

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.08.018

基于群组层次分析法的情报保障系统效能评估

林岳峥, 祝利, 程晓雷

(电子工程学院 204 教研室, 合肥 230037)

摘要: 根据情报保障系统的体系组成, 建立了情报保障系统的递阶层次结构评估指标模型。依据该模型, 详细阐述了群组层次分析法在情报保障系统效能评估中的应用过程。仿真结果表明: 该方法得出了一定战役条件下情报保障系统各评估指标的组合权重系数, 可以有效地对情报保障系统进行效能评估, 同时也在一定程度上为情报保障系统的最优化建设提供了决策依据。

关键词: 情报保障系统; 群组层次分析法; 效能评估; 指标体系

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Effectiveness Evaluating for Intelligence Support System Based on Group Analytic Hierarchy Algorithm

Lin Yuezheng, Zhu Li, Cheng Xiaolei

(No. 204 Staff Room, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Based on the structure of intelligence support system, establish the hierarchical structure evaluation index model for intelligence support system. According to the model, describe the application process of group analytic hierarchy algorithm in intelligence support system effectiveness evaluation. The simulation result shows that the algorithm can achieve the group weighting coefficient of every evaluation index under battle conditions. The method also can carry out effectiveness evaluation for intelligence support system. Meanwhile, it also provides a basis for optimum development and practical operation for the intelligence support system.

Key words: intelligence support system; group analytic hierarchy process; effectiveness evaluation; index system

0 引言

随着信息技术的飞速发展, 情报战已成为信息化战争的主要作战样式之一。情报保障系统是一个庞大的复杂系统, 影响其综合效能的因素很多, 而且还有许多难以量化的模糊因素。在未来作战中, 为实现统一的作战目标, 诸军兵种部队将协同使用, 覆盖陆、海、空、天、电多维战场, 作战行动的节奏大大加快, 这给情报保障的时效性、准确性、完整性提出了更高的要求。为了能够针对不同的作战环境, 更加科学地构建与之相适应的情报保障系统, 准确了解情报保障系统的运行状况及其对作战结果的直接或间接影响, 需要对情报保障系统的综合效能进行有效的评估。

层次分析法(AHP)是美国著名的运筹学家 T.L.Saaty 于 1977 年提出的一种定性和定量相结合的决策方法, 比较适合复杂系统的效能评估。它把一个复杂问题中的各种因素通过划分互相联系的有序层次使之条理化, 根据对一定客观现实的判断, 就每一层次的相对重要性给予定量表示, 利用数学方法确定表示每一层次的全部元素的相对重要性次

序的数值, 并通过排序结果分析和解决问题。为了使决策科学化、民主化, 一个复杂系统的评估通常会有多名专家或决策部门参与决策。由于各决策者的地位、立场、知识水平以及个人偏好的差异, 对同一个问题有不同的判断。在层次分析的基础上考虑如何把个人的判断综合成较合理的结果, 于是就产生了群组层次分析法(group analytic hierarchy process, GAHP)^[1]。因此, 笔者利用群组层次分析的方法对情报保障系统的综合效能进行评估。

1 情报保障系统效能评估的过程

应用 GAHP 对情报保障系统进行效能评估的基本思想是, 先建立起一个描述情报保障系统的递阶层次结构, 再通过多位专家比较各层次元素的相对重要性, 给出相应的比例标度, 构造上层某要素对下层相关元素的判断矩阵, 并通过群组决策以给出相关元素对上层要素的相对重要序列, 根据这些序列即可计算出各层指标相对整个系统的排序权重。群组决策的过程有 2 种: 一种是将各个专家的判断矩阵综合得到综合判断矩阵, 然后求出这个综合判断矩阵的排序向量; 另一种是先求出各个专家判断

收稿日期: 2012-03-02; 修回日期: 2012-04-12

作者简介: 林岳峥(1986—), 男, 湖南人, 在读硕士, 从事电子战、情报基础理论研究。

矩阵的排序向量，然后将它们综合成群组排序向量^[1]。笔者利用第 2 种方法来进行决策。

1.1 建立情报保障系统的评估指标体系

情报保障系统的作战平台是由遍布五维战场的情报保障单元无缝连接而成，其主要功能是实现情报的获取、处理和传输，并确保 3 个环节的安全。因此，情报保障系统的情报获取能力、情报传输能力、情报处理能力和情报防护能力也就成为影响其综合效能的主要因素^[2]。因此可得出如图 1 所示的评估指标体系层次结构。

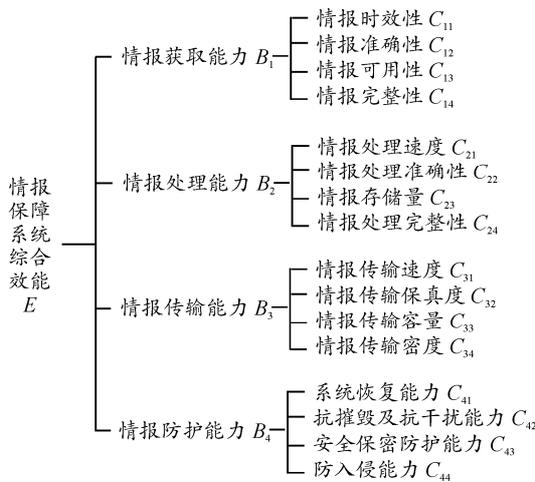


图 1 情报保障系统评估指标体系层次结构

1.2 构建两两比较判断矩阵

情报保障系统是一个庞大的复杂系统，影响其综合效能的因素很多，而且在不同的作战环境中，情报获取、处理、传输及安全性能的重要性是不一样的，在系统效能评估的过程中，就会产生不同的判断矩阵。因此，对情报保障系统的效能评估，要以某特定的作战环境为背景，专家根据作战环境对情报保障系统的要求来确定各性能指标的重要性。

如图 1 所示，在某一指标 B_k 下，对于 4 个元素中的任意两个元素 C_{ki} 和 C_{kj} ，通过比较可得出哪个更重要些及重要多少。目前多使用 9/9~9/1 标度法来为元素的重要性赋值^[3]。比例标度的含义见表 1。

表 1 构造判断矩阵的 9/9~9/1 标度法

等级	含义	标度
1	2 个元素相比，同等重要	9/9
3	2 个元素相比，一个元素比另一个元素稍微重要	9/7
5	2 个元素相比，一个元素比另一个元素明显重要	9/5
7	2 个元素相比，一个元素比另一个元素强烈重要	9/3
9	2 个元素相比，一个元素比另一个元素极端重要	9/1
k		$9/(10-k)$

采用 9/9~9/1 标度法，通过征求专家意见，可首先构造出情报获取能力 B_1 、情报传输能力 B_2 、情

报处理能力 B_3 、情报防护能力 B_4 的相对重要性判断矩阵(简称为 $E-B$ 判断矩阵):

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

其中， a_{ij} 即为 B_i 和 B_j 的相对重要性比较值。

同理可分别构造出 $B_1 \sim C$ 判断矩阵、 $B_2 \sim C$ 判断矩阵、 $B_3 \sim C$ 判断矩阵和 $B_4 \sim C$ 判断矩阵。在群组决策中，要征求多位专家的意见，并分别构建各专家的判断矩阵。

判断矩阵是一种正互反矩阵，矩阵中的各元素满足:

$$a_{ij} > 0, a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, a_{ii} = 1$$

当判断矩阵中的元素满足传递性时，即： $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$ ，可称该判断矩阵为一致性矩阵^[4]。在根据判断矩阵导出各指标的排序权重时，一致性矩阵有重要的意义。

1.3 计算各效能指标的权重

这一步就是要计算在情报获取能力 B_1 、情报传输能力 B_2 、情报处理能力 B_3 、情报防护能力 B_4 下各效能指标元素的排序权重问题，并进行一致性检验。具体就是求各判断矩阵 A 的最大特征根 λ_{max} 对应的特征向量 W ^[5]，表达式为:

$$A \cdot W = \lambda_{max} \cdot W$$

所得到的 W 经归一化后，作为在能力准则 B_k 下各元素 $C_{k1}, C_{k2}, C_{k3}, C_{k4}$ 的排序权重，这种方法称为排序权重 λ_{max} 向量计算的特征根方法。 λ_{max} 存在且唯一， W 可以由正分量组成，除了差一个常数倍数外， W 是唯一的。

在求特征根 λ_{max} 和特征向量 W 时，可以借助工程软件 Matlab 实现快速求解。在 Matlab 中求一个方阵 A 的特征值和特征向量，可以使用函数 `eigs(A)`，使用该函数时的程序代码为:

$$[V, D] = \text{eigs}(A)$$

执行该程序后，返回 A 所有特征值(按大小秩序)组成的对角矩阵 D 和特征向量组成的矩阵 V 。对角矩阵 D 中的最大值，即为 λ_{max} 。 λ_{max} 在 V 中所对应的列向量为其特征向量 W 。多次使用 `eigs(A)` 求解，得出的 W 值可能不一样，但都是只相差一个常数倍数，不影响群组权重排序向量计算的结果。

求出 λ_{max} 和 W 后，要对得到的 λ_{max} 进行一致性

检验, 其步骤^[6]为:

- 1) 计算一致性指标 $C.I.$

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

2) 查找相应的平均随即一致性指标 $R.I.$ 。表 2 给出了 1~8 阶正互反矩阵计算 1 000 个样本容量得到的平均随机一致性指标。

表 2 平均随机一致性指标 $R.I.$

矩阵阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8
$R.I.$	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41

3) 判断矩阵的一致性指标 $C.I.$, 与同阶的平均随机一致性指标 $R.I.$ 的比值称为随机一致性比例, 记为 $C.R.$, 即:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}$$

当 $C.R. \leq 0.1$ 时, 一般认为判断矩阵的一致性是可以接受的。

由于人们判断事物的模糊性和不确定性以及决策者的主观因素, 因此判断矩阵可能会出现不满足 $C.R. > 0.1$ 的现象, 这时就需要对判断矩阵做进一步调整, 参考文献[3]给出了详细的调整方法, 不再详细叙述。

1.4 生成群组权重排序向量

根据各专家给出的判断矩阵, 分别算出权重排序向量后, 可综合生成群组权重排序向量, 进一步排除主观因素的影响, 提高权重排序向量的准确性。综合生成群组权重排序向量的方法有以下 2 种^[1]。

1.4.1 加权几何平均法

对 S 个专家的判断矩阵分别求出它们的排序向量 $W_k = (w_{1k}, w_{2k}, \dots, w_{nk})^T, k=1, 2, \dots, S$ 后, 求出它们的加权几何平均综合向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, 具体算法如下:

- 1) 计算各权重的加权几何平均。

$$\bar{w}_j = (w_{j1})^{\lambda_1} (w_{j2})^{\lambda_2} \dots (w_{jS})^{\lambda_S}$$

其中 λ_k 为第 k 个专家的权重, $\sum_{k=1}^S \lambda_k = 1, j = 1, 2, \dots, n$ 。

当 $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_S$ 时, $\bar{w}_j = (w_{j1}w_{j2} \dots w_{jS})^{1/S}, j = 1, 2, \dots, n$ 。

- 2) 进行归一化处理。

$$w_j = \frac{\bar{w}_j}{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i}$$

即可得到加权几何平均综合向量。

- 3) 计算标准差。

计算 \bar{w}_j 的标准差:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{S-1} \sum_{k=1}^S (w_{jk} - \bar{w}_j)^2}$$

计算相应于新的总体判断矩阵 $A(a_{ij} = \frac{w_i}{w_j})$ 的总体标准差:

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{S-1} \sum_{k=1}^S (a_{ij,k} - a_{ij})^2}$$

计算每位专家的个体标准差:

$$\sigma^{(k)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (w_{jk} - w_j)^2}$$

当总体标准差满足要求时, 这组群组判断可采用。当个体 $\sigma^{(k)} < \epsilon$ 时, 认为第 k 个专家可通过。否则将信息反馈给有关专家, 供修改时参考。

1.4.2 加权算术平均法

将各专家判断矩阵得到的排序向量的加权算术平均作为综合排序向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, 即

$$w_j = \lambda_1 w_{j1} + \lambda_2 w_{j2} + \dots + \lambda_S w_{jS}$$

其中, $\sum_{k=1}^S \lambda_k = 1, j = 1, 2, \dots, n$ 。当 $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_S$ 时,

$$w_j = \frac{1}{S} (w_{j1} + w_{j2} + \dots + w_{jS})$$

同样可以类似地计算标准差, 并反馈给专家参考。

1.5 计算各层指标的组合权重并进行效能评估

上面笔者得到的是一组元素对其上一层中某元素的权重向量。最终要得到各元素, 特别是最低层中各指标对总目标的组合排序权重。组合排序权重要自上而下地将单一准则下的权重进行合成。图 1 中, 第 2 层元素的组合排序向量, 和单一准则下的排序向量相同。计算第 3 层的总排序向量时, 上下层元素没有交叉, 只要将上层元素权重乘以本层权重即可得到组合排序权重, 如: $a_{c11} = a_{B1} w_{c11}$, 其他各指标的组合同理计算出来。

计算出各指标的总排序权重后, 即可进行系统的效能评估。情报保障系统的作战效能是由图 1 第 3 层所示的各性能指标来反应的, 不同的情报保障系统之间, 各指标优劣程度可能区别很大。某一指标甲优乙劣, 另一指标可能甲劣乙优。因此, 可以通过专家评判, 给出不同系统之间各指标的优劣比较矩阵。再将各指标的总排序权重与某情报保障系统在各比较矩阵中的系数进行线性加权, 可得到该

系统的作战效能综合评价。经比较该评价的大小，即可评估不同情报保障系统作战效能的高低。

2 实例仿真

笔者根据情报保障系统作战效能的主要因素，建立如图 1 所示情报保障系统的评估指标体系层次结构，并运用群组层次分析法进行评估选优。下面进行实例仿真试验。

在某次战役中，战役指挥员在情报工作的筹划过程中，对情报保障系统的构建有甲、乙 2 套方案可供选择，现要通过群组层次分析法进行效能评估，得出最优方案，以便定下决心。

2.1 构建判断矩阵

根据图 1 所示情报保障系统评估指标体系层次结构以及作战环境对情报保障的要求，组织 5 位专家分别构建判断矩阵。其中第 k 位专家的判断矩阵如下，其他 4 位专家可同理构建各自的判断矩阵。

$$E-B \text{ 判断矩阵: } \begin{bmatrix} 1 & 3/9 & 5/9 & 5/2 \\ 9/3 & 1 & 9/4 & 9/2 \\ 9/5 & 4/9 & 1 & 4/2 \\ 2/5 & 2/9 & 2/4 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_1 \sim C \text{ 判断矩阵: } \begin{bmatrix} 1 & 7/3 & 7/5 & 7/4 \\ 3/7 & 1 & 3/5 & 3/4 \\ 5/7 & 5/3 & 1 & 5/4 \\ 4/7 & 4/3 & 4/5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_2 \sim C \text{ 判断矩阵: } \begin{bmatrix} 1 & 3/6 & 3/5 & 3/7 \\ 6/3 & 1 & 6/5 & 6/7 \\ 5/3 & 5/6 & 1 & 5/7 \\ 7/3 & 7/6 & 7/5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_3 \sim C \text{ 判断矩阵: } \begin{bmatrix} 1 & 5/4 & 5/7 & 5/3 \\ 4/5 & 1 & 4/7 & 4/3 \\ 7/5 & 7/4 & 1 & 7/3 \\ 3/5 & 3/4 & 3/7 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_4 \sim C \text{ 判断矩阵: } \begin{bmatrix} 1 & 2/7 & 2/3 & 2/5 \\ 7/2 & 1 & 7/3 & 7/5 \\ 3/2 & 3/7 & 1 & 3/5 \\ 5/2 & 5/7 & 5/3 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2 计算各效能指标的排序权重

根据第 k 位专家给出的判断矩阵，在 Matlab 中用函数 $eigs(A)$ 求各判断矩阵的最大特征根和特征向量，得如下结果：

$$E-B \text{ 判断矩阵: } \lambda_{\max}=4.063 \ 6, \ W_k=(0.175 \ 7 \ 0.489 \ 4 \ 0.237 \ 7 \ 0.097 \ 2)^T$$

$$B_1 \sim C \text{ 判断矩阵: } \lambda_{\max}=4.000 \ 0, \ W_k=(0.368 \ 4 \ 0.157 \ 9 \ 0.263 \ 2 \ 0.210 \ 5)^T$$

$$B_2 \sim C \text{ 判断矩阵: } \lambda_{\max}=4.000 \ 0, \ W_k=(0.142 \ 9 \ 0.285 \ 8 \ 0.237 \ 8 \ 0.333 \ 5)^T$$

$$B_3 \sim C \text{ 判断矩阵: } \lambda_{\max}=4.000 \ 0, \ W_k=(0.263 \ 2 \ 0.210 \ 5 \ 0.368 \ 4 \ 0.157 \ 9)^T$$

$$B_4 \sim C \text{ 判断矩阵: } \lambda_{\max}=4.000 \ 0, \ W_k=(0.117 \ 6 \ 0.411 \ 8 \ 0.176 \ 4 \ 0.294 \ 2)^T$$

下面对 $E-B$ 判断矩阵的 λ_{\max} 进行一致性检验：

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - 4}{4 - 1} = 0.021 \ 2, \ R.I. = 0.89 \ C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} = 0.023 \ 8.$$

$C.R. < 0.1$ ，结果满足一致性检验。

同理可对其他判断矩阵进行检验，结果满足一致性。

对其他 4 位专家给出的判断矩阵可同理计算其最大特征根和特征向量，然后利用加权平均进行群组决策计算。限于篇幅，省略详细步骤，只给出各指标的群组权重排序向量如下：

$$E-B: \ W=(0.187 \ 4 \ 0.477 \ 7 \ 0.227 \ 5 \ 0.107 \ 4)^T$$

$$B_1 \sim C: \ W=(0.348 \ 5 \ 0.167 \ 8 \ 0.262 \ 2 \ 0.221 \ 5)^T$$

$$B_2 \sim C: \ W=(0.165 \ 9 \ 0.262 \ 8 \ 0.257 \ 4 \ 0.313 \ 9)^T$$

$$B_3 \sim C: \ W=(0.287 \ 2 \ 0.235 \ 1 \ 0.323 \ 8 \ 0.153 \ 9)^T$$

$$B_4 \sim C: \ W=(0.134 \ 5 \ 0.414 \ 3 \ 0.176 \ 9 \ 0.274 \ 3)^T$$

根据以上给出的权重排序向量，可得出指标体系层次结构中第 3 层各指标的组合排序权重：

$$a_{c_{11}} = a_{B_1} w_{c_{11}} = 0.187 \ 4 \times 0.348 \ 5 = 0.065 \ 3$$

$$a_{c_{12}} = a_{B_1} w_{c_{12}} = 0.187 \ 4 \times 0.348 \ 5 = 0.031 \ 4$$

同理可得出 $a_{c_{13}}=0.049 \ 1, a_{c_{14}}=0.041 \ 5, a_{c_{21}}=0.079 \ 3,$

$a_{c_{22}}=0.125 \ 5, a_{c_{23}}=0.122 \ 9, a_{c_{24}}=0.149 \ 9, a_{c_{31}}=0.065 \ 3,$

$a_{c_{32}}=0.053 \ 4, a_{c_{33}}=0.073 \ 7, a_{c_{34}}=0.035 \ 0, a_{c_{41}}=0.014 \ 4,$

$a_{c_{42}}=0.044 \ 5, a_{c_{43}}=0.019 \ 0, a_{c_{44}}=0.029 \ 5。$

经过上述计算，得到了在该战役条件下情报保障系统作战效能各指标的组合权重系数。

2.3 情报保障系统效能评估

下面根据权重系数计算甲、乙 2 种情报保障系统的作战效能。经对比性能参数及专家评定，2 种情报保障系统各指标的性能比较情况如表 3。

表 3 甲、乙 2 种情报保障系统指标的性能比较情况

指标	甲	乙	指标	甲	乙
C_{11}	0.333 3	0.666 7	C_{31}	0.833 3	0.166 7
C_{12}	0.250 0	0.750 0	C_{32}	0.500 0	0.500 0
C_{13}	0.500 0	0.500 0	C_{33}	0.250 0	0.750 0
C_{14}	0.714 3	0.285 7	C_{34}	0.428 5	0.571 5
C_{21}	0.583 3	0.416 7	C_{41}	0.833 3	0.166 7
C_{22}	0.833 3	0.166 7	C_{42}	0.333 3	0.666 7
C_{23}	0.500 0	0.500 0	C_{43}	0.428 5	0.571 5
C_{24}	0.428 5	0.571 5	C_{44}	0.500 0	0.500 0

用各指标的组合权重系数与相应的性能比较参数相乘,即可得到各情报保障系统的作战效能值为:

$$E_{甲}=0.682 1 \quad E_{乙}=0.475 1$$

由于 $E_{甲} > E_{乙}$, 因而可得出甲情报保障系统的整体作战效能优于乙情报保障系统的结论。

3 结束语

笔者综合运用层次分析法和群组决策方法,建立了情报保障系统的作战效能指标体系层次结构模型,得出了各个评估指标的权重系数,并对情报保障系统的作战效能进行了量化计算,可以在一定程度上为情报保障系统的最优化建设提供决策依据。

(上接第 56 页)

3) 散斑指数 (speckle index): 该指标用来评价散斑噪声的抑制能力,图像的散斑指数越小,算法抑制散斑噪声的能力越强:

$$E_{\text{speckle-index}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{\sigma(i, j)}{\mu(i, j)} \quad (14)$$

$\sigma(i, j)$, $\mu(i, j)$ 为计算窗口中元素的标准差和均值。

4.2 仿真结果分析

图像尺寸为 383×383 像素,分辨率较高,信噪比高。地形高低起伏,地物包括住宅、公路、植被等,激光雷达图像滤波效果如图 1。

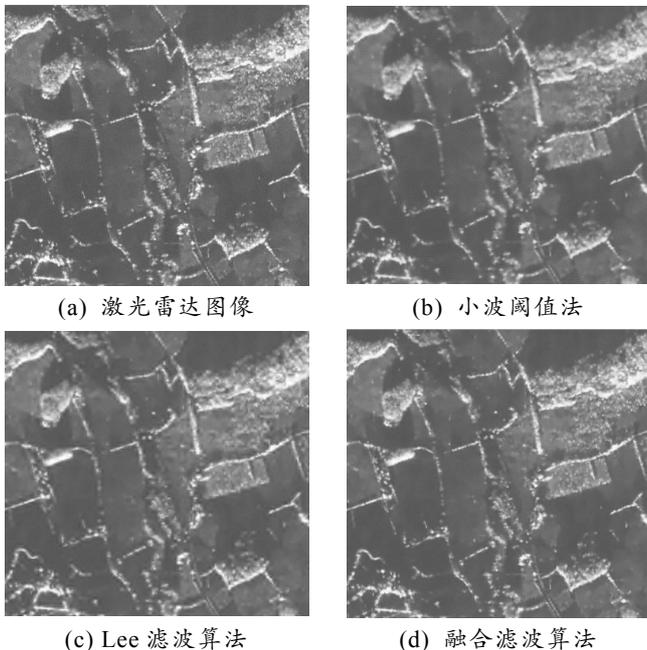


图 1 激光雷达图像滤波效果

仿真结果分析如表 1,从仿真结果可见: Lee 滤波方法能够较好保存图像的信息熵,散斑噪声抑制能力较强,几何边缘有扩宽,这是因为 Lee 滤波是基于局部统计特性的,在信号剧烈变化区域,容

参考文献:

- [1] 郭齐胜, 杨秀月, 王杏林, 等. 系统建模[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 298-299.
- [2] 熊杰, 刘湘伟, 许抗. 电子对抗情报处理体系效能评估初探[J]. 信息对抗学术, 2009(1): 41-43.
- [3] 赵全仁, 邱志明, 窦守健, 等. 武器装备论证导论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1998: 96-112.
- [4] 刘强. 国防系统分析方法: 下册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 531-537.
- [5] 王威, 崔明明. 复杂系统评估的综合层次分析法[J]. 海军工程大学学报, 2006(2): 42-46.
- [6] 杨智, 董长清. 改进层次分析法在雷达网探测效能评估的应用[J]. 空军雷达学院学报, 2007(3): 14-17.

易产生模糊的现象;小波滤波方法的几何边缘较好,在信号平坦区域的滤波能力较 Lee 滤波方法稍差,信号熵丢失较多。融合滤波算法结合了两者的优点,具有很强的散斑噪声抑制能力,提高图像的信噪比,目标的几何形状保持较好,弱边缘信息得到保护,融合的信息熵值略有流失,不过是可以接受的范围。

表 1 仿真结果分析

性能指标	RMSE	Speckle-index	Entropy
原图像	0.126 3	0.092 06	6.336 2
小波阈值法	0.119 3	0.085 87	6.442 6
Lee 滤波算法	0.123 5	0.066 16	6.278 9
融合滤波算法	0.120 3	0.079 56	6.453 9

5 结束语

通过对 2 种滤波梯度图像的分析比较,确定信号平坦区和信号突变区,再根据融合规则对不同的区域进行滤波融合,通过仿真实验表明:融合滤波图像质量好,边缘保持强,取得了比单一滤波算法更好的效果。

参考文献:

- [1] 蒋立辉, 王春晖, 王骥, 等. 脉冲相干激光雷达的散斑成像模型及其散斑噪声压缩[J]. 光学学报, 2000, 20(12): 1623-1628.
- [2] 李自勤, 李琦, 王骥. 由统计特性分析激光主动成像系统图像的噪声性质[J]. 中国激光, 2004, 31(9): 1081-1085.
- [3] Lee J S. Speckle suppression and analysis for SAR image [J]. Opt Eng, 1986, 25: 636-643.
- [4] Henri H Arsenault, Martin Levesque. Combined Homomorphic and Local-Statistics Processing for Restoration of Images Degraded by Signal2Dependent [J]. Applied Optics. 1984, 23(6): 845-850.
- [5] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histogram[J]. IEEE Trans on SMC-9, 1979: 62-66.
- [6] 付忠良. 图像阈值选取方法-Otsu方法的推广[J]. 计算机应用, 2000, 14(6): 118-119.