引文格式：徐海燕,徐刚,章 豪,等. 利用精度降低模型进行三维地理信息数据保密处理[J]. 地理空间信息, 2024, 22(11): 43-48. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.11.008

利用精度降低模型进行三维地理信息数据保密处理

徐海燕[1,2]，徐　刚[1,3*]，章　豪[1,4]，朱安峰[1,5]

（1. 浙江安防职业技术学院，浙江 温州 325016；2. 温州市天空地态势感知应用技术协同创新中心，浙江 温州 325016；
3. 中南大学 地球科学与信息物理学院，湖南 长沙 410083；4. 温州市地理空间信息技术研究院，浙江 温州 325016；
5. 温州市自然灾害遥感监测预警重点实验室，浙江 温州 325016）

摘　要：三维地理信息数据能更好地反映真实世界、服务智慧城市管理；但其数据精度较高，具有一定的保密性，不能直接应用于公众服务，需对数据进行保密处理再提供给用户使用，以保证数据安全。构建了三维地理信息数据精度降低模型，对每个构成三维模型的节点坐标进行不规则偏移，从而降低三维数据模型精度，且不可逆。实验结果表明，该方法有效降低了三维数据精度，实现了数据脱密，生成了符合保密要求和用户需求的数据。

关键词：三维地理信息数据；数据共享；精度控制；脱密

中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）11-0043-06

Confidential Treatment of 3D Geographical Information Data Using the Precision Reduction Model

XU Haiyan[1,2], XU Gang[1,3], ZHANG Hao[1,4], ZHU Anfeng[1,5]

(1. Zhejiang College of Security Technology, Wenzhou 325016, China;
2. Wenzhou Collaborative Innovation Center for Space-borne, Airborne and Ground Monitoring Situational Awareness Technology, Wenzhou 325016, China;
3. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
4. Wenzhou Institute of Geospatial Information Technology, Wenzhou 325016, China;
5. Wenzhou Key Laboratory of Natural Disaster Remote Sensing Monitoring and Early Warning, Wenzhou 325016, China)

Abstract: 3D geographical information data can truly reflect the real world and better serve smart city management. However, due to the high precision of 3D geographical information data, it is confidential and cannot be directly applied to public services. In order to ensure data security, these data need to be kept confidential before being provided to users for use. We constructed a model for reducing the precision of 3D geographical information data. We used this model to irregularly offset the coordinates of each node forming the 3D model, reducing the precision of 3D data model, and this process was irreversible. The experimental result shows that this method can effectively reduce the precision of 3D data, and the data is generated to meet the confidentiality requirements and user needs.

Key words: 3D geographical information data, data sharing, precision control, declassification

随着经济社会的发展、数字城市向智慧城市的转变、实景中国的建设，现阶段智慧城市建设发展已不满足于二维地理信息数据，对三维地理信息数据的需求更为迫切。三维地理信息数据具有高精度、高分辨率、高测量精度、效果更真实的特性，能为智慧城市建设提供精确且更贴近现实的环境背景，因此以其为基础构建智慧城市建设底座逐渐成为趋势。由于三维基础地理数据的空间位置准确、高程精度高、涉密信息广，直接使用该类数据必然触及数据安全问题，因此如何对三维地理信息数据进行脱密处理以及在确保数据精度和相对安全的情况下，实现三维地理信息数据的共享成为目前数据使用中亟待解决的问题。三维地理信息数据脱密处理，需对地理信息数据的空间位置、精度、属性内容及其相互关系等全部或部分进行精度降低、密级降低或脱密等处理。本文首先降低三维地理信息数据的高度域精度，再降低平面域精度，以期在保证数据安全的前提下，对三维地理信息数据进行脱密处理，实现三维地理信息数据的共享。

收稿日期：2023-04-30。
项目来源：2021 年温州市基础性科研资助项目（S20210017）；浙江省自然资源厅 2021 年科技资助项目（2021-34）。
第一作者简介：徐海燕（1979—），本科，高级工程师，主要从事二三维地理信息技术研究与应用工作，E-mail：42700021@qq.com。
通信作者：徐刚（1980—），在读博士，教授，主要研究方向为资源与环境领域空间信息技术，E-mail：205002058@csu.edu.cn。

1 三维地理信息数据精度降低要求

1.1 地理数据精度

地理空间数据在国民基础测绘、城市规划设计、国土普查监测、社会智慧治理、应急防灾减灾、军事国防战略等领域都发挥了非常重要的作用。地理空间数据具有高精度，若不做相关保密处理，则会触及国家安全。自然资发[2020]95号《自然资源部 国家保密局关于印发〈测绘地理信息管理工作国家秘密范围的规定〉的通知》明确规定：军事禁区平面精度优于（含）10 m或地物高度相对量测精度优于（含）5%的三维模型、点云、倾斜影像、实景影像、导航电子地图等实测成果为机密；军事禁区以外平面精度优于（含）10 m或地物高度相对量测精度优于（含）5%、且连续覆盖范围超过25 km^2的三维模型、点云、倾斜影像、实景影像、导航电子地图等实测成果为秘密等保密要求。然而，在实际中有大量地图需要使用高精度、信息涉密的地形图数据，从而导致数据需求与安全保密的冲突。为了更好地满足数据使用需求和安全保密要求，数据使用时采用降低高精度数据精度的方法生成一些精度较低且信息属性脱密的数据。降低地理数据精度可以更好地扩大涉密数据的使用范围，解决地理数据成果共享应用的问题。因此，研究合理有效的地理数据精度降低技术，以满足社会各界对三维地理信息数据的共享应用，显得尤为重要，也迫在眉睫。

1.2 精度降低规则

1）建立数据坐标算法。算法在一定规则的基础上做了适当的变化，使得转变后坐标不能被反算。

2）空间拓扑关系基本一致。三维地理数据虽然降低了精度，但其呈现的空间位置仍应相对合理、空间拓扑关系基本保持一致。

3）数据精度可控制。精度降低后的数据精度误差应在一定控制范围内，确保仍能满足实际应用需求。

4）精度处理过程不可逆。建立非线性三维地理数据精度降低模型，使得整个过程不可逆。

5）保持三维模型数据特征。精度降低后的数据应保持三维数据模型的特征，如降低精度后三维模型的外形保持基本形状。

1.3 精度降低数学模型

三维地理信息数据精度降低方法是指建立数据坐标的数学算法、变量取值等方法。首先将数据坐标进行一定规则的运算；再设定变量取值，从而降低三维地理数据的精度。变化后的三维地理信息数据仍保持原有的数据空间拓扑关系相对合理。

设变化前三维地理信息数据为 (a,b,c)，变化后为 (A,B,C)，则其精度降低模型为：

$$\begin{cases} A=f(a,b) \\ B=g(a,b) \\ C=h(a,b) \end{cases} \tag{1}$$

式中，$f(a,b)$、$g(a,b)$ 和 $h(a,b)$ 为计算三维地理信息数据精度降低的数学取值。

选择一组 $f(a,b)$、$g(a,b)$ 和 $h(a,b)$，通过公式运算得到其变化后三维地理信息数据（A,B,C）。

$$\begin{cases} A=A+\alpha \\ B=B+\beta \\ C=C+\delta \end{cases} \tag{2}$$

式中，α、β 和 δ 分别为坐标 a、b、c 上进行变量降低的精度，采用的变化方式是变量，设定值域取值范围，运算结果具有不确定性。

在降低精度的过程中，为保证数据精度不被反推、反算，且基本保持三维地理信息数据的空间关系等，那么 $f(a,b)$、$g(a,b)$ 和 $h(a,b)$ 的取值就不能一样，需设置一定的变量规则，且必须满足以下条件：① $f(a,b)$、$g(a,b)$ 和 $h(a,b)$ 不可逆，即精度降低后不可恢复；② $|A-a|\leqslant R_1$，$|B-b|\leqslant R_2$，$|C-c|\leqslant R_3$，R_1、R_2、R_3 分别为坐标 A、B、C 中允许精度变化的最大值。

2 三维地理信息数据精度降低算法

为使三维模型数据脱密后仍保留拓扑关系特征，将三维地理信息数据几何脱密分成两步进行：①对三维数据的高度坐标信息进行精度降低处理；②对三维数据的平面坐标信息进行坐标变换。

2.1 高度信息数据精度降低

降低三维数据的高度信息精度，实际上就是利用一个合适的函数对高度 z 进行变化，得到降低精度后的数据 Z。根据相关保密数据处理文件要求，数据精度取值需在一定变化范围内且可控制。本文采用乘法运算规则对连续数据进行精度降低，其模型为 $Z=z\times n(x)$，$n(x)$ 为 x 的连续函数。为保持数据的一致性，$n(x)$ 需要是连续的，且无限接近于1。三角函数具有周期性、有界性和任意阶可导等特点，如 $\cos x$，当 $x\to 0$ 时，值越接近1，而 $x\to 0$ 的取值有无限个，因此可选择 $\cos x$ 作为高度精度降低函数。

在精度降低过程中，需在保持原始数据空间关系

正确表达的基础上，将其精度变化控制在一定取值范围内，即 $n(x)$ 的取值应满足精度要求。假设高度精度变化值不超过 K，则需降低精度的高度 $z-Z$ 应满足 $|z-Z|\leqslant K$，即

$$|z-z\times n(x)|\leqslant K \tag{3}$$

假设 x 坐标是正数且数值较大，当存在0或负值时，需要通过反向偏移消除0或负值，进而保证三维地理信息数据高度精度变化在可控范围内，则有：

$$1-K/x\leqslant n(x)\leqslant 1+K/x \tag{4}$$

对于不同的精度降低函数，确定 $n(x)$ 的方法基本相同，需注意两点：① $n(x)$ 的取值需要是递增、取整值；②根据原始三维地理信息数据范围，确定精度降低函数 $n(x)$。

2.2　平面信息数据精度降低

2.2.1　随机干扰机制

为确保三维地理信息数据精度降低后具有不可逆性，在精度降低过程中需对其进行干预，建立随机干扰机制。通过数学算法规则，利用序列生成器生成高度随机变化方向。序列生成器包含了 n 个序列存储器、加法器和变量器，序列长度计算方式设置为 $2n-1$，计算运行过程中会出现码1和0，其出现的概率基本一致，即高度随机向上正值或向下负值偏移的概率基本一致，因此三维地理数据高度基本保持原有几何形态。

生成h序列随机干扰机制的主要步骤为：①根据随机产生的数值，利用h序列生成器，再次对随机产生的数值进行运算，从而生成一个二至h随机序列；②通过干扰算法规则，生成强弱程度不同的干扰数值；③将二至h随机序列与干扰算法规则相结合生成随机干扰信息。

2.2.2　基于加法运算规则的数据精度降低算法

在对三维地理信息数据做精度处理前，先对数据进行一个平面精度值域的平移，即利用连续的计算函数按一定方向进行偏移，计算函数接近精度降低要求的值域；然后在这个平移值域的基础上进行一个随机干扰，该干扰基于加法运算规则，设置一定数值范围内的取值进行随机加法运算，将变量数值控制在无限接近的函数范围内，且具有随机性和不可逆性。经过平面位置偏移后，三维模型数据的空间表达仍基本符合实际空间位置，平面精度已偏移且偏移值可控但随机不可逆，最终实现三维模型的空间表达与实际基本相符且数据安全精度在要求范围之内。

设定三维地理信息数据的干扰因子为 $A=a[j]$，$[j]>0$，随机取值进行精度降低的加法规则为+，随机干扰因子为 A，随机干扰方向为 N，随机干扰强度为 e，则随机干扰模型算法可表示为：

$$A+N=\{a[i]+(e[j]\times n[j])\} \tag{5}$$

式中，$n[j]$ 为三维模型数据平面位置的干扰方向，其方向需具有随机性，取值为±1；$e[j]$ 为平面干扰强度。

三维地理信息数据成果在实际共享应用时，需保证数据成果精度符合保密要求。为避免精度信息被反解算，干扰强度大小必须有一定的取值范围，R、S 为干扰强度大小的取值范围。

$$\begin{cases} e[j]=\text{rand}\%\,(R-S-1),\ R<i<S \\ h[j]=\text{rand}\%\,(R-S-1),\ R<i<S \end{cases} \tag{6}$$

经过上述计算，得到基于加法运算规则和随机干扰变量取值的三维模型数据平面和高度精度降低方法，最终使三维模型数据符合保密处理要求。

2.2.3　基于映射规则的数据精度降低算法

采用上述算法在数据重叠处进行随机精度降低时，易产生错位偏差的现象。此外，不同的三维模型地理要素在平面空间存在重叠现象，如河流上面有桥梁，三维模型数据进行精度降低时，若河流与桥梁在重叠处采用了不同的干扰方向和强度，则会出现桥梁偏出河流的情况，使得三维模型数据原有的空间拓扑关系与实际空间产生了矛盾，地理要素空间表达就不一致了。因此，为使三维模型数据精度降低后不同三维模型地理要素在相同坐标位置变换一致，空间位置表达与实际空间位置基本一致，需在数据精度降低前进行干预处理。对处在相同坐标的不同三维模型地理数据进行标记，在精度降低时将标记了相同坐标位置的地理数据点的干扰强度、干扰偏移方向等设置一致。该方法理论上是可行的，但在实际作业中存在一些问题：①模型算法较复杂，运算时间较长，影响精度降低处理效率；②为同空间位置的不同地理要素做标记，分组可能会很多，不断记录干扰强度、干扰偏移方向，工作繁琐且耗时长。

鉴于此，本文采用基于映射规则的三维地理数据精度降低方法。设置三维地理数据中任意坐标点 (x,y)，构建一个定长序列表；再利用映射函数 $g_1(\cdot)$，设立被干扰的三维模型地理数据点坐标值与具有干扰信号的序列表索引 j 之间的一组映射关系 $j=g_1(x,y)$。三维地理数据平面精度降低模型的表达式为：

$$\begin{cases} A+N=\{a[j]+(e\times t[g_1(a[j])])\} \\ \text{Index}=g_1(a[j])=g_1(x,y) \end{cases} \tag{7}$$

坐标点 (x,y) 通过映射函数关系公式 $t[g_1(a[j])]$ 生成随机序列干扰项，在地理要素坐标值相同的情况下，采用相同的随机干扰运算公式，那么相同坐标点通过公式运算生成的干扰强度、干扰偏移是相同的，从而实现随机精度降低前后，不同三维模型数据在相同平面坐标点处平面位置的变化是相同的。

2.2.4 三维模型形态控制规则

为保障三维模型数据精度降低后不会出现严重的扭曲变形，需在三维模型数据精度降低处理过程中加入角度变化控制。角度控制的规则为：当线段中间（除去头、尾两点）某一空间位置点的坐标发生变化时，需要计算其与相邻两点的角度值 angle，设置角度值域为 W，若 angle$\leqslant W$，不会对三维模型数据产生变形，则可保留该点的精度降低结果；若 angle$>W$，对三维模型数据产生了畸变，则不对该点进行角度偏移值处理。

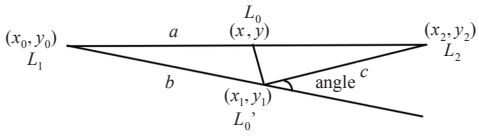


图1 精度降低约束角度计算

图1中 L_0、L_1、L_2 为相同三维模型地理要素一条边线的3个点，对 L_0 进行精度降低处理后形成 L_0'，原直线就会生成一个变化后的角度 angle，可通过预先设置的公式进行计算，即

$$\cos\theta=\frac{a^2+b^2-c^2}{2a\times b\times c} \tag{8}$$

若 L_0' 移动到直线 L_1L_2 的左边或右边，W 值则超出预先设置的值域范围，线要素严重变形，那么就不进行精度降低处理。基于角度变形的控制规则在一定程度上较好地控制了三维模型形态的变化，使其在保密精度范围内，既能进行精度降低处理，又能确保精度降低后三维模型形态与实际基本一致，在确保数据安全的前提下不影响三维模型在实际场景中的具体应用与分析。

3 实验结果与分析

3.1 三维模型数据高度信息精度降低实验

三维模型数据高度信息精度处理前后对比见图2，高度信息精度偏差统计见表1，可以看出，高度信息处理前后建筑物等地物基本保持了其外观形状，因在高度精度处理时对其变形精度设置了一个可控范围，同时加入了映射规则约束，有效避免了建筑物发生明显的扭曲失真的情况；地物高度变形结果相对量测精度控制在10%左右，说明精度降低后的数据精度控制在合理范围内，且通过非线性地理数据精度降低模型缩放的各地物高度各不相同，实现了高度精度处理后的不可逆转，符合三维地理数据精度降低规则。



a 处理前 b 处理后

图2 建筑物高度信息处理前后对比

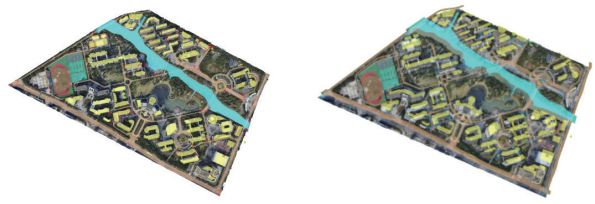
3.2 三维模型数据平面信息精度降低实验

三维模型数据平面信息精度处理前后与二维数据

表1 精度处理前后建筑物高度变化

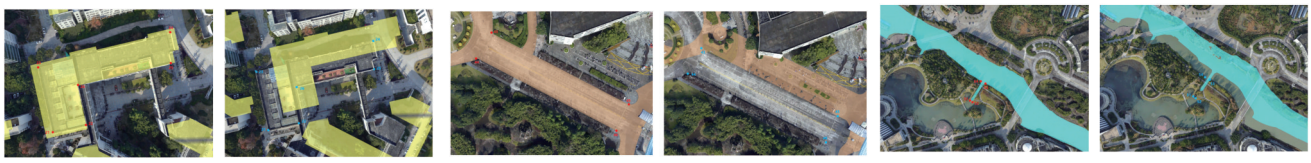
点位编号	变形前建筑物高度/m H	变形后建筑物高度/m H'	高度相对量测精度/% $H/(H-H')$	点位编号	变形前建筑物高度/m H	变形后建筑物高度/m H'	高度相对量测精度/% $H/(H-H')$
1	24.8	22.56	9.03	16	27.47	24.91	9.32
2	21.9	19.61	10.46	17	26.24	23.63	9.95
3	20.77	18.93	8.86	18	24.15	21.75	9.94
4	25.01	22.05	11.84	19	7.77	8.56	−10.17
5	32.83	29.42	10.39	20	8.13	8.94	−9.96
6	31.96	29.16	8.76	21	31.84	29.25	8.13
7	19.83	21.82	−10.04	22	27.09	23.89	11.81
8	10.27	11.28	−9.83	23	22.66	20.23	10.72
9	6.42	6.98	−8.72	24	19.05	21.12	−10.87
10	25.05	22.14	11.62	25	16.25	18.06	−11.14
11	29.56	27.08	8.39	26	14	15.3	−9.29
12	28.95	26.32	9.08	27	19.54	17.57	10.08
13	28.3	25.88	8.55	28	27.21	23.99	11.83
14	25.15	22.89	8.99	29	3.29	3.63	−10.33
15	53.39	47.72	10.62	30	10.91	11.86	−8.71

的套合情况见图3，房屋、道路、河流精度处理前后的对比见图4、表2~4。通过定性分析可知，房屋、道路与河流等地物的平面位置发生了明显偏移，证明了本文精度降低模型的有效性。同时，各地物要素的相对位置和外形轮廓基本保持不变，这主要是由于在平面信息精度降低模型中通过映射规则使得地理数据的空间拓扑关系保持一致，并加入了角度控制规则保证精度降低后数据不会出现形态失真的情况。通过定量分析可知，各地物的平面坐标偏移值在合理区间（地物平面精度偏移值约为15 m），且各节点偏移量不相同，实现了平面坐标经精度处理后的不可逆转，符合三维地理数据精度降低规则，能满足实际应用的需求。



a 处理前　　b 处理后

图3　精度处理前后对比



a 房屋处理前　b 房屋处理后　c 道路处理前　d 道路处理后　e 河流处理前　f 河流处理后

图4　房屋、道路、河流处理前后对比

表2　精度处理前后房屋点位坐标变化

点位编号	变形前点位坐标		变形后点位坐标		偏移值/m
	X	*Y*	*X'*	*Y'*	
1	120.687 976 5	27.923 878 19	120.687 861	27.923 778 42	15.729
2	120.687 714 3	27.923 831 53	120.687 598 7	27.923 731 7	15.871
3	120.687 774 9	27.923 563 46	120.687 659 3	27.923 463 63	15.870
4	120.688 036 9	27.923 609 57	120.687 921 4	27.923 509 81	15.860
5	120.688 389 1	27.924 043 58	120.688 273 6	27.923 943 94	15.845
6	120.688 358 6	27.924 178 99	120.688 243 2	27.924 079 34	15.846
7	120.688 635	27.924 228 14	120.688 519 6	27.924 128 57	15.835
8	120.688 665 4	27.924 092 77	120.688 55	27.923 993 2	15.835
9	120.690 506 6	27.922 875 61	120.690 391 7	27.922 776 5	15.764
10	120.690 586 9	27.922 713 17	120.690 472	27.922 614 07	15.760
11	120.689 743 9	27.922 561 85	120.689 628 9	27.922 462 51	15.797
12	120.689 705 4	27.922 732 12	120.689 590 3	27.922 632 77	15.798
13	120.692 041 3	27.924 054 69	120.691 926 9	27.923 956 11	15.689
14	120.692 610 2	27.924 189 19	120.692 496	27.924 090 81	15.660
15	120.692 640 6	27.924 087 09	120.692 526 4	27.923 988 71	15.659
16	120.692 071 8	27.923 952 9	120.691 957 4	27.923 854 33	15.688
17	120.693 809 1	27.923 828 02	120.693 695 3	27.923 730 02	15.601
18	120.694 293 7	27.923 589 49	120.694 180 1	27.923 491 66	15.576
19	120.694 208 4	27.923 445 57	120.694 094 8	27.923 347 7	15.581
20	120.693 721	27.923 673 48	120.693 607 2	27.923 575 45	15.606
21	120.689 099 1	27.920 064 18	120.688 983 8	27.919 964 52	15.834
22	120.689 357 9	27.920 110 06	120.689 242 7	27.920 010 48	15.823
23	120.689 008 5	27.920 462 65	120.688 893 3	27.920 362 99	15.836
24	120.689 929 8	27.920 653 67	120.689 814 7	27.920 554 27	15.797
25	120.689 928 9	27.920 463 02	120.689 813 9	27.920 363 61	15.798
26	120.689 303 1	27.920 351 09	120.689 187 9	27.920 251 5	15.824
27	120.692 543 2	27.918 437 11	120.692 429	27.918 338 4	15.687
28	120.693 480 3	27.918 604	120.693 366 4	27.918 505 62	15.639
29	120.693 374 3	27.918 758 65	120.693 260 4	27.918 660 24	15.644
30	120.692 573 6	27.918 615 88	120.692 459 4	27.918 517 19	15.685

表3 精度处理前后道路点位坐标变化

点位编号	变形前点位坐标		变形后点位坐标		偏移值/m
	X	Y	X'	Y'	
31	120.683 560 7	27.922 071 18	120.683 413 7	27.921 984 2	17.382
32	120.683 223 6	27.921 887 65	120.683 100 8	27.921 789 43	16.267
33	120.695 009	27.916 617 27	120.694 951 4	27.916 488 94	15.312
34	120.694 926 4	27.916 444 13	120.694 876 9	27.916 322 02	14.382
35	120.693 533 3	27.922 604 65	120.693 419 5	27.922 506 49	15.260
36	120.693 661 6	27.922 536 66	120.693 547 8	27.922 438 55	15.614
37	120.694 412	27.923 661 79	120.694 298 5	27.923 564	15.569
38	120.694 477	27.923 631 34	120.694 363 5	27.923 533 57	15.566
39	120.693 955 1	27.920 448 75	120.693 841 4	27.920 350 63	15.607
40	120.694 048 7	27.920 456 94	120.693 935	27.920 358 86	15.602
41	120.694 268 9	27.919 085 18	120.694 154 3	27.918 991 75	15.313
42	120.694 345 4	27.919 094 22	120.694 231 8	27.918 996 17	15.592
43	120.695 319 9	27.921 681 01	120.695 206 7	27.921 583 45	15.527
44	120.695 213 4	27.921 527 21	120.695 100 2	27.921 429 6	15.534
45	120.696 292 6	27.921 216 29	120.696 179 8	27.921 119 07	15.473
46	120.696 197 5	27.921 056 06	120.696 084 7	27.920 958 79	15.479

表4 精度处理前后河流点位坐标变化

点位编号	变形前点位坐标		变形后点位坐标		偏移值/m
	X	Y	X'	Y'	
47	120.689 008 1	27.924 960 48	120.688 864 6	27.924 890 73	16.102
48	120.688 000 4	27.924 458 89	120.687 888 6	27.924 402 68	16.215
49	120.690 935 5	27.922 670 56	120.690 820 8	27.922 571 57	15.745
50	120.691 397	27.922 435 58	120.691 282 4	27.922 336 72	15.725
51	120.693 232 3	27.921 141 55	120.693 118 3	27.921 043 22	15.642
52	120.693 283 5	27.921 109 36	120.693 169 5	27.921 011 04	15.639
53	120.693 600 4	27.921 461 76	120.693 486 5	27.921 363 57	15.621
54	120.693 496 5	27.921 512 05	120.693 382 6	27.921 413 83	15.627
55	120.696 462	27.919 606 79	120.696 378 9	27.919 487 96	15.502
56	120.696 605 9	27.919 938 74	120.696 537 8	27.919 820 98	14.668

4 结 语

一方面，本文提出的保密处理方法能降低三维地理数据的空间位置精度，且保留了其几何形态和空间关系，符合数据保密要求，为三维地理信息数据的安全和共享应用提供了一种可靠、有效的脱密模型算法；另一方面，在对精度降低时加入随机干扰信号，设置干扰因子，使得三维数据空间的偏移方向和偏移量具有随机性，进而实现三维数据精度降低过程的不可逆，以保证脱密结果具有较强的抗攻击性和稳定性。

参考文献

[1] 朱庆,张利国,丁雨淋,等. 从实景三维建模到数字孪生建模[J]. 测绘学报,2022,51(6):1 040-1 049

[2] 李寅超,姜波,刘照,等. 实景三维模型城市综合管理应用研究[J]. 测绘与空间地理信息,2021,44(11):14-16

[3] 迟洁. 布尔函数的启发式构造及伪随机数生成[D]. 西安:西安电子科技大学,2020

[4] 江栋华. 顾及整体变换与随机扰动的矢量数据组合脱密模型研究[D]. 南京:南京师范大学,2018

[5] 唐家明. DEM几何精度脱密模型与算法研究[D]. 南京:南京师范大学,2018

[6] 薛帅. 地理空间数据加密和隐写的模型与方法研究[D]. 郑州:信息工程大学,2017

[7] 张伟,薛文星,段英,等. 信息化测绘安全保密体系构建浅析[J]. 测绘标准化,2017,33(3):39-41

[8] 刘轶群. 基于集成成像的三维数据加密及信息隐藏[D]. 西安:西安电子科技大学,2016

[9] 谢年. 基于双线性内插模型的地理空间数据保密技术研究[J]. 测绘与空间地理信息,2016,39(3):143-145

[10] 贾志强. 基于GIS的测绘地理数据脱密方法及应用探究[J]. 黑龙江科技信息,2016(32):105

[11] 崔翰川. 面向共享的矢量地理数据安全关键技术研究[D]. 南京:南京师范大学,2013