bar{R}_i} \quad (22)$$

同理,利用几何平均法可得:

$$E^M = f^M(\bar{S}_i, \bar{L}_i, \bar{R}_i) = \sqrt{\frac{2\pi\sqrt{\bar{S}_i/\pi}\bar{S}_i}{\bar{L}_i\bar{R}_i}} \quad (23)$$

由式(21)和式(23)可知,通过式(21)计算  $E^A$  需要给定权重  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ ,而式(23)则不需要,进一步可知式(23)中隐含着  $\bar{S}_i$ 、 $\bar{R}_i$  和  $\bar{L}_i$  的权重相等,即  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$ 。

但式(23)中可避免因  $\bar{S}_i$  或  $\bar{R}_i$  的变化导致评估结果剧变,从而保证评估结果的稳定性。

因此,本文利用式(21)和式(23)评估侦察装备的总体效能。

## 4 实例验证

本文分别选取三型常用的侦察装备:A型软管窥镜、B型软管窥镜、C型软管窥镜,其中三型侦察装备的技术指标见表2。

根据式(2)和式(3),对表2中的数值进行归一化处理,结果见表3。

为了解决 Matlab 软件计算矩阵发生数据爆炸的问题,我们按照式(24)计算二级指标的数值见表4。

$$I_{ij} = \sum_{j=1}^n v_{ij}^{sg} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{v_{ij}^{cg}} \quad (24)$$

根据式(25)对上述指标进行归一化处理见

表 5。

$$I_{ij}^* = I_{ij} / \max \{ I_{ij} \}_{i=1}^m \quad (25)$$

表 2 三型侦察装备的技术战术指标

指标	A 型	B 型	C 型
	软管窥镜	软管窥镜	软管窥镜
$D/mm$	24 960	24 990	24 990
$W/mm$	9 960	9 990	0
$Q/\text{像素}$	5 000 000	450 000	450 000
$U/\text{像素}$	1 920×1 080	640×480	640×480
$\eta/(\text{MB/s})$	100	75	0
$L/\text{Mbps}$	1 000	600	0
$F$	0.98	0.98	0.96
$B$	数字信号加密	模拟信号加密	无加密功能
$N$	远程控制	电动控制	手动控制
$e/^\circ\text{C}$	-10~+50	-10~+50	-10~+50
$u$	0.98	0.98	0.96
$k$	0.97	0.97	0.96
$t/h$	4	4	4
$b$	4 G/5 G 传输	微波传输	无传输功能
$M/g$	893+143	770+207	700+143
$V/\text{cm}^3$	32.5×15.7×5.2	32×13×5.5	31×13×5.5

表 3 三型侦察装备三级指标规范化值

指标	A 型	B 型	C 型
	软管窥镜	软管窥镜	软管窥镜
$D$	0.333 1	0.333 5	0.333 5
$W$	0.499 2	0.500 8	0
$Q$	0.847 5	0.076 3	0.076 3
$U$	0.771 4	0.114 3	0.114 3
$v$	0.571 4	0.428 6	0
$L$	0.625 0	0.375 0	0
$F$	0.335 6	0.335 6	0.328 8
$B$	0.666 7	0.333 3	0
$N$	0.666 7	0.333 3	0
$e$	0.333 3	0.333 3	0.333 3
$u$	0.335 6	0.335 6	0.328 8
$k$	0.334 5	0.334 5	0.331 0
$t$	0.333 3	0.333 3	0.333 3
$b$	0.555 6	0.444 4	0
$M$	0.637 3	0.657 9	0.704 8
$V$	0.629 3	0.680 3	0.690 3

表 4 三型侦察装备的二级指标数值

能力指标	A 型	B 型	C 型
	软管窥镜	软管窥镜	软管窥镜
目标情报获取	0.832 3	0.834 2	0.333 5
情报信息处理	1.618 9	0.190 6	0.190 6
情报信息传输	2.198 7	1.472 5	0.328 8
环境生存	4.158 3	3.656 5	3.200 7
综合保障	1.559 0	1.447 9	0.993 1

表 5 三型侦察装备的二级指标规范化值

能力指标	A 型	B 型	C 型
	软管窥镜	软管窥镜	软管窥镜
目标情报获取	0.997 7	1.000 0	0.399 7
情报信息处理	1.000 0	0.117 7	0.117 7
情报信息传输	1.000 0	0.669 7	0.149 5
环境生存	1.000 0	0.879 3	0.769 7
综合保障	1.000 0	0.928 7	0.637 0

根据表 5 绘制三型侦察装备雷达图及指标全排列的雷达图。见图 3~图 6。

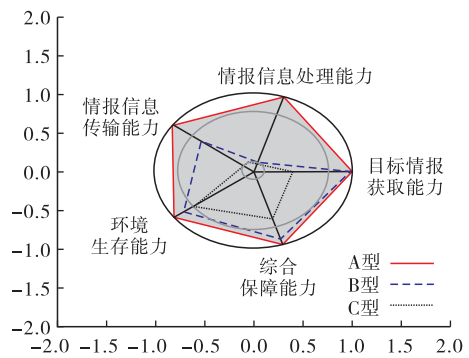


图 3 三型侦察装备(软管窥镜)雷达图

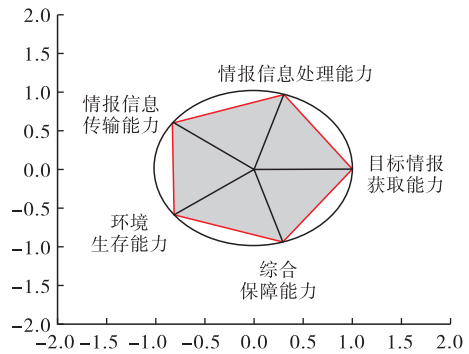


图 4 A 型软管窥镜指标全排列的雷达图

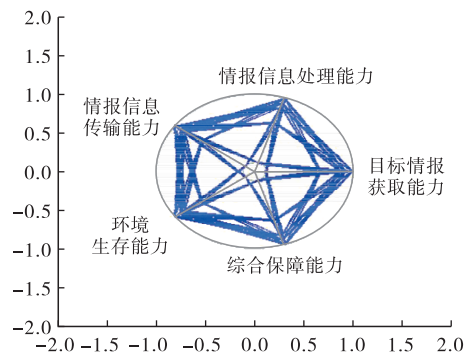


图 5 B 型软管窥镜指标全排列的雷达图

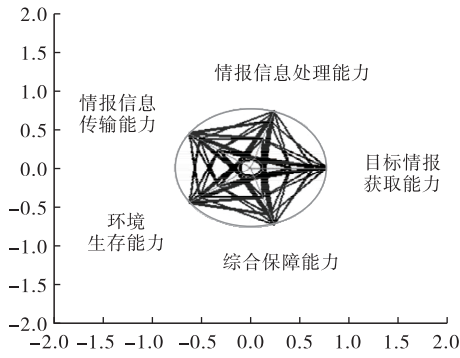


图6 C型软管窥镜指标全排列的雷达图

为评估三型侦察装备的总体效能,将表5中的数据代入式(17),计算各雷达图的平均面积,可得:

$$\begin{cases} \bar{S}_A = 2.3755 \\ \bar{S}_B = 1.1685 \\ \bar{S}_C = 0.3692 \end{cases} \quad (26)$$

由此可见:

$$E_A^{\bar{S}} > E_B^{\bar{S}} > E_C^{\bar{S}}$$

即三型侦察装备各单项指标的效能总和:

$$A \text{ 型} > B \text{ 型} > C \text{ 型}$$

同理,为评估三型侦察装备各单项指标的均衡程度,将表5中的数据代入式(18)和(19),计算各雷达图的平均周长和平均偏心率,可得:

$$\begin{cases} \bar{L}_A = 4.7001 \\ \bar{R}_A = 0.5393 \end{cases} \quad (27)$$

其中,

$$\begin{cases} \bar{x}_A = -2.3686 \times 10^{-17} \\ \bar{y}_A = 4.4366 \times 10^{-18} \end{cases} \quad (28)$$

如图7所示:A型软管窥镜指标全排列的雷达图重心分布比较集中,“o”为各雷达图的重心,“\*”为所有雷达图的平均重心。

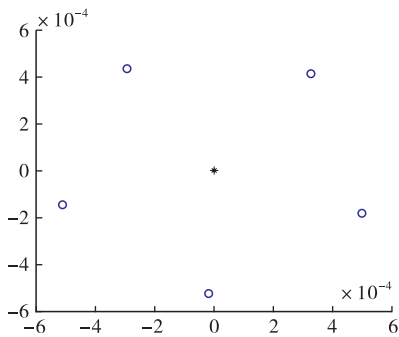


图7 A型软管窥镜雷达图重心分布图

$$\begin{cases} \bar{L}_B = 3.8305 \\ \bar{R}_B = 1.0153 \end{cases} \quad (29)$$

其中,

$$\begin{cases} \bar{x}_B = -3.0647 \times 10^{-18} \\ \bar{y}_B = -1.3415 \times 10^{-17} \end{cases} \quad (30)$$

如图8所示,B型软管窥镜指标全排列的雷达图重心分布相对集中,“o”为各雷达图的重心,“\*”为所有雷达图的平均重心。

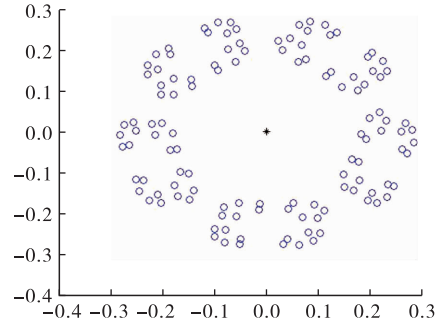


图8 B型软管窥镜雷达图重心分布图

$$\begin{cases} \bar{L}_C = 2.3362 \\ \bar{R}_C = 1.4329 \end{cases} \quad (31)$$

其中,

$$\begin{cases} \bar{x}_C = -2.9606 \times 10^{-17} \\ \bar{y}_C = 2.8681 \times 10^{-17} \end{cases} \quad (32)$$

如图9所示,C型软管窥镜指标全排列的雷达图重心分布比较分散,“o”为各雷达图的重心,“\*”为所有雷达图的平均重心。

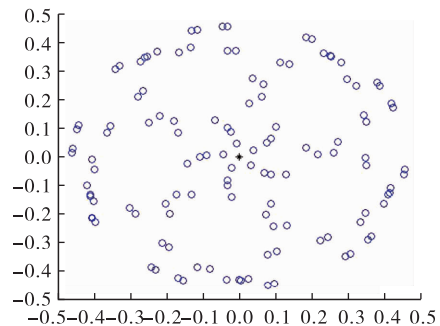


图9 C型软管窥镜雷达图重心分布图

从上述图7~图9可以很直观的看到A型软管窥镜雷达图重心的离散程度最小,并且没有太多的异常值,C型软管窥镜雷达图重心的离散程度最大,并且异常值也较多。

由式(22)数据分析可得:

$$E_A^{\bar{h}} > E_B^{\bar{h}} > E_C^{\bar{h}} \quad (33)$$

即三型侦察装备各单项指标的均衡程度:

$$A \text{ 型} > B \text{ 型} > C \text{ 型}$$

进一步将式(26)、(27)、(29)、(31)代入式(23)计算三型侦察装备的总体效能可得:

$$\left\{ \begin{aligned} E_A^M &= F(\bar{S}_A, \bar{L}_A, \bar{R}_A) = \\ &\sqrt{\frac{2\pi \sqrt{\bar{S}_A/\pi} \bar{S}_A}{\bar{L}_A \bar{R}_A}} = 2.262\ 8 \\ E_B^M &= F(\bar{S}_B, \bar{L}_B, \bar{R}_B) = \\ &\sqrt{\frac{2\pi \sqrt{\bar{S}_B/\pi} \bar{S}_B}{\bar{L}_B \bar{R}_B}} = 1.073\ 0 \\ E_C^M &= F(\bar{S}_C, \bar{L}_C, \bar{R}_C) = \\ &\sqrt{\frac{2\pi \sqrt{\bar{S}_C/\pi} \bar{S}_C}{\bar{L}_C \bar{R}_C}} = 0.487\ 4 \end{aligned} \right. \quad (34)$$

当然,如果取  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 1/3$  时,将式(26)、(27)、(29)、(31)代入式(21)可得:

$$\left\{ \begin{aligned} E_A^A &= 1.797\ 4 \\ E_B^A &= 1.051\ 3 \\ E_C^A &= 0.663\ 0 \end{aligned} \right. \quad (35)$$

因此,综合分析式(34)和式(35),可得:

$$\left\{ \begin{aligned} E_A^M &> E_B^M > E_C^M \\ E_A^A &> E_B^A > E_C^A \end{aligned} \right. \quad (36)$$

即:

$$A \text{ 型} > B \text{ 型} > C \text{ 型} \quad (37)$$

其中  $X > Y$  表示系统  $X$  的系统综合效能优于系统  $Y$  的系统综合效能。

由式(37)可知,A型软管窥镜的系统综合效能最好。进一步可得部队在利用软管窥镜执行反恐侦察任务时,目标情报获取能力、情报信息处理能力、情报信息传输能力是该装备效能发挥的主要因素。因此,提高软管窥镜的侦察效能需要从以下三方面入手:

1)提高装备的目标探测距离,尤其是夜间红外探测距离。

2)提高前端的传感器配置,尤其是提高摄像头像素和图像采集分辨率。

3)提高侦察装备的传输性能,例如加载 5G 和微波传输功能,进一步提高装备的通信组网能力。

## 5 结论

本文提出了一种基于改进雷达图法的部队侦察装备效能评估方法。

1)从目标情报获取能力、情报信息处理能力、情

报信息传输能力、环境生存能力、综合保障能力 5 个方面建立了部队侦察装备效能评估的指标体系,进一步利用线性尺度变换法对上述指标进行了归一化,为后续计算部队侦察装备效能评估指标的权重提供指标数据。

2)提出基于指数标度法的部队侦察装备效能评估指标权重计算方法,解决了其他标度法权重计算不准确的问题。

3)通过提取雷达图的平均面积、平均周长和平均偏心率特征,构建部队侦察装备效能评估模型,解决了评估指标顺序不一致导致评估结果不唯一的问题。

### 参考文献:

[1] 宋朝河,王雪琴.基于灰色层次分析法的侦察装备效能评估[J].指挥控制与仿真,2008,30(4):65-68.

[2] 高俊光,韩新文,赵威,等.激光侦察装备作战效能评估初探[J].光电技术应用,2010,25(5):74-76.

[3] 周晓柳婷.预警机系统综合效能评估技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018:27-46.

[4] 尹津丽.基于ADC方法的预警机系统效能评估及软件开发[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019:10-44.

[5] 张庆东,蒋晓瑜.一种基于德尔菲法和模糊综合评价的侦察装备运用效能评估方法[J].信息通信,2020(11):161-163.

[6] PENG W S, LI Y H, FANG Y W, et al. Radar Chart for Estimation Performance Evaluation (S2169-3536) [J]. IEEE Access, 2019, 7:113880-113888.

[7] 葛杨,刘松涛.基于指数标度层次分析法和Vague集的雷达导引头干扰效能评估[J].探测与控制学报,2020,42(3):69-74.

[8] 周晓阳.改进的雷达图分析法在我国商业银行风险监测中的应用[J].今日财富·金融发展与监管,2010,(6):57-62.

[9] 陈勇,陈潇凯,李志远,等.具有评价结果唯一性特征的雷达图综合评价法[J].北京理工大学学报,2010,30(12):1409-1412.

[10] 周友行,喻思亮,张俏,等.基于导轨面图像特征雷达图的磨损状况识别[J].中国机械工程,2015,26(5):647-652.

[11] 秦玉华,张海涛,高锐,等.基于近红外光谱及主成分雷达图特征提取的产品质量稳定性研究[J].发光学报,2018,39(11):1627-1632.

(编辑:姚树峰)