

# 基于 GeoSOT 网格的空域栅格化表征方法

徐鑫宇<sup>1</sup>, 万路军<sup>1,2</sup>, 陈平<sup>2</sup>, 戴江斌<sup>1</sup>, 蔡明<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051; 2. 空中交通管理系统与技术国家重点实验室, 南京, 210007)

**摘要** 针对利用经纬度坐标表征空域的不足, 提出了基于 GeoSOT 网格的空域栅格化表征方法。首先, 分析了空域的栅格化表征具有简洁高效、便于协调通报的相对优势, 并对美军典型的网格系统进行剖析; 其次, 结合飞行基本规则、飞行间隔规定, 设计了面向空域表征的网格参考系统的剖分方案和编码结构; 最后, 根据网格最少和精度对应原则给出点状、线状、区状空域的详细栅格化表征流程, 并在网格平台进行空域表征场景示例应用分析, 为空域表征提供了一种新的技术手段与实践思路。

**关键词** 空域表征; 空域栅格化; GeoSOT 网格

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.02.003

**中图分类号** TP391 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)02-0015-08

## An Airspace Raster Representation Method Based on GeoSOT Grid

XU Xinyu<sup>1</sup>, WAN Lujun<sup>1,2</sup>, CHEN Ping<sup>2</sup>, DAI Jiangbin<sup>1</sup>, CAI Ming<sup>1</sup>

(1. Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;  
2. State Key Laboratory of Air Traffic Management System and Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract** In view of the shortcomings of airspace representation being characterized by using latitude and longitude coordinates, a method of airspace raster is proposed based on GeoSOT grid. Firstly, the airspace raster representation being concise, good in efficiency, and easy in coordination and report, some typical grid systems of the U. S. Army are analyzed. Secondly, combined with the general flight rules and flight interval regulations, a division scheme and a coding structure of grid reference system for airspace representation are designed. Finally, according to the principle of minimum grid and precision correspondence, the detailed raster representation flow of point, line and area airspace is given, and the application analysis of airspace representation scenario is carried out on grid platform. This provides a new technical means and practical ideas for the airspace representation.

**Key words** airspace representation; airspace raster; GeoSOT grid

信息化联合作战, 大量有人、无人航空器及导弹、智能弹药等武器系统充斥天空, 战场空域变得越来越拥挤, 需要创新空域表征方法以实现高效的战

场空域管控<sup>[1-2]</sup>。目前, 我们习惯用经纬度坐标表征空域, 这使得面对高烈度的现代战争时存在以下缺点: ①经纬度的度-分-秒形式描述复杂, 不利于战场

**收稿日期:** 2020-08-17

**基金项目:** 国家自然科学基金(61703425); 空中交通管理系统与技术国家重点实验室开放基金(SKLATM201906)

**作者简介:** 徐鑫宇(1996—), 男, 河南平舆人, 硕士生, 研究方向: 空域规划与管理研究。E-mail: 2211070853@qq.com

**通信作者:** 万路军(1986—), 男, 江苏连云港人, 博士, 副教授, 研究方向: 空域规划与管理研究。E-mail: pandawlj@126.com

**引用格式:** 徐鑫宇, 万路军, 陈平, 等. 基于 GeoSOT 网格的空域栅格化表征方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(2): 15-22. XU Xinyu, WAN Lujun, CHEN Ping, et al. Airspace Rasterization Representation Method based on GeoSOT Grid[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(2): 15-22.

空域的位置通报;②经纬度表征的是一个点,要想表征一个面状空域需要确定该空域的几个角点和空域中心点的经纬度坐标,繁琐复杂;③在联合作战协同过程中需要大量的精力去核对经纬度坐标数据,导致效率极低。而美军在不断的战争实践中,用一系列全球离散网格系统(discrete global grid system, DGGS)<sup>[3-4]</sup>来表征空域,比传统的基于经纬度坐标表征空域的方法更有效地利用信息资源<sup>[5-6]</sup>。

国内外学者提出了多种 DGGS,主要有经纬度剖分网格系统、自适应剖分网格系统以及正多面体剖分网格系统<sup>[7-8]</sup>。自适应网格比规则网格有更大的灵活性,但自适应网格的递归剖分十分困难,这对于空间对象的多尺度表征非常不利;正多面体网格系统以5种“理想多面体”为剖分网格单元,导致剖分网格种类繁多,并且每一种形状的网格针对不同的应用场景<sup>[9]</sup>。经纬度剖分网格系统是建立最早也是目前应用最广泛的一类网格系统,符合军事人员的使用习惯。美军目前作战使用的网格系统都是经纬度网格系统<sup>[10-11]</sup>,例如军事网格参考系统(military grid reference system, MGRS)、通用地理参考系统(common geographic reference system, CGRS)以及全球区域参考系统(global area reference system, GARS)。

借鉴美军的成熟经验以及作战实践,要进行高效的战场空域管控,必须要解决战场空域栅格化表征问题。空域的栅格化表征是后续的战场空域冲突快速检测与消解的前提,也为高效及时地进行战场空域管控奠定基础。本文以列入我国国家军用标准<sup>[12]</sup>、由北京大学程承旗教授团队提出的 $2^n$ 一维整数数组全球经纬剖分网格(geographic coordinate subdividing grid with one dimension integral coding on  $2^n$ -tree, GeoSOT)<sup>[13-16]</sup>为基础,结合战场空域管控实际,抽取 GeoSOT 部分层级网格,并重新设计编码结构,对战场空域进行栅格化表征。

## 1 美军典型网格系统剖析

战场空域栅格化表征是指基于网格参考系统,把战场空域地址范围分割为多层次、多尺度的无缝隙、无重叠的网格集合,并通过有序的网格编码组成地址码,加上空域的高度范围、使用时间以及类型等属性码建立数据结构,对战场空域进行记录和组织的方法。美军对战场空域的深刻认识以及对战场空域进行栅格化表征的成功实践值得我们参考。本节通过对美军典型经纬度剖分网格系统进行梳理、分析,为设计适应我国战场空域管控特点的网格参考

系统提供借鉴。

### 1.1 CGRS

CGRS 用于对作战区域进行划分,剖分原点根据作战区域灵活确定,因此不同战区使用的剖分原点可以不同。原点确定后,将作战区域划分为 $30' \times 30'$ 的单元(Cell),经度方向由西向东依次用字母 A~Z 编码,纬度方向由南向北依次用数字编码;每个单元均匀划分为9个键(Keypad),每个键代表 $10' \times 10'$ 的区域,从上到下用1~9编码;每个键均匀划分为4个象限(Quadrant),每个象限代表 $5' \times 5'$ 的区域,分别用 NW、NE、SW、SE 编码,代表西北、东北、西南、东南。CGRS 通过单元-键-象限三级完成对战场区域的划分。CGRS 缺点是未覆盖全球,只在战场局部建立;且剖分原点不固定,容易造成不同作战区域之间的重叠和同一片区域编码不唯一等问题。

### 1.2 GARS

GARS 是为克服上述缺点而在 CGRS 基础上发展起来的,两者都属于面参考系统。GARS 对地球表面进行剖分,每一个网格代表的地理空间都有唯一的编码。GARS 原点为 $180^\circ$ 经线( $180^\circ\text{E/S}$ )与南极点( $90^\circ\text{S}$ )的交点,首先将全球范围划分为 $30' \times 30'$ 的单元,经度方向由西向东用001~720编码,纬度方向由南向北用 AA~QZ(跳过 I 和 O)编码,每一个单元都可用3位数字加2位字母编码。其次每个单元均匀划分为4个 $15' \times 15'$ 的象限,从上到下用1~4编码。每个象限均匀划分为9个 $5' \times 5'$ 的键,从上到下按 Z 序用1~9编码。GARS 的优点是全球覆盖,每个区域有唯一的编码,且简明易用,编码数字与字母交替,易于协调通报;缺点是最小网格表征的区域是5 nmile,无法满足高精度协同作战需要。

### 1.3 MGRS

美军战场空域管控部门使用 MGRS 作为点参考系统。MGRS 用一个字母和数字组成的字符串表示地球上的地理位置,字符串的长度越长代表定位精度越高,最高可达1 m。该系统将地球建模为一个椭球体,目前使用的是 WGS84 椭球。MGRS 在南纬 $80^\circ$ 至北纬 $84^\circ$ 之间采用通用横轴墨卡托投影(universal transverse mercator projection, UTM),能够覆盖地球上大部分陆地。地理位置的编码分为3个部分:①区域网格索引编码;②百公里网格索引编码;③数字定位索引编码。MGRS 的优点是能够实现高精度协同,弥补 CGRS 和 GARS 不能适用于近距空中支援等高精度要求的作战场景的不足;缺点是编码位长,对装备性能要求高。

## 2 面向空域表征的网格参考系统设计

美军网格系统以 1984 世界大地测量系统(world geodetic system 1984, WGS-84)为基准,而我国现阶段使用的位置参考基准是 CGCS-2000 国家大地坐标系,WGS-84 与 CGCS-2000 是有区别的<sup>[17]</sup>;其次美军使用 MGRS 作为点参考系统,使用 CGRS 和 GARS 作为面参考系统,对于点和面状空域的描述需要使用不同的参考系统,并且两种面参考系统剖分方法相似,但同一个术语表示的空间范围却不同,在使用上容易造成混乱。因此,需要探索适合我国战场空域表征实际的网格系统。

### 2.1 剖分方案

GeoSOT 网格具有我国完全自主知识产权,采用经纬度剖分,具有边界不重叠、网格正交、经纬一致、与传统数据规格兼容性好等特点,且能够进行点面一体化表征。GeoSOT 将地球表面空间进行 3 次拓展,即将纬度( $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ )和经度( $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$ )都拓展为( $-256^{\circ}\sim 256^{\circ}$ ),将  $1^{\circ}$ 拓展为  $64'$ ,将  $1'$ 拓展为  $64''$ ,实现等度、等分、等秒剖分。图 1 为拓展示意图。

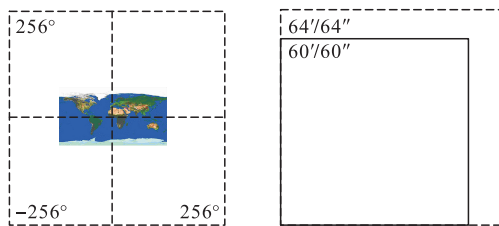


图 1 GeoSOT 拓展示意图

GeoSOT 属于等经纬度四叉树剖分网格体系,剖分层级共 32 级,各级网格对应的尺度如表 1 所示,其编码方式可采用一维四进制编码、一维二进制编码或者二维二进制编码,3 种编码方式可方便地转换<sup>[18]</sup>。由于 GeoSOT 剖分层级较多、编码较长,这对于描述空域以及任务部队之间的协调通报是不利的,并且部分层级的 GeoSOT 网格大小对于战场空域管控来说意义不大。因此需要综合考虑作战需求、战场空域高效表征、便于后期空域冲突检测与消解等因素,抽取 GeoSOT 中部分层级网格,设计面向空域表征的改进型 GeoSOT 剖分方案和编码结构。

依据《中华人民共和国飞行基本规则》<sup>[19]</sup>以及《中华人民共和国飞行间隔规定》<sup>[20]</sup>,空域之间的水平间隔多为 10 km 和 20 km。因此,改进型 Geo-

SOT 剖分方案应当包含原方案中  $8\text{ km}\times 8\text{ km}$ 、 $2\text{ km}\times 2\text{ km}$  这两级网格。故选定  $512\text{ km}\times 512\text{ km}$  网格作为第 1 层级,表示作战责任区;将第 1 层级网格平均分为 16 份,得到第 2 级层级  $128\text{ km}\times 128\text{ km}$  网格,表示作战基本区;依次进行 16 分,得到  $32\text{ km}\times 32\text{ km}$ 、 $8\text{ km}\times 8\text{ km}$ 、 $2\text{ km}\times 2\text{ km}$ 、 $512\text{ m}\times 512\text{ m}$ 、 $128\text{ m}\times 128\text{ m}$  网格。改进型 GeoSOT 各层级网格大小、尺度、级别如表 2 所示。

表 1 GeoSOT 各层级与尺度对应关系

层级	网格大小	尺度	层级	网格大小	尺度
0	$512^{\circ}$		17	$16''$	512 m
1	$256^{\circ}$		18	$8''$	256 m
2	$128^{\circ}$		19	$4''$	128 m
3	$64^{\circ}$		20	$2''$	64 m
4	$32^{\circ}$		21	$1''$	32 m
5	$16^{\circ}$		22	$1/2''$	16 m
6	$8^{\circ}$	1 024 km	23	$1/4''$	8 m
7	$4^{\circ}$	512 km	24	$1/8''$	4 m
8	$2^{\circ}$	216 km	25	$1/16''$	2 m
9	$1^{\circ}$	128 km	26	$1/32''$	1 m
10	$32'$	64 km	27	$1/64''$	0.5 m
11	$16'$	32 km	28	$1/128''$	25 cm
12	$8'$	16 km	29	$1/256''$	12.5 cm
13	$4'$	8 km	30	$1/512''$	6.2 cm
15	$2'$	4 km	31	$1/1\ 024''$	3.1 cm
15	$1'$	2 km	32	$1/2\ 048''$	1.5 cm
16	$32''$	1 km			

表 2 改进型 GeoSOT 各层级网格

层级	网格大小	尺度	级别
1	$4^{\circ}$	512 km	作战责任区
2	$1^{\circ}$	128 km	作战基本区
3	$16'$	32 km	大尺度
4	$4'$	8 km	中尺度
5	$1'$	2 km	小尺度
6	$16''$	512 m	过渡级
7	$4''$	128 m	定位级

### 2.2 地址编码

改进型 GeoSOT 剖分方案用  $4^{\circ}\times 4^{\circ}$  的网格将地球表面( $180^{\circ}\times 360^{\circ}$ )分为  $46\times 90$  份。纬度方向用 A~Y 和 a~y(跳过 I, O 和 i, o)共 46 个字母,从赤道按照纬度由低到高编码,北纬大写,南纬小写。经度方向从本初子午线开始由西向东用 00~89 共 90 个数字编码。每个  $4^{\circ}\times 4^{\circ}$  网格平均剖分为 16 个  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  网格,按照 Z 序空间填充曲线进行 16 进制编码,如图 2 所示。依此递推,得到第 3~7 层级网格的编码。

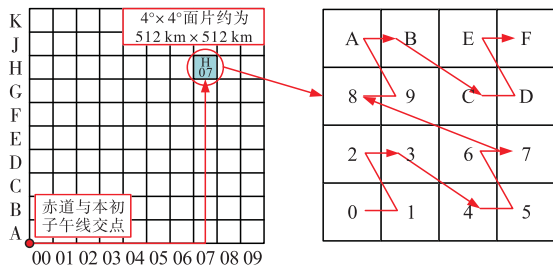


图2 改进型 GeoSOT 网格

以西安钟楼中心经纬度坐标( $34^{\circ}15'39''\text{N}$ ,  $108^{\circ}56'32''\text{E}$ )为例说明 GeoSOT 与改进型 GeoSOT 编码的区别。西安钟楼中心所在的 GeoSOT 第 15 层级网格( $1' \times 1'$ )的一维二进制编码为 0000011100010111000010111101010, 转化为一维四进制编码为 001301120113222。计算改进型 GeoSOT 编码方式为:  $34^{\circ}15'/4^{\circ} = 8$  余  $2^{\circ}15'$ ,  $108^{\circ}56'/4^{\circ} = 27$  余  $56'$ , 位于改进型 GeoSOT 北纬向第 9 个、经向第 28 个  $4^{\circ} \times 4^{\circ}$  网格, 所以第 1 层级编码为 J27。 $2^{\circ}15'/1^{\circ} = 2$  余  $15'$ ,  $56'/1^{\circ} = 0$  余  $56'$ , 位于纬向第 3 个、经向第 1 个  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  网格, 所以第 2 层级编码为 8。 $15'/16' = 0$  余  $15'$ ,  $56'/16' = 3$  余  $8'$ , 位于纬向第 1 个、经向第 4 个  $16' \times 16'$  网格, 所以第 3 层级编码为 5。依此类推, 得到第 4 层级编码为 E, 第 5 层级编码为 A。故西安钟楼中心位于第 5 层级( $1' \times 1'$ ) 网格的改进型 GeoSOT 编码为 J2785EA。由于改进型 GeoSOT 的第 1 层级对应原 GeoSOT 第 7 层级, 将 J(对应北纬向第 9) 和 27 分别转化为 7 位二进制, 得到 0001001 和 0011011, 交叉得到 00000111001011, 后面跟上由 8、5、E、A 4 个十六进制数字分别转化成的 4 位二进制数字 1000、0101、1110、1010, 得到二进制编码为 0000011100101111000010111101010, 四进制编码为 001301120113222, 与前面计算得到的 GeoSOT 编码一致。可见, 两类编码可以方便地进行转化, 但改进型 GeoSOT 编码位数更短, 用于战场空域表征时更加简洁高效, 并且便于战场空域位置通报。

### 2.3 属性编码

战场空域是有一定高度或高度范围的, 除此之外还有空域的使用时间以及类型, 因此改进型 GeoSOT 属性编码应当包括高度编码、时间编码和类型编码。

1) 高度编码。高度编码用大写英文字母 H 加上 3 位数字表示, 数字的单位为百米。为了保持高度编码长度一致, 如果空域高度固定, 则重复编码。默认高度为标准大气压高度, 如表示真高则用 H 加下标表示。例如 H008H008 代表标压高 800 m, H080H110 代表标压高 8 000 m 到 11 000 m,

H<sub>真</sub>010H<sub>真</sub>020 代表真高 1 000 m 到 2 000 m。

2) 时间编码。由于作战行动的快速变化, 空域的时间编码默认省略年份(年份为当年), 如果跨年则加上年份。时间编码为一串 16 位的数字。如 06100800-06111400 代表该空域的使用期限为 2020 年 6 月 10 日 8:00 am 到 2020 年 6 月 11 日 2:00 pm。

3) 类型编码。在空域分类的基础上, 对空域类型编码。例如 01 代表联络点, 08 空中走廊、24 机场防空区、26 代表电子战空域、33 代表预警机空域、50 代表杀伤盒。具体的空域类型编码可参照有关分类标准。

改进型 GeoSOT 编码 = 地址码 + 属性码, 包含战场空域的地址(Where)、高度(Height)、使用时间(When)以及类型(What)信息, 构建了“3W+H”战场空域表征体系, 标准化的编码格式有利于计算机准确读取。

### 2.4 特性分析

1) 改进型 GeoSOT 是一套全球剖分的网格参考系统, 它是基于经纬度坐标体系发展而来的。军事人员所习惯使用的经纬度坐标可快速方便地转化为地址编码。

2) 改进型 GeoSOT 既能像美军的 GARS 一样作为面参考系统, 也具有类似 MGRS 的定位功能。可根据空域的不同类型以及表征精度的需要, 选择改进型 GeoSOT 不同的层级网格对空域进行表征与描述。

3) 改进型 GeoSOT 建立了一套以网格为单元的战场空域管理与计算框架。通过对空域进行网格化处理, 每个网格对应于一个编码。空域之间位置关系转化为网格之间的拓扑关系、方位关系, 空域之间基于经纬度坐标的复杂的距离计算简化为网格之间的加减乘除计算, 最终都归结为编码之间运算。

4) 改进型 GeoSOT 除了可以用于战场空域的表征外, 还可以对地面任何位置进行描述, 以该网格参考系统为标准生成地面、空中战场态势“一张图”, 在空地协同作战中有广阔的应用前景。

## 3 战场空域栅格化表征

从数据的存储、管理与索引的角度来看, 战场空域栅格化表征体系的构建应遵循以下 2 个原则:

1) 网格最少准则。空域表征所需的网格编码量, 直接决定所需的存储数据量。因此, 应使用尽可能少的剖分网格来表征空域。因为网格具有继承性, 可以用一组子网格聚合成父网格, 用父网格进行记录, 在保证不损失任何信息的前提下能有效地减

少网格数量。

2)精度对应原则。不同层级的网格对应不同的表征精度,在空域表征中,点状空域和面状空域所需的表征精度是不一样的。超出所需精度的表征会导致工作量激增且没有实际意义,所以需要根据空域所需精度确定最深的剖分层级,不再往下细分,将最深层的剖分层级作为基础编码层级。

### 3.1 点状空域表征

点状空域主要有以下几种:

1)联络点:在空中作战行动中,任务飞机与控制机构在此位置进行无线电联络的点。

2)搜索救援点:用于协助失联人员向救援部队提供位置所预先设定的基准点。

3)空中控制点:用于飞机导航、指挥控制和通信的点。

4)波赛点:用以向空中任务飞机通报目标方位、距离的参考点。

点状空域用改进型 GeoSOT 第 7 层级定位级网格表征。某点的经纬度坐标可转换为第 7 层级的编码,并迅速定位到相应的网格。点状空域在网格平台的表征如图 3 所示。

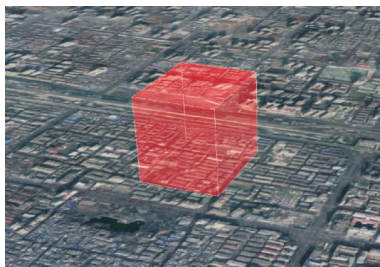


图 3 点状空域栅格化表征

### 3.2 线状空域表征

线状空域种类很多,例如用于陆空火力协同的火力支援协调线、战时进行敌我识别的敌我识别开关线、己方飞机进出战区的空中走廊等。线状空域表征为一串首尾相连的网格的集合,根据精度对应原则,在不同的表征精度下选择不同的剖分层级。线状空域的表征如图 4 所示。具体表征步骤如下:

**步骤 1** 选取某线状空域,假设它由 AB、BC、CD 3 段构成。

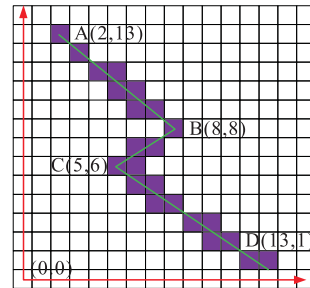
**步骤 2** 计算该线状空域的最小外包矩形 (minimum bounding rectangle, MBR) 和最小外包网格 (minimum bounding grid, MBG),以 MBG 的定位点为坐标原点,建立直角坐标系。将 MBG 剖分至指定层级,向东,向北为正向,依次用 01234... 等数字编码。

**步骤 3** 确定线状空域每个直线段端点的行列坐标,而端点之间网格的行列坐标集可由直线插值

计算得到。

**步骤 4** 得到线状空域各直线段的坐标集,并进行唯一性判断,去掉中间直线两端点重复的坐标,得到最终的行列坐标集。

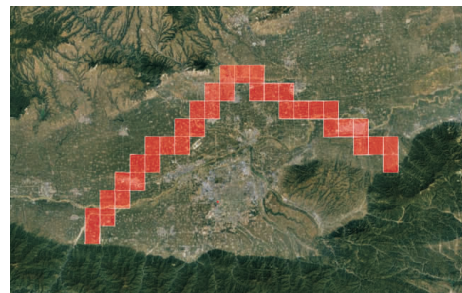
**步骤 5** 利用行列坐标与改进型 GeoSOT 编码之间的对应关系,得到线状空域的编码集。



(a) 线状空域表征原理



(b) 2 km 网格表征线状空域俯视图



(c) 8 km 网格表征线状空域俯视图

图 4 线状空域栅格化表征

在作战行动中,为了各方面协同通报的方便,可借鉴航线规划时只标注起始点、转弯点和终止点,然后将点与点之间连线构成航线的思路,向飞行员或任务部队只通报线状空域的起始点、转弯点、终止点所在网格的编码,大幅减少通报量。

### 3.3 区状空域表征

区状空域的边界可视为由连续且封闭的线状空域首尾连接而成,因此获取区状空域边界的行列坐标集的方法与线状空域形同,在 3.2 节中已有详细说明。区状空域的具体表征步骤如下:

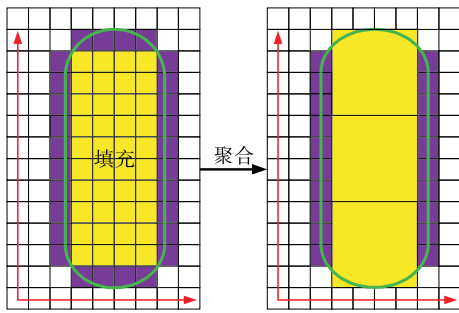
**步骤 1** 计算区状空域 MBR 和 MBG,根据表征精度需求,将 MBG 剖分至指定层级 N,并获取区状空域边界在第 N 层级的行列坐标集。

**步骤 2** 检查同一行网格的列号是否连续,如不连续,则进行填充。逐行进行检查,直到对区状空域填充完毕。得到区状空域的行列坐标集。

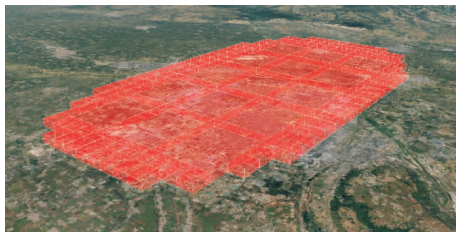
**步骤 3** 根据行列坐标与改进型 GeoSOT 编码的转换关系,将行列坐标转化为改进型 GeoSOT 编码。

**步骤 4** 根据网格最少原则,将属于同一个父网格的 16 个子网格聚合,用父网格编码表示,直至不能再聚合为止。然后记录聚合操作后的网格编码,得到区状空域的编码集。

标准的空中加油空域为一轨道形区状空域,以空中加油空域为例,区状空域的特征如图 5 所示。在图 5(a)左图中,绿色线为空域边界,紫色网格为空域边界的网格集,黄色网格为检查后得到的内部填充网格集,右图为聚合后的空中加油空域栅格化表征。



(a) 区状空域表征原理



(b) 区状空域表征侧视图

图 5 区状栅格化空域表征

### 4 实例分析

假设某次空对地打击敌地面目标作战行动中,各类型空域如图 6 所示,其中红色代表区状空域,绿色代表线状空域,黄色代表点状空域。根据改进型

GeoSOT 的剖分规则与编码规则,该作战区域共分为 25 个大小为 32 km×32 km 的第 3 层级网格。以杀伤盒为例,在敌地面目标所在的 H2348 网格区域建立杀伤盒,用于空中火力对其进行打击,杀伤盒高度从地面到标高 5 000 m,杀伤盒使用时间为 2020 年 6 月 10 日 6 时 20 分到 6 月 11 日 12 时整,杀伤盒的空域类型编码为 50。机场防空区所在的网格编码为 H2311,从该机场起飞的战机沿空中走廊到达杀伤盒执行对地打击任务。此外,还有执行对飞机进行指挥引导和预警探测任务的预警机空域,执行对地电磁干扰任务的电子战飞机集结空域,以及在空中走廊预设的、在此位置与预警机联络的联络点。

H2330	H2331	H2334	H2335	H2360
H231A	H231B	H231E	A 8 2 0 H231F	H234A
预警机空域	H2318	H231C		A 8 2 0 H231D
H2312	H2313	H2316	H2317	H2342
机场防空区	H2310	H2311	H231750E7 联络点	H2340
		H2314	H2315	空中走廊

图 6 战场空域栅格化表征

为提高战场空域表征的精度,对电子战飞机集结空域所在的 H231F 和 H231D 网格以及空中走廊经过的 H2314、H2315、H2317 网格进行下一级剖分,得到 8 km×8 km 的第 4 层级网格。不同层级网格的编码具有继承性,为表示方便只标出了第 4 层级网格的最后一位编码。在精度允许的情况下利用网格编码对战场空域进行表征,结果见表 3。

表 3 战场空域的编码集合

空域类型	地址编码	属性编码
联络点	H231750E7	H030H030-0610062006100621-01
机场防空区	H2311	H000H300-0101000012312400-24
预警机空域	{H2318, H231A, H2330}	H090H100-0610053006111220-33
杀伤盒	H2348	H000H050-0610062006111200-50
电子战空域	{H231E, H231C, H231E0, H231E2, H231E8, H231EA, H231C0, H231C2, H231C8, H231CA}	H050H055-0610053006111220-26
空中走廊	{H23142, H23143, H23146, H23147, H23152, H23159, H2315E, H23175, H23177, H2317D, H2317F}	H010H020-0610060006111220-08

从表 3 可以看出,空域的编码既包含空域的空间信息、时间信息以及类型信息,还具有全球唯一

性。因此,只要该战场空域在使用期限内,不论其它空域的信息如何变化,该战场空域的编码始终不变,

这有利于计算机依照编码对战场空域进行检索。通过比对所表征空域的网格编码集合有无交集,可为后续的基于网格编码的战场空域冲突检测与消解奠定基础。

表 3 中的各类战场空域的代表征结果可以根据实际情况以及需要的表征精度,进行粗细不等的编码。由于改进型 GeoSOT 网格具有多尺度的特性,可以对战场空域继续剖分,因此总可以找到一组层级不同,尺度不一的网格只包含目标空域,对这组网格进行编码,即可得到高精度的战场空域信息,满足战场空域管控的需要。

空域的使用很大程度上依赖空域控制指令 (airspace control order, ACO) 的发布。首先, ACO 有一定的生成周期,由于 ACO 为部分任务 (如空中加油、空投着陆和战斗空中巡逻等) 通常都指定了一大块空域供其使用,一旦空域分配后,空域会一致保持直到任务结束,而有些空域 (如空中走廊、航路航线等) 只需要短期使用,因此此类空域在利用后无法及时释放、利用率低;其次,由于战场空域栅格化表征具有任务和时间属性,在实际战场运行过程中会出现临时任务调整和协同关系改变,空域管理人员需要快速进行空域调整来满足新的空域请求,可能导致与 ACO 中发布的空域产生冲突。

为了解决空域的低效利用以及任务临时变化带来的空域冲突这两个问题,提出空域复用的概念。所谓空域复用是指空域栅格化为网格集合之后,将网格类型细分为已使用、已占用和未使用网格 3 种,提高空域使用的精度和利用率,在面对临时任务调整时进行辅助决策和冲突消解。

空域复用主要关注新的任务请求所需要的响应时间。任务临时变化导致的空域请求若与其他空域产生冲突,此时如果对所有冲突空域都进行调整,会使得空域调整量过大,且调整之后会影响其他任务的执行,造成“牵一发而动全身”的影响。故临时的空域调整需要空域管控人员临时实施,而不能像空域规划阶段有足够的时间来对所有的空域请求进行冲突检测与消解。

空域复用如图 7 所示,对于因任务临时变更所提出的空域请求需要一个更快速、更紧密的处理环节,因为新请求是有时间限制的。空域栅格化后,空域内的飞机当前位置对应的网格标记为“已占用”,已飞过的网格标记为“已使用”,在一定时间内不会被使用的网格标记为“未使用”。在任务调整和协同关系改变后,未使用网格所在的空域交给空域管理部门,空域管控人员对当前没有利用的并且可以临时为其他任务开放的空域进行调配。在图 7

中,空域管控人员指挥空域外的飞机直接穿过该空域而不是绕过空域,以实现快速实时的冲突消解,避免调整过多的空域而造成管理上的混乱和影响其他任务的完成,同时能够对有限的空域资源进行更加高效地利用。

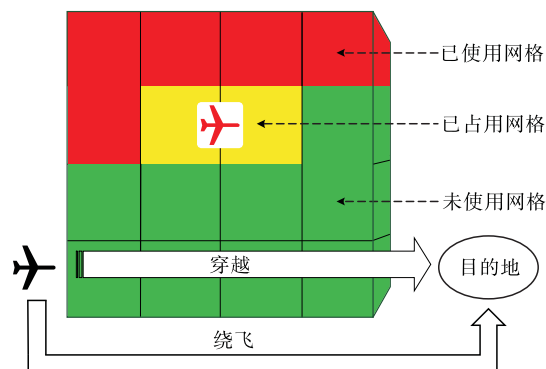


图 7 空域复用

## 5 结语

本文在 GeoSOT 网格基础上,结合战场空域表征实际,设计了改进型 GeoSOT 的剖分方案与编码结构,达到减少剖分层级以及编码长度的目的。并详细给出了点状、线状、区状空域的栅格化表征流程,该表征体系将有利于战场空域信息的有序管理。由于每个网格对应唯一的编码,空域之间的位置关系、距离关系就变成了网格之间拓扑关系、方位关系、以及距离关系的计算,最终归结为编码之间的运算,这为应对大规模空域冲突检测与消解,提供了一种新的技术手段和实践思路。因此,如何在战场空域栅格化表征的基础上实现空域冲突的快速检测与消解,是下一步工作的重点。

## 参考文献

- [1] 杨任农,沈堤,戴江斌. 对联合作战空战场管控问题的思考[J]. 指挥信息系统与技术, 2019, 10(1): 1-6.
- [2] 万路军,戴江斌,周磊,等. 全球空间网格参考系统框架及其在空域管控上的应用设想[C]// 第一届空中交通管理系统技术学术年会论文集. 北京: 电子工业出版社, 2018: 30-36.
- [3] 申卯兴,许进,谢树龙,等. 基于地理网格和灰色关联的目标数据融合[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2006, 7(4): 43-46.
- [4] 陈靖,张水平,石琢栋,等. GSI 的信息栅格授权服务策略[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2009, 10(2): 71-75.
- [5] 王莉,兀伟,邓国庆,等. 地球空间网格编码技术分析[J]. 测绘通报, 2020(10): 131-134, 147.
- [6] LV X F, CHENG C Q, GONG J Y, et al. Review of

- Data Storage and Management Technologies for Massive Remote Sensing Data[J]. Science China (Technological Sciences), 2011, 54(12): 3220-3232.
- [7] 赵学胜, 贲进, 孙文彬, 等. 地球剖分格网研究进展综述[J]. 测绘学报, 2016, 45(S1): 1-14.
- [8] 程承旗, 任伏虎, 濮国梁, 等. 空间信息剖分组织导论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [9] 童晓冲, 贲进. 空间信息剖分组织的全球离散格网理论与方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2016.
- [10] US DoD. Joint Publication 2-03: Geospatial Intelligence in Joint Operations [EB/OL]. (2012-10-31) [2020-12-20]. [http://edocs.nps.edu/2012/December/joint%20pub%202\\_03.pdf](http://edocs.nps.edu/2012/December/joint%20pub%202_03.pdf).
- [11] USA Joint Staff. Joint Publication 3-52: Joint Air Control[M]. Washington DC: USA Joint Staff, 2014.
- [12] 中央军委装备发展部. 地球表面空间网格与编码: GJB 8896-2017[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2017.
- [13] 程承旗, 吴飞龙, 王嵘, 等. 地球空间参考网格系统建设初探[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(6): 1041-1049.
- [14] CHENG C Q, TONG X C, CHEN B, et al. A Subdivision Method to Unify the Existing Latitude and Longitude Grids[J]. International Journal of Geo-Information, 2016, 5(9): 161-184.
- [15] QIAN C Y, YI C, CHENG C Q, et al. Geo SOT-based Spatiotemporal Index of Massive Trajectory Data [J]. International Journal of Geo-Information, 2019, 8(6): 284-296.
- [16] LI S, PU G L, CHENG C Q, et al. Method for Managing and Querying Geo-spatial Data Using a Grid-code-Array Spatial Index[J]. Earth Science Informatics, 2019, 12(2): 173-181.
- [17] 魏子卿. 2000 中国大地坐标系及其与 WGS84 的比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2008(5): 1-5.
- [18] LI S, CHENG C Q, CHEN B, et al. Integration and Management of Massive Remote-sensing Data Based on GeoSOT Subdivision Model [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2016, 10(3): 034003.
- [19] 国务院中央军委空中交通管制委员会. 中华人民共和国飞行基本规则[M]. 北京: 中国民航出版社, 2007.
- [20] 国务院中央军委空中交通管制委员会. 飞行间隔规定 [M]. 北京: 中国民航出版社, 2003.

(编辑:徐楠楠)