引文格式：闫庆庆,蔡艳辉,马旭,等. 基于遥感影像数据的数字水印技术有效性评价研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(8):118-121. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.08.025

基于遥感影像数据的数字水印技术有效性评价研究

闫庆庆[1]，蔡艳辉[1]，马　旭[1]，王晓迪[1*]
（1. 国家测绘产品质量检验测试中心，北京 100830）

摘　要：为评价遥感影像数字水印技术在影像数据成果分发应用管理、版权保护、可追溯管理等方面应用的安全性和有效性，基于地理空间数字水印技术的基本特征，设计了遥感影像数字水印技术的有效性评价指标，并基于层次分析法构建了一种遥感影像数字水印有效性评价方案。结合测试示例评价结果，该评价方法能够客观地评价遥感影像数字水印技术在遥感影像数据成果的对外分发应用、可追溯管理、版权保护等方面的安全性和有效性，为成果管理部门在遥感影像数据对外服务、安全分发等方面提供了解决思路。

关键词：数字水印；遥感影像；层次分析法；有效性评价
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）08-0118-04

Research on the Effectiveness Evaluation of Digital Watermarking Technology Based on Remote Sensing Image Data

YAN Qingqing[1], CAI Yanhui[1], MA Xu[1], WANG Xiaodi[1]
(1. National Quality Inspection and Testing Center for Surveying and Mapping Products, Beijing 100830, China)

Abstract: In order to evaluate the security and effectiveness of application of remote sensing image digital watermarking technology in the distribution and application management of image data achievements, copyright protection, and traceability management, we designed the effectiveness evaluation index of remote sensing image digital watermarking technology based on the basic characteristics of geospatial digital watermarking technology, and constructed an evaluation scheme for the remote sensing image digital watermarking effectiveness based on analytic hierarchy process. According to the evaluation results of test examples, the evaluation method can objectively evaluate the security and effectiveness of remote sensing image digital watermarking technology in the external distribution and application, traceability management, copyright protection and other aspects of remote sensing image data achievements, and provide solutions for the achievement management department in the external service and safe distribution of remote sensing image data.

Key words: digital watermarking, remote sensing image, analytic hierarchy process, effectiveness evaluation

随着遥感影像成果应用领域的不断扩大，其安全性和版权归属问题日益突出，如非法使用、版权侵犯等现象频繁出现[1-2]，为保障地理信息安全及验证影像数据产品版权归属来源，也为影像数据产品在分发领取、内部管理、版权保护、政务共享中进行自我标识、自我保护，遥感影像数字水印技术[3-4]应运而生。遥感影像数据成果管理部门开始尝试小范围采用数字水印技术，对遥感影像成果的分发、跟踪、版权保护等方面进行安全、有效地管理、控制和跟踪应用。为了验证影像数据数字水印技术的安全性、可靠性和适用性，需开展地理信息数字水印有效性评价研究。朱长青等[5-6]侧重于水印的应用需求、遥感影像水印的添加方法、抗攻击性解决方案等内容研究，在数字水印技术应用于测绘地理信息领域地理空间信息知识产权保护、数据所有者合法权益维护、地理空间信息市场秩序维护、非法盗版威胁等方面做了大量的研究，但在影像数据数字水印技术有效性评价方面缺乏相关研究。

本文基于遥感影像数字水印技术的基本特征，在综合考虑不可感知性、精度特性、鲁棒性等因素对遥感影像水印技术影响程度的基础上，运用层次分析法开展了遥感影像数字水印技术有效性评价方法研究，主要包括设置遥感影像数字水印技术有效性评价指标，提出有效性评价方案，以便能够客观评价数字水印技术在影像数据成果的分发服务、可追溯管理、版权保护等方面应用的安全性和可靠性。

项目来源：国家测绘产品质量检验测试中心“质量之翼”资助项目（2019-zlzy-010）。
第一作者简介：闫庆庆（1984—），硕士，高级工程师，研究方向为测绘地理信息成果质量检验方法和地理信息数据安全检测评估理论，E-mail：476175217@qq.com。
通信作者：王晓迪（1988—），本科，工程师，主要从事测绘产品质量检查与验收工作，E-mail：623478725@qq.com。

1　地理信息数字水印有效性评价指标

1.1　数字水印

数字水印技术是指在数字图像中嵌入一定的数字信息，使数字信息与图像融为一体，成为图像不可分离的一部分。其中的数字信息可以是版权标志、用户信息或者产品相关信息等。当需要的时候可以通过相应的提取算法提取数字信息，证明数据的版权归属，由此来确定版权拥有者、所有权认证、跟踪侵权行为、认证数字内容来源的真实性、识别购买者、提供有关数字内容的其他附加信息等，是数字时代解决数字化产品安全保护的一种有效手段[7]。

1.2　地理信息数字水印的有效性

地理信息数据水印技术是通过嵌入技术将水印信息隐藏到原始数据中，从而形成含有水印信息的载体数据，主要应用在数字产品的版权保护、分发跟踪、内容完整性认证和内容篡改定位等方面[8]，具有不可感知性、鲁棒性、精度、数据一致性、安全性和不可抵赖性等特征[9]。

1.3　遥感影像的数字水印的有效性评价指标

基于地理空间数据数字水印基本特征、遥感影像数字水印技术要求[10]，以及测绘地理信息管理部门的成果数据安全管理和开放社会化服务的需要，遥感影像数字水印有效性评价指标应包括隐蔽性、安全性、稳健性、一致性、可追溯性、处理效率和稳定性等7项[11]，每项评价项又包括多个评价子项。

2　基于层次分析法有效性评价

2.1　评价方法

运用层次分析法构[13-15]构建遥感影像数字水印有效性评价方案，步骤[16]如下：①选择评价指标，也就是影响遥感影像数字水印有效性的因素，之后建立递阶层次模型；②根据建立的模型分别对每一层建立各个指标相互对比的判断矩阵，建立好判断矩阵后再针对各个矩阵进行运算，求出对应的权重值；③根据判断矩阵的运算结果，即权重值，对遥感影像数字水印的有效性进行综合评价。

2.2　层次分析法原理

1）建立递阶层次模型。依据评价对象的情况，将复杂问题分解为多个组成部分，这些组成部分按照属性不同分成若干组，已形成不同层次，并用框图形式说明层次的递阶结构与因素的从属关系。

2）建立判断矩阵。对准则层和指标层的影响因子，根据相对重要性，依据经验知识进行两两比较，给出定性判断矩阵，相对重要性标度采用1，3，5，7，9分别表示重要性相同、较重要、明显重要、强烈重要、极端重要。

3）层次内单排序。计算已建立好判断矩阵的近似特征向量和最大特征值，特征向量即为本层次内因子对上一层次某因素影响程度的权重值，即为单排序结果，最大特征值用于一致性检验。

4）一致性检验。通过求出的最大特征值 λ_{max} 计算检验指标 CI 。

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$$

如果求得的检验指标 $CI=0$ ，那么就证明权重向量通过了一致性检验；如果求出的检验指标 $CI\neq 0$ ，则需要计算随机一致性比率 CR 。

$$CR=\frac{CI}{RI}$$

式中， RI 为随机一致性指标[17]，当阶数为1~10时，RI 分别为0、0、0.52、0.89、1.12、1.26、1.36、1.41、1.61、1.69。

若 $CR<0.1$ 时，表明该权重通过了一致性检验，否则需调整判断矩阵。

2.3　评价指标权重确定

1）构建递阶层次结构。根据遥感影像数字水印技术的有效性评价影响因素，并根据有效性评价指标划分有效性评价层次结构，见图1。

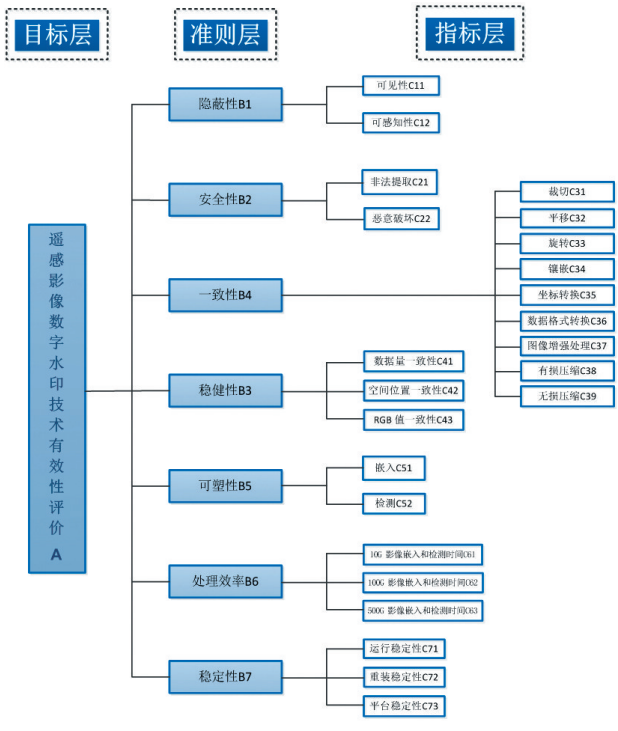


图1　遥感影像数字水印有效性评价层次结构划分

2）采用层次分析法求指标权重。根据准则层及目标层各指标间的相对重要程度，构造 *B* 层及 *C* 层对应的判断矩阵。

B 层判断矩阵

$$\boldsymbol{B}_{1-7}=\begin{bmatrix}1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{7} & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3}\\ 4 & 1 & \frac{1}{3} & 4 & \frac{1}{3} & 3 & 3\\ 7 & 3 & 1 & 6 & 2 & 4 & 5\\ 2 & \frac{1}{4} & \frac{1}{6} & 1 & \frac{1}{6} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3}\\ 5 & 3 & \frac{1}{2} & 6 & 1 & 3 & 5\\ 4 & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & 4 & \frac{1}{3} & 1 & 3\\ 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1\end{bmatrix} \quad (1)$$

C 层判断矩阵分别为：

$$\boldsymbol{C}_{11-12}=\begin{bmatrix}1 & 3\\ \frac{1}{3} & 1\end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{C}_{21-22}=\begin{bmatrix}1 & \frac{1}{7}\\ 7 & 1\end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{C}_{31-39}=\begin{bmatrix}1 & 4 & 4 & 2 & 3 & 3 & 5 & 9 & 7\\ \frac{1}{4} & 1 & 2 & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 3 & 6 & 4\\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 3 & 6 & 4\\ \frac{1}{2} & 4 & 4 & 1 & 3 & 3 & 5 & 8 & 6\\ \frac{1}{3} & 2 & 2 & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 3 & 7 & 5\\ \frac{1}{3} & 2 & 2 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 6 & 4\\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 6 & 3\\ \frac{1}{9} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{8} & \frac{1}{7} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & 1 & \frac{1}{3}\\ \frac{1}{7} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{6} & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & 3 & 1\end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{C}_{41-43}=\begin{bmatrix}1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{3}\\ 4 & 1 & 3\\ 3 & \frac{1}{3} & 1\end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{C}_{51-52}=\begin{bmatrix}1 & 1\\ 1 & 1\end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{C}_{61-63}=\begin{bmatrix}1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5}\\ 3 & 1 & \frac{1}{4}\\ 5 & 4 & 1\end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{C}_{71-73}=\begin{bmatrix}1 & \frac{1}{3} & 3\\ 3 & 1 & 5\\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1\end{bmatrix} \quad (8)$$

计算评价项和评价子项对应判断矩阵的特征向量、检验指标和随机一致性比率，结果见表1。

表1 准则层及指标层一致性判断结果

矩阵	层次排序的权重向量	*CI*	*CR*
$\boldsymbol{B}_{1-7}$	（0.032,0.152,0.336,,0.041，0.252,0.111,0.069）	0.078	0.057
$\boldsymbol{C}_{11-12}$	（0.750,0.250）	0.000	0.000
$\boldsymbol{C}_{21-22}$	（0.125,0.875）	0.000	0.000
$\boldsymbol{C}_{31-39}$	（0.273,0.087,0.076,0.225,0.134,0.102,0.050,0.016,0.028）	0.083	0.056
$\boldsymbol{C}_{41-43}$	（0.119,0.607,0.271）	0.036	0.062
$\boldsymbol{C}_{51-52}$	（0.500,0.500）	0.000	0.000
$\boldsymbol{C}_{61-63}$	（0.103,0.230,0.664）	0.042	0.072
$\boldsymbol{C}_{71-73}$	（0.260,0.663,0.105）	0.018	0.031

通过表1可以看出，所有矩阵的单层次排序 *CR* 值均小于0.1，满足一致性检验。则评价指标对应的评价权重如下，见表2、3。

表2 评价项对应的评价比重

序号	评价项	评价权重
1	隐蔽性（01）	0.032
2	安全性（02）	0.152
3	稳健性（03）	0.336
4	一致性（04）	0.041
5	可追溯性（05）	0.252
6	处理效率（06）	0.111
7	稳定性（07）	0.069

表3 评价子项对应的评价比重

评价项	评价子项	评价比重
隐蔽性（01）	可见性（011）	0.750
	可感知性（012）	0.250
安全性（02）	非法提取（021）	0.125
	恶意破坏（022）	0.875
鲁棒性（03）	裁切（031）	0.273
	平移（032）	0.087
	旋转（033）	0.076
	镶嵌（034）	0.225
	坐标转换（035）	0.134
	数据格式转换（036）	0.102
	图像增强处理（037）	0.050
	有损压缩（038）	0.016
	无损压缩（039）	0.028
一致性（04）	数据量一致性（041）	0.119
	空间位置一致性（042）	0.607
	RGB值一致性（043）	0.271
可追溯性（05）	嵌入（051）	0.500
	检测（052）	0.500
处理效率（06）	10 G影像的嵌入和检测时间（061）	0.103
	100 G影像的嵌入和检测时间（062）	0.230
	500 G影像的嵌入和检测时间（063）	0.664
稳定性（07）	嵌入和检测水印信息时，系统运行稳定性（071）	0.260
	重装水印系统后检测到水印信息一致性（072）	0.663
	不同的计算机环境中检测到水印信息一致性（073）	0.105

2.4 数字水印有效性评价

依据各评价指标的检测情况，对遥感影像数字水印技术的有效性评价得分计算如下：

$$S=\sum_{i=1}^{7}\left(\sum_{j=1}^{n}(S_j\times p_j)\times p_i\right) \quad (9)$$

式中，S 为遥感影像数字水印技术有效性评价得分；S_j 为评价子项的评价得分；p_j 为评价子项的权；p_i 为评价项的权；n 为评价项对应的评价子项个数。

根据有效性评价得分，对检测结果进行评价等级划分，评价等级见表4。

表4　有效性评价等级划分规则

评价等级	1（较差）	2（差）	3（一般）	4（良好）	5（优秀）
检测结果	0~59分	60~69分	70~79分	80~89分	90~100分

注：如果其中一个评价项得分小于60分，直接认定该技术有效性评价等级为1。

3　实验案例分析

3.1　实验遥感影像数据情况

本文基于ArcGIS10.1软件平台，采用IMG格式分辨率为1 m的3个区县遥感影像数据作为评价样例数据，遥感影像数据的坐标基准为2000国家大地坐标系（CGCS2000），投影方式为高斯–克吕格投影，3°分带，数据量分别为9.85、106 GB和507 GB。

3.2　评价记录

本文基于实验样例数据对某一款遥感影像数字水印系统进行有效性评价。评价结果为隐蔽性：100分；安全性：裁切92分（其他项均为100分）；稳健性100分；一致性：RGB 25分（其他100分）；可追溯性：嵌入100分，检测性60分；处理效率分别为60、87、72、64分，稳定性100分。

由评价结果可知，每个评价项均在60分以上，该遥感影像数字水印系统的测试得分：S =72分。

3.3　实验样例评价结果分析

通过以上评价结果，可看出该遥感影像数字水印系统的嵌入信息隐蔽性好，安全性较高，稳健性较强，可追溯性较好，但处理效率较低，该水印技术能保证对第一次嵌入水印信息的分发数据进行有效、精准的跟踪管理，但对第一次嵌入水印信息的分发数据处理后再次嵌入水印信息进行数据分发时，不能对第二次分发数据进行精准的跟踪管理，因此该款系统不能十分有效地服务于遥感影像数据成果管理部门开展数据的分发服务、可追溯管理等方面。

4　结　语

本文基于地理信息数字水印技术在遥感影像数据成果的分发管理、版权保护等方面的应用需求，运用层次分析法构建了有效性评价方案，从客观上对遥感影像数字水印系统开展有效性评价。实验案例数据结果显示，本文提出的检测和评价方面，能够较客观地反映遥感影像数字水印技术的适用性和成熟度。同时，该方法也对数字水印技术应用于DLG、DEM等地理信息成果的有效性评价提供了解决思路和技术参考，后续将进一步开展相关研究。

参考文献

[1] 任娜,朱长青,黄家柱,等. 数字水印技术在高分辨率遥感数据安全保护中的应用[J]. 火力与指挥控制,2015,40(2):19-23

[2] 吴俊聪. 基于遥感影像的数字水印的研究与实现[D]. 廊坊:北华航天工业学院,2016

[3] 陈辉,郭科,郑文峰. 数字水印技术应用于遥感图像版权保护的评测标准研究[J]. 物探化探计算技术,2008,29(5):436-441

[4] 杨娜娜. 数字水印技术在矢量地图中的应用[J]. 地理空间信息,2022,20(2):114-118

[5] 朱长青,杨成松,任娜. 论数字水印技术在地理空间数据安全中的应用[J]. 测绘通报,2010(10):1-3

[6] 闵连权,李强,祝先真,等. 我国地理空间数据的安全政策研究[J]. 测绘科学,2010,35(3):37-39

[7] 刘瑞文,魏建新,王勇,等. 一种抗裁剪的遥感影像数字水印算法研究[J]. 国土资源信息化,2016,15(1):27-32

[8] 潘蓉,高有行. 数字图象水印技术研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2002,46(2):117-123

[9] 闵连权,杨辉,候翔,等. 地理空间信息数字水印技术[M]. 北京:科学出版社,2017

[10] 朱长青,许德合,任娜,等. 地理空间数据数字水印理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2014

[11] 蔡艳辉,闫庆庆,马旭,等. 遥感影像数字水印的有效性评价[J]. 测绘通报,2021(增刊):197-201

[12] 测绘成果质量检查与验收:GB/T 240356-2023[S].

[13] 袁奇,王敏,宁科,等. 基于层次分析法的220 kV变电站进线非开挖电力排管工程施工方案分析[J]. 电力与能源,2021,42(5):566-569

[14] 张明月,王立权,赵文超,等. 基于层析分析法的呼兰河健康评价研究[J]. 水利科技与经济,2021,27(6):37-40

[15] AlSanea D, Abdullah W. Sinkhole Susceptibility Hazard Mapping Using Analytical Hierarchy Process and GIS Tools for the State of Kuwait[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering,2021,7(3):04 021 029

[16] 王佳慧,高迪,陈江峰. 基于层次分析法的煤层顶板稳定性评价[J]. 煤炭技术,2022,41(8):20-23

[17] 洪志国,李焱,范植华,等. 层次分析法中高阶平均随机一致性指标(RI)的计算[J].计算机工程与应用,2002,38(12):45-47