

基于矩阵 Hadamard 乘积运算的空域冲突检测方法

曲凯^{1,2}, 赵顾颢^{1,2,3*}, 张阳³, 吴亚荣^{1,2}, 魏潇龙^{1,2}, 欧阳文健^{1,2}

(1. 空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051; 2. 国家空管防相撞技术重点实验室, 西安, 710051;

3. 空中交通管理系统与技术国家重点实验室, 南京, 210014)

摘要 针对现有的以经纬度为网格剖分的空域表征模型, 在高纬度地区网格形变较大, 且以空域边界坐标判定空域之间是否重合的冲突检测算法存在的计算速度慢的问题, 提出以正二十面体球面菱形离散格网大圆弧剖分为基础, 用全等菱形离散格网表征空域, 结合空域优先级, 利用多层次希尔伯特(Hilbert)空间填充曲线对空域进行统一编码。设计了基于矩阵的空域数字化表征方法, 利用哈达玛积(Hadamard)乘积运算快速判定多个空域之间的用空属性是否存在冲突。仿真结果表明: 该方法具有较高的网格精度, 实现秒级冲突检测, 与传统冲突检测算法相比, 能够达到降低算法运算量, 提高运算速度的目的。

关键词 矩阵 Hadamard 乘积运算; 空域冲突检测; 空域格网化

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.03.008

中图分类号 V355; TP391 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)03-0055-09

Research on Airspace Conflict Detection Method Based on Matrix Hadamard Product Operation

QU Kai^{1,2}, ZHAO Guhao^{1,2,3*}, ZHANG Yang³, WU Yarong^{1,2}, WEI Xiaolong^{1,2}, OUYANG Wenjian^{1,2}

(1. Air Traffic Control and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. National Key Laboratory of Air Traffic Collision Prevention, Xi'an 710051, China;

3. State Key Laboratory of Air Traffic Management System and Technology, Nanjing 210014, China)

Abstract In response to the problem of slow computation speed of the existing airspace characterization model based on the grid profile of latitude and longitude, which has large grid deformation at high latitudes, and the conflict detection algorithm that determines whether the airspaces overlap with each other by the airspace boundary coordinates, we propose to characterize the airspaces with the full equal rhombic discrete grid based on the large circular arc profile of the spherical rhombic discrete grid of positive icosahedron, and use the multi-level Hilbert space filling curve to encode the airspaces uniformly by combining the airspace priority. A matrix-based digital airspace representation method is designed, and the Hadamard product operation is used to quickly determine whether there is a conflict between the space-use attributes of multiple airspaces. The simulation results show that the method has high grid accuracy, achieves second-level conflict detection, and can achieve the purpose of reducing the algorithm operation and

收稿日期: 2022-11-09

基金项目: 空中交通管理系统与技术国家重点实验室开放基金课题(SKLATM202106)

作者简介: 曲凯(1996-), 男, 河北石家庄人, 硕士生, 研究方向为管理指挥与空域管理。E-mail: graduateqk1@163.com

通信作者: 赵顾颢(1986-), 男, 浙江杭州人, 副教授, 博士, 研究方向为航空管制。E-mail: zghlupin@163.com

引用格式: 曲凯, 赵顾颢, 张阳, 等. 基于矩阵 Hadamard 乘积运算的空域冲突检测方法[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(3): 55-63. QU Kai, ZHAO Guhao, ZHANG Yang, et al. Research on Airspace Conflict Detection Method Based on Matrix Hadamard Product Operation[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(3): 55-63.

improving the operation speed compared with the traditional conflict detection algorithm.

Key words matrix Hadamard product operation; airspace conflict detection; airspace gridding;

空域作为航空活动实施的载体,在同一时间,同一高度和空间范围内只能由一位航空用户占用。2011年,北约空袭利比亚,其空中力量出动 26 500 余次,包括 9 700 多次的军事打击行动^[1]。由此可见,未来大规模联合作战涉空用户多、空域数量庞大、空域更新频率快,若无法快速准确进行空域冲突检测,极易发生用空冲突,影响飞行安全。

对于空域冲突检测问题研究,传统解决方法是对空域的经纬度范围进行交叉运算,判断是否存在冲突。这种方法计算复杂,运算量大,耗时长,仅适用于小规模空域冲突之间的检测。且经纬度网格在高纬度地区形变较大无法准确表征空域范围。

针对以上问题,文献[2]提出全球离散格网系统(discrete global grid system, DGGS),解决了经纬度网格系统中存在的随着纬度越高网格形变越大的问题。文献[3]采用多种投影方法,解决了将正二十面体投影到地球表面的问题;文献[4]提出了“相邻格网距离”和“格网中点”2个标准的评估指标,得到正二十面体的剖分评估指标都优于正八面体。文献[5]以正二十面体为基础,建立平面与球面的对应关系;文献[6]提出了一种球面菱形离散格网正二十面体剖分法,得到的格网在不同剖分层次,角度变形和面积形变均保持为最小;文献[7]研究了基于正二十面体球面菱形离散格网的编码模型及其映射方法,实现了格网编码与地理坐标的相互转换方法。

目前,随着空间地理格网研究发展,基于格网化空域的冲突检测方法越来越多。文献[8]提出了基于四维空间和时间网格来表示空域内飞机轨迹的冲突检测算法,通过检查单元占用来判断是否冲突;文献[9]提出一种基于空间数据结构的冲突探测算法,将航迹信息储存到正方体网格空间中,采用基于相关联空间数据结构以及基于时空数据结构的冲突探测方法实现快速冲突探测;文献[10]提出了一种新的4D空域建模方法,将交通、天气、限制区域和4D空域中其他对象结合起来,用于冲突检测和消解。文献[11]提出了一种基于多级格网时空指数的新型低空飞行冲突检测算法;文献[12]提出基于地球剖分网格模型对冲突空域进行表征并利用多叉树结构计算冲突空域的方法;文献[13]提出一种基于栅格模型的空域冲突检测解脱技术,建立了空域冲突数

字模型;文献[14]建立了确定性冲突检测和消解模块,使用了时间复杂度低的R树算法有效减少飞机4DT之间的比较数,提出了蒙特卡洛树搜索算法;文献[15]提出利用GJK算法将空域网格集合转化为坐标集合,通过对闵可夫斯基差集与坐标原点的包含关系的判断来判断空域冲突方法。

本文建立了基于正二十面体球面菱形离散格网的空域编码表征模型和基于矩阵Hadamard乘积运算的空域冲突检测方法。设计了一套由空域边界经纬度向定位编码转化的方法,能够唯一、准确定位空域格网编码。实现在不同经纬度下,格网尺度适中,适合空域表征和矩阵运算,且不存在明显的形变。运用矩阵Hadamard乘积方法计算空域冲突,满足了空域冲突检测所需的精度和安全性,可应用于空域规划系统中并发挥出明显的优势。

1 空域飞行冲突

空域飞行冲突是空域在时间、高度和范围三维属性同时存在冲突。通过对空域的占用属性进行算法分析,判断出在该空域的航空器是否会与其他空域内航空器发生冲突。如果检测到2个空域的三维属性同时被占用,表明空域内航空器存在飞行冲突。为了便于表达算法特点,本文将所有空域设置为四边形,重点研究空域表征方式和冲突检测方法。

空域按照任务的不同区分为点状、线状和区域状,采用正二十面体球面菱形离散格网将空域范围进行表征的方式,可以保证同一剖分层级下每个格网的面积基本一致,且剖分至第10层级的格网尺度适合于空域表征。采用空间填充曲线将空域经纬度转化为 (x, y) 坐标,便于后续冲突检测时的数据处理。

在进行空域冲突三维属性检测时,首先对时间、高度属性按照区间重合比对的方法检测,得到在时间、高度属性均冲突的空域集合;其次进行范围属性检测。建立串联属性和矩阵Hadamard乘积运算,判断运算后的矩阵内各行列内赋值参数是否为0的快速检测冲突方法。这种矩阵检测方法,适用于对各种形状的空域进行快速冲突检测,具有普遍适用性。

2 基于正二十面体球面菱形离散格网的空域表征模型

在基于球面菱形格网的二叉树剖分方法中,以菱形的长短轴之比、最大最小面积比和菱形格网周长的均方差作为菱形格网几何变形的度量标准来评判,正二十面体剖分菱形网格在各层次剖分下长短轴之比基本不变,保持在 1.4 左右,其余的剖分方式长短轴之比均大于 2,且会随着剖分层次的变化而改变。正二十面体菱形格网的最大最小面积比不会随着格网剖分层次的变化而变化,恒定在 1.3,也是各类剖分方法中最优的^[16]。符合 Goodchild M F 提出的理想格网剖分评价准则^[17-18],具有简单的坐标转换关系、格网具有紧致性和连续性、格网单元有且只有一个标识点等优点,使得其适用于全球多层次剖分和空间编码。

2.1 正二十面体球面剖分模型

正二十面体由于有均匀的几何性质,本文采用文献[19]提出的方法建立正二十面体与球面的对应

$$D = 2R \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (1)$$

得球面上两点间距离 D ,其中 λ 表示经度, φ 表示纬度, R 是地球半径。

通过计算确定剖分层级和边界点坐标及菱形格网边长,各层级尺度对应关系如表 1 所示。

表 1 各层级尺度对应关系

剖分层级	菱形边长 /km	菱形球面面积 /km ²	菱形顶点到对边距离 /km	全球格网个数
0	7 061	51 006 786	6 115	10
1	3 630	12 751 696	3 057	40
2	1 865	3 187 924	1 529	160
3	960	796 981	765	640
4	480	199 245	382	2 560
5	221	49 811	191	10 240
6	110	12 452	95	40 960
7	55	3 113	47	163 840
8	28	778	24	655 360
9	14	194	12	2 621 440
10	7	48	6	10 485 760

初始的 10 个菱形为第 0 层级,根据球面弧长计算公式得,单个菱形边线的长度约为 7 061 km,剖分至第 10 层级时,单个菱形边线的长度约为 7 km,

关系,以 0° 经线东西对称的球面正二十面体放置方法,便于后续进行层次剖分和格网的编码,如图 1 所示。

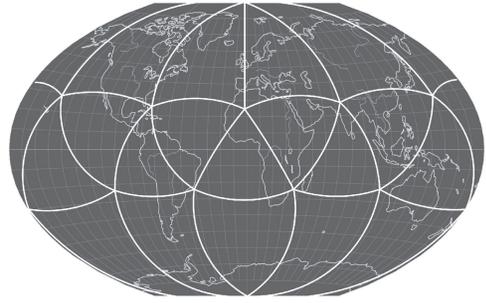


图 1 球面正二十面体的放置方法

对初始菱形进行大圆弧剖分,球面距离计算方法有:大圆公式、简化的大圆公式、Haversine 公式,文献[20]对比了上述计算方法的精度,大圆公式在单精度下舍入误差非常严重,而大圆公式的简化公式在两极或两点距离较大时误差很大,Haversine 公式与直角坐标系方法的精度相近,都非常高。

因此已知初始菱形顶点的经纬度坐标,由 Haversine 公式:

不相邻菱形格网的最小距离为一个菱形格网间隔,即菱形顶点到对边的垂直距离约为 6 km。冲突检测时,空域外扩一层,即间隔 2 个包围层,最小距离 11.94 km,大于 10 km。

因此剖分至第 10 层级,既刚好满足空域最小安全间隔距离,又不会因为在不同纬度区域而导致格网形变,满足空域表征格网使用所需精度条件,停止剖分。

2.2 格网编码方法

对空域格网单元空间位置的描述需要通过地理编码实现。Hilbert 曲线已被证明能够最好保持空间点的局部邻接性的空间填充曲线^[21],通过构造多层次 Hilbert 曲线,使得空域格网在每一剖分层级下,低层级曲线都可以由高层级曲线经过相应规则的平移或旋转而形成。

连接菱形格网对边中点得到 4 个子菱形,设 4 个子菱形分别为象限 0、1、2、3,用 Hilbert 曲线填充象限,分别设为 a, b, c, d 4 种状态,如图 2 所示。根据初始菱形格网的 Hilbert 编码和状态转移方式,可以推导出子菱形的 Hilbert 编码和状态转移方式^[22]。

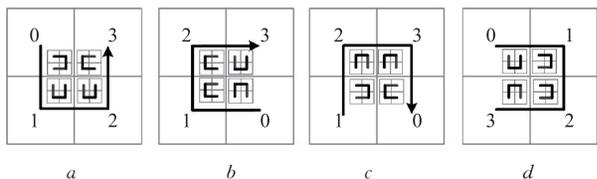


图2 Hilbert 曲线各象限状态转移方式

例如在第 m 层级, 当前状态为 a 的情况下, 当点 P 位于编号为二进制值 11 (即子菱形编号 3) 的象限时, 可以由状态转移表推导出在下一层级的状态为 b 。如图 3 所示, 将编号二进制值 11 作为 m 层级的编码, 在此基础上, 以当前状态为 b 的情况下继续进行 $m+1$ 层级的编码和剖分, 得到 $m+1$ 层级的编码 1 111。随着格网空间的不断剖分, 目标点所在菱形格网的边长越来越短, 直至满足剖分条件。

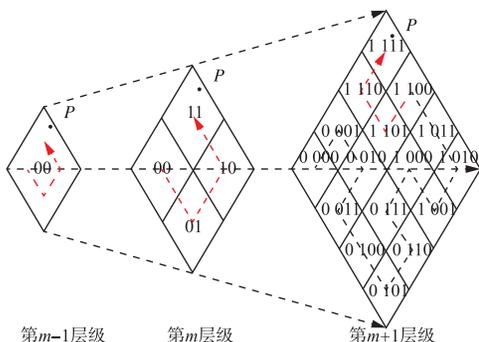


图3 低阶 Hilbert 曲线向高阶映射方式

目标点的表示方式由以下部分组成:

1) 第 1 部分, 菱形码: 剖分的第 0 层级。表 2 给出初始菱形顶点的经纬度坐标。后续算法不涉及第 0 层级的十进制序号转二进制, 因此使用十进制 0~9 表示初始菱形的序号, 便于快速定位目标点所在的初始菱形, 如图 4 所示。

表 2 初始菱形顶点的经纬度坐标

顶点	经度	纬度
S_0	0°E	90°N
S_1	0°E	26.57°N
S_2	72°E	26.57°N
S_3	144°E	26.57°N
S_4	144°W	26.57°N
S_5	72°W	26.57°N
S_6	36°E	26.57°S
S_7	108°E	26.57°S
S_8	180°E	26.57°S
S_9	108°W	26.57°S
S_{10}	36°W	26.57°S
S_{11}	0°E	90°S

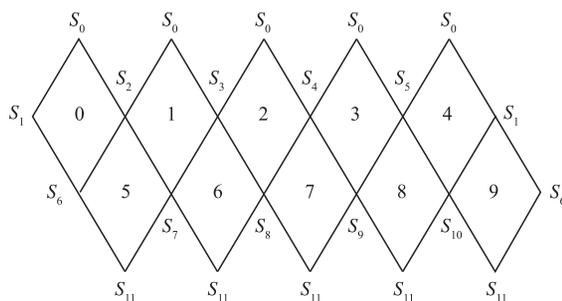


图4 正二十面体初始菱形位置序号

2) 第 2 部分, 区位码: 剖分的第 1~3 层级。格网二叉树剖分, 由 Hilbert 曲线实现格网空间的填充, 将二进制编码转化为 Hilbert 码;

3) 第 3 部分, 坐标码: 剖分的第 4~10 层级。格网二叉树剖分, 由 Hilbert 曲线实现格网空间的填充, 将二进制编码转化为 Hilbert 码, 再把 Hilbert 码转化为 (x, y) 坐标。

以经纬度坐标 [117.97, 21.60] 为例, 首先确定该点所在菱形编号为 1, 将格网剖分至第 10 层级, 得到 1~3 层级二进制编码 100 011, 4~10 层级二进制编码 11 010 010 100 110。按上述方法进行编码转化, 得到目标点的全球唯一表示方式, 定位码: [菱形码, 区位码, 坐标码], 如图 5 所示。

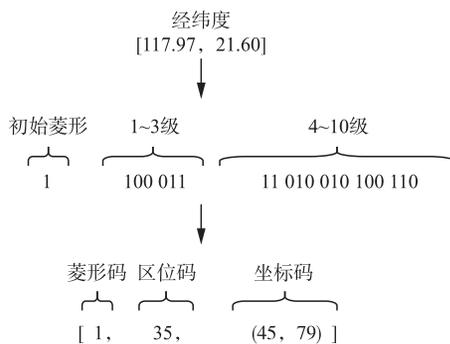


图5 坐标转换示意图

2.3 空域表征方法

空域格网化表征得到空域的占用格网, 每个空域占用格网外扩一层格网, 得到空域包围层。

空域所划设的区域设置为任务区, 任务区范围根据需要由 2^n 个相邻的同层级菱形区域组成, 本文以 1 个第 3 层级菱形区域为例, 面积约为 $8 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。任务区的编号由剖分的 1~3 层级的 Hilbert 编码, 即定位码的第 2 部分——区位码表示; 空域的范围表征由第 4~10 层级的格网矩阵表示, 由空域顶点的定位码的第 3 部分——坐标码, 可得到空域边界点的坐标。取出坐标码, 4 点连线所包围的格网为空域的代表范围。

空域包围层是在进行后续的空域冲突检测时, 对每一个空域占用格网在原空域基础上外扩一层,

得到新的空域范围,如图 6 所示。

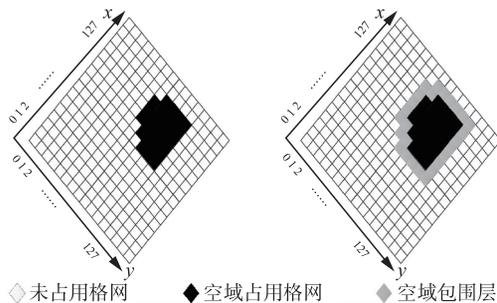


图 6 网格空域表征示意图

3 基于矩阵运算的空域冲突检测方法

3.1 空域模型的构建

3.1.1 录入空域信息

按照空域任务优先级进行分类,由高到低按照表 3 的录入方式依次分成 I、II、III 组……在任务优先级相同的前提下,比对空域的占用时间,由任务开始时间,从早到晚依次排序录入。

表 3 空域级别划分表

时间	级别 I	级别 II	...	级别 X
激活时间	I-001	II-001	...	
(早)	I-002	II-002		
录入顺序	I-003	⋮	⋮	⋮
	⋮	⋮		
(晚)	I-00X	II-00X		

3.1.2 空域数据矩阵构建

1)空域边界点经纬度坐标转化为三维球面直角坐标。设经纬度坐标 G (经度 λ , 纬度 φ), 地球赤道半径 R , 对应的三维直角坐标为 $C(X, Y, Z)$, 由空间几何关系可建立从球面经纬度坐标向三维直角坐标转换的关系,如图 7 所示。

$$X = R \cos\left(\varphi \frac{\pi}{180}\right) \cos\left(\lambda \frac{\pi}{180}\right) \quad (2)$$

$$Y = R \cos\left(\varphi \frac{\pi}{180}\right) \sin\left(\lambda \frac{\pi}{180}\right) \quad (3)$$

表 4 空域 A 经纬度坐标与全球定位码对应关系

经纬度坐标	全球定位编码	菱形码	区位码	数据矩阵(x,y)坐标
[117.97, 21.60]	[1-35-(45, 79)]	1	35	(45, 79)
[118.72, 21.10]	[1-35-(51, 93)]	1	35	(51, 93)
[118.28, 20.78]	[1-35-(43, 91)]	1	35	(43, 91)
[117.71, 21.25]	[1-35-(39, 79)]	1	35	(39, 79)

$$Z = R \sin\left(\varphi \frac{\pi}{180}\right) \quad (4)$$

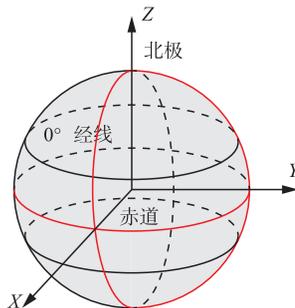


图 7 经纬度与三维球面直角坐标系转换图

2)三维球面坐标剖分定位。已知边界点三维坐标 P_1, P_2, P_3, P_4 和待求点 P 三维坐标, 连接菱形格网对边中点, 得到中点坐标 M_1, M_2, M_3, M_4 。如图 8 所示, 将格网划分为 4 个象限, 求平面 OM_1M_3 法向量 \vec{v}_1 , 和平面 OM_2M_4 法向量 \vec{v}_2 , 根据点与平面关系来确定点所处象限。设 Hilbert 初始状态为 a 状态, 根据象限转移方式确定下一层级的 Hilbert 状态。依次进行层级剖分直至第 10 层级。

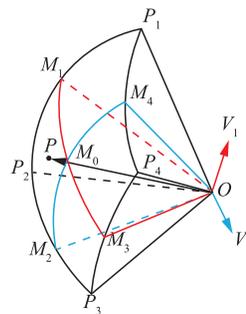


图 8 空间平面法向量与点的位置关系

3)空域坐标点全球定位码构建。由空域顶点的定位码的第 3 部分——坐标码可得到空域边界点的坐标。取出坐标码, 4 点连线后得到空域的边界, 计算出空域所占用的格网, 并赋值为 1, 任务区内其他格网赋值为 0, 得到一个由 0、1 构成的 128×128 数据矩阵。此时的数据矩阵为空域的代表形式。

如表 4 所示为空域 A 边界点纬度坐标转化为全球定位编码的对应关系:

4)空域占用格网确定。连接空域边界点坐标,得到空域多边形,判断矩阵内所有点是否在空域范围内。在空域范围内赋值为1,不在赋值为0。得到由0,1构成的 128×128 矩阵即为空域数据矩阵。如图9所示,为空域A格网化表征后结果。

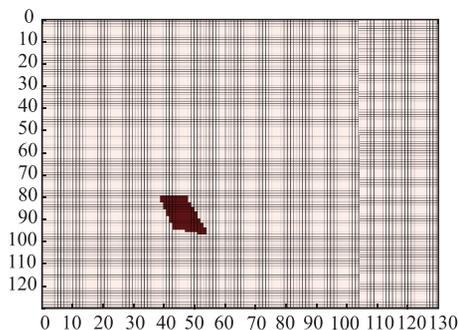


图9 空域A格网化示意图

3.2 空域冲突矩阵检测方法

Hadamard是矩阵的一类运算,若 $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}$ 和 $\mathbf{B} = \{b_{ij}\}$ 是2个同阶矩阵,若 $c_{ij} = a_{ij} \times b_{ij}$,则称矩阵 $\mathbf{C} = \{c_{ij}\}$ 为 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 的哈达玛积,记作 $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ 。

已知任务区边界坐标,可得到所占用格网的区位码。以任务区所在的第3层级菱形格网作为基准菱形,剖分至第10层级。可将基准菱形剖分成128行,128列的含有16384个菱形子格网的菱形。将基准菱形看作 128×128 矩阵。设存在空域A和空域B,空域A、B的经纬坐标转换得到A、B边界点 (x, y) 坐标。连接边界点坐标得到空域占用格网,对占用格网赋值,可将空域地理位置转化为矩阵占用格网。每个空域 (x, y) 占用坐标均为该矩阵的行列号。空域A占用格网赋值 a_{ij} ,任务区内其他格网赋值为0,得到空域A的数据矩阵 $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}$;空域B占用格网赋值 b_{ij} ,任务区内其他格网赋值为0,得到空域B的数据矩阵 $\mathbf{B} = \{b_{ij}\}$ 。 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 都为 128×128 的同阶矩阵。

进行Hadamard乘积运算 $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{C}$,判断矩阵C内各行列内赋值参数是否为0,若某一行列值 $c_{ij} = a_{ij} \times b_{ij}$,则表明在第*i*行第*j*列的格网同时被空域A、B占用,检测出存在冲突的准确位置;若矩阵 $\mathbf{C} = \mathbf{O}_{(i \times j)}$,则不存在冲突。

3.3 空域冲突检测流程

空域数据录入数据库,空域属性包括时间属性、高度属性、范围属性。从最高级别空域组开始,判断空域A时间属性与空域B、C……是否存在冲突,将存在冲突的空域设置为一个空域集合。依次判断空域B高度属性与空域C、D……是否存在冲突,将存

在冲突的空域设置为另一个空域集合。以此类推由高级别空域开始,依次向低级别空域检测是否冲突,并将存在冲突的空域设置为单独的空域集合。冲突检测流程如图10所示。

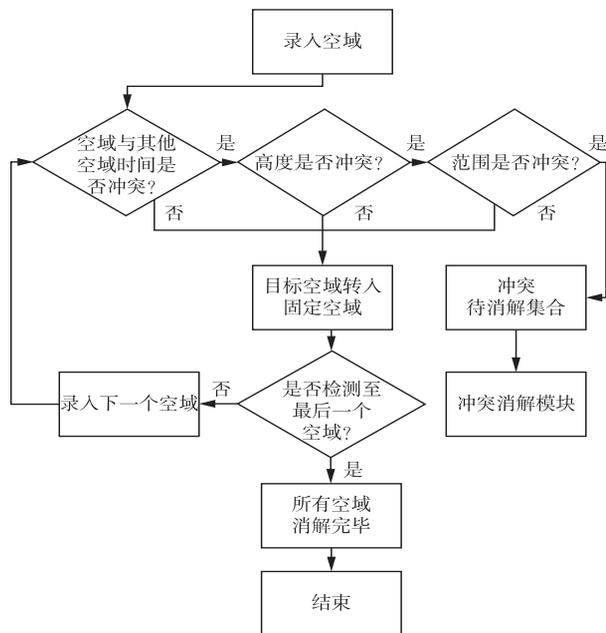


图10 空域冲突检测流程

步骤1 时间属性冲突检测。比较2个空域的起始时间与结束时间。时间存在冲突的逻辑关系:如果空域A的起始时间 st_A 小于空域B的结束时间 et_B ,且空域A的结束时间 et_A 大于空域B的起始时间 st_B ,则这2段时间存在交集;同样,如果空域B的起始时间 st_B 小于空域A的结束时间 et_A ,且空域B的结束时间 et_B 大于空域A的起始时间 st_A ,则这两段时间存在交集。4种情况如图11所示。

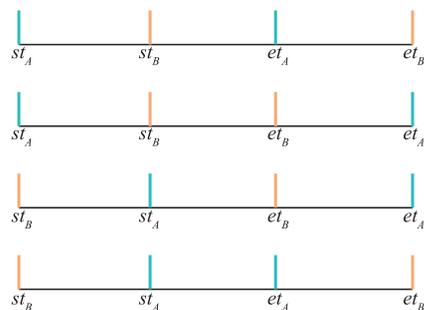


图11 时间冲突判断示意图

以上4种情况使用if条件语句判断如下:

if $\max(st_A, st_B) < \min(et_A, et_B)$, if条件成立,则2个空域时间存在重合。在第一个空域集合内进行高度属性的冲突检测,将存在高度冲突的空域保留在集合内,将不存在冲突的空域剔除;

步骤2 高度属性冲突检测。逻辑关系同时间属性检测:空域A的高度下限 $H_{\min A}$ 小于空域B的高度上限 $H_{\max B}$,且空域A的高度上限 $H_{\max A}$ 大于

空域 B 的高度下限 $H_{\min B}$, 则这 2 个空域用空高度层存在交集; 同样, 空域 B 的高度下限 $H_{\min B}$ 小于空域 A 的高度上限 $H_{\max A}$, 且空域 B 的高度上限 $H_{\max B}$ 大于空域 A 的高度下限 $H_{\min A}$, 则这 2 个空域用空高度层存在交集。4 种情况也可以用 if 条件语句进行判断。

完成时间、高度 2 个维度冲突检测后, 得到若干

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

步骤 4 输出空域冲突检测结果。由高级别空域开始按照步骤 1~3 检测, 循环判断是否完成所有空域冲突检测。

全部空域检测完毕, 按照检测顺序输出所有存在冲突的空域集合。

4 仿真验证

在某任务区(边界经纬度坐标: [114.64, 23.83], [120.29, 27.74], [122.88, 23.33], [117.83, 17.35])内, 根据任务需求, 设定 200 个空域, 其中单个空域最大面积 4 715 km², 最小面积 148 km², 验证空域冲突算法的可行性。

仿真条件: 笔记本电脑, CPU: AMD Ryzen 7 5800 H, 显卡: NVIDIA GeForce RTX 3070 Laptop GPU, 内存: 16.0 GB, 运行环境: python3.9 环境。

4.1 任务区和空域表征

根据空域边界点坐标确定空域占用格网, 将空

域集合。在这些空域集合内的空域既存在时间冲突, 又存在高度冲突。

步骤 3 范围属性冲突检测。得到空域 A 的数据矩阵 A , 空域 B 的数据矩阵 B 。对 A 、 B 进行 Hadamard 乘积运算 $A \circ B$, 得到相同维度的矩阵 C 。当 $C = O_{(i \times j)}$ 时, 则判定空域 A 与空域 B 不存在冲突, 计算公式如下:

域编号、优先级、占用时间、高度等信息赋值空域格网。空域按照优先级顺序录入检测算法, 由高到低依次编号 001~200, 根据空域信息对每个空域添加包围层, 进行格网化表征, 如图 12 所示。

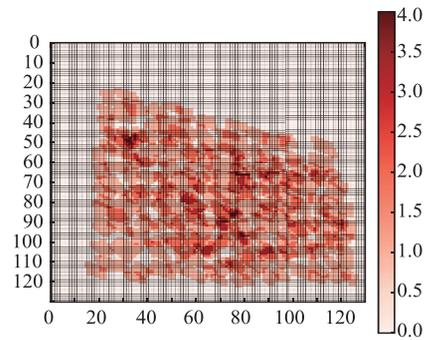


图 12 空域 001~200 仿真示意图

4.2 进行空域三维冲突检测

运行基于矩阵 Hadamard 乘积运算的冲突检测算法, 按照空域三维属性, 时间、高度、范围依次进行冲突检测, 验证该算法的可行性, 其仿真程序运行结果, 如图 13 所示。

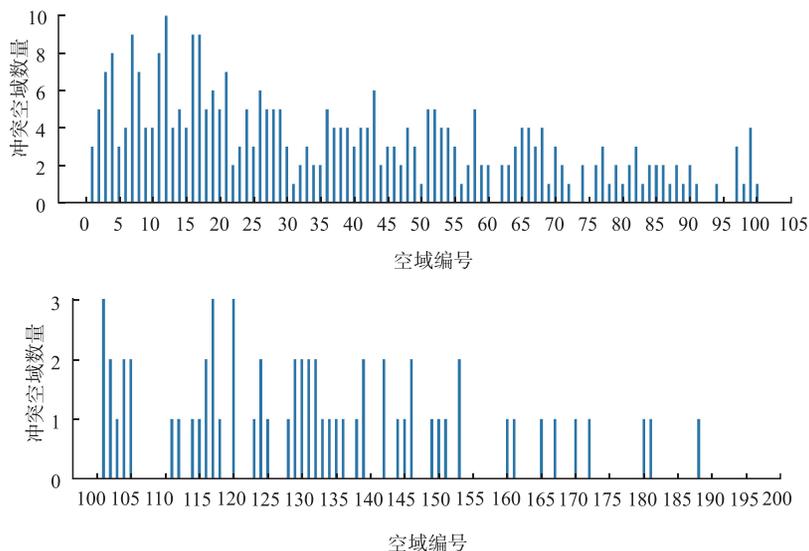


图 13 仿真程序运行结果

4.3 仿真结论与分析

1)根据空域仿真结果,图12格网颜色度由浅至深为1~4,表示该格网被空域(含包围层)占用数目依次为1~4个。其中颜色度为1的格网共4690个,颜色度为2的格网共2484个,颜色度为3的格网共382个,颜色度为4的格网共35个。

2)通过与数字地球软件划设的空域对比,基于正二十面体球面菱形的空域格网虽然为菱形格网,但在矩形格网可视化后仍能够准确表征空域,表明菱形格网表征空域的方法是可行的。

3)如图13、14所示,当空域数量为200个时,共有137个空域与其他空域存在冲突,共计390个冲突点,采用本算法进行冲突检测时,当空域数量为100个时,检测时间为0.25339s,当空域数量为200个时,检测时间为0.85332s;使用基于python语言的shapely geometry库进行传统冲突检测算法的比对仿真,当空域数量为100个时,检测时间为0.25339s,当空域数量为200个时,检测时间为1.00132s。冲突检测结果相一致。冲突检测时间随空域数量增加而增长。本算法较传统算法运算速度有所提升,但由于采用基于CPU的矩阵运算,本算法并未发挥出基于GPU的矩阵运算优势。

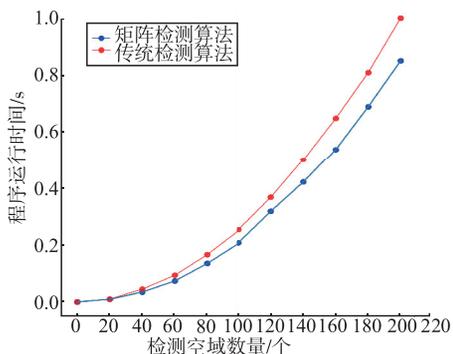


图14 仿真程序运行时间

4)结果表明,本算法采用空域两两之间矩阵运算,运算量为 $1/2(n^2+n)$,算法时间复杂度为 $O(n^2)$,与传统的空域经纬度边界检测方法相比,时间复杂度相同,但通过降低运算量,实现以秒量级完成200个空域之间的冲突检测,较传统检测算法提升了算法运行效率。

5 结语

本文结合实际任务用空需求特点,设计了基于正二十面体球面菱形离散格网模型的剖分方案与空域坐标编码结构,实现了最适用于空域表征的剖分

层级,克服了不同纬度区间下格网形变问题,确保空域表征的准确性。设计了经纬度坐标转化为全球定位码的方法和空域格网化表征流程。与传统空域表征方法相比,基于正二十面体球面菱形离散格网下的空域数据矩阵表征方式更加简便,每个格网对应唯一的编码,将空域位置转化为占用格网,最终归结为空域数据矩阵之间的运算。

Python环境下对矩阵类型数据处理速度更快,可以有效缩短程序运行时间,提高检测效率。随空域数量增加,算法运行时间增长。在大规模用空情况下,可以做到快速、高效、准确地检测冲突;同时,利用格网表征的空域便于任务空域的数据管理和信息存储。

下一步进行空域冲突检测与消解算法研究中,要充分利用基于GPU的矩阵运算优势,进一步降低算法时间复杂度,提升算法效率,实现空域一体化冲突检测。

参考文献

- [1] NATO N. Last Air Mission of Unified Protector concluded [EB/OL]. (2011-10-31) [2022-11-09]. <https://www.nato.int/cps/en/natohg/>.
- [2] SAHR K, WHITE D. Geodesic Discrete Global Grid Systems: Cartography and Geographic Information Science[J]. Cartography and Geographic Information Science, 2003, 30(2): 121-134.
- [3] WHITE D. Global Grids from Recursive Diamond Subdivisions of The Surface of an Octahedron or Icosahedrons[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2000, 64(1): 93-103.
- [4] GREGORY M J, KIMERLING A J, WHITE D, et al. A Comparison of Intercell Metrics on Discrete Global Grid Systems[J]. Computers Environment and Urban Systems, 2008, 32(3): 188-203.
- [5] 贾进,童晓冲,张永生,等. 球面等积网格系统生成算法与软件模型研究[J]. 测绘学报, 2007(2): 187-191.
- [6] 周良辰,盛业华,林冰仙,等. 球面菱形离散格网正二十面体剖分法[J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1293-1299.
- [7] 林冰仙,许德朋,盛业华,等. 正二十面体球面菱形离散格网的编码模型及其映射方法[J]. 测绘学报, 2016, 45(S1): 23-31.
- [8] JARDIN M. Grid-based strategic Air Traffic Conflict Detection[C]// Reston AIAA Guidance, Navigation, Control Conference and Exhibit. VA: AIAA, 2005: 5826.

- [9] RUIZ S, PIERA M A, ZÚÑIGA C A. Relational Time-space Data Structure to Speed up Conflict Detection under Heavy Traffic Conditions [C] // Sabadell (Barcelona). First SESAR Innovation Days, Spain: Eurocontrol, 2011: 1-8.
- [10] KUENZ A. A Global Airspace Model for 4D- Trajectory-based Operations [C] // Piscataway. 2011 IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference, TAWAY, N Y: IEEE, 2011: 3E3-1-3E3-9.
- [11] MIAO S, CHENG C, ZHAI W, et al. A Low-Altitude Flight Conflict Detection Algorithm Based on A Multilevel grid Spatiotemporal Index [J]. International Journal of Geo-Information, 2019, 8(6): 289.
- [12] 刘智奇, 南英, 谢如恒. 基于剖分网格的空域冲突检测方法 [J]. 舰船电子工程, 2022, 42(4): 157-162.
- [13] 龚玮, 陶德进, 闫嘉明. 基于栅格模型的空域冲突检测解脱技术研究 [J]. 信息化研究, 2021, 47(3): 46-50.
- [14] SUI D, ZHANG K. A Tactical Conflict Detection and Resolution Method for En-Route Conflicts in Trajectory-Based Operations [J]. Journal of Advanced Transportation, 2022(2): 16.
- [15] 蔡明, 万路军, 高志周, 等. 空间网格体系下基于 GJK 的空域冲突检测算法 [J]. 西华大学学报(自然科学版), 2022, 41(1): 36-41.
- [16] 林川. 球面菱形网格剖分、编码及数据集成研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2013.
- [17] 万刚, 曹雪峰, 李科, 等. 地理空间信息网格理论与技术 [M]. 北京: 测绘出版社, 2016.
- [18] GOODCHILD M F. Geographical Information Science [J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1992, 6(1): 31-45.
- [19] FEKETE G, TREINISH L. Sphere Quadtrees: A New Data Structure to Support the Visualization of Spherically Distributed Data [C] // SPIE. Proceedings of SPIE on Extracting Meaning from Complex Data: Processing, Display, Interaction. WA: SPIE, 1990: 242-253.
- [20] 樊东卫, 何勃亮, 李长华, 等. 球面距离计算方法及精度比较 [J]. 天文研究与技术, 2019, 16(1): 69-76.
- [21] 周艳, 朱庆, 张叶廷. 基于 Hilbert 曲线层次分解的空间数据划分方法 [J]. 地理与地理信息科学, 2007(4): 13-17.
- [22] 陆锋, 周成虎. 一种基于空间层次分解的 Hilbert 码生成算法 [J]. 中国图象图形学报, 2001(5): 59-63.

(编辑: 陈斐)