

2-16-2023

A Simulation Method of Airborne Radar Real-time Detection Based on Three-dimensional Subdivision

Ying Xu

War Research Institute, Academy of Military Science, Beijing 100091, China; xuying92@126.com

Shuai Zhang

War Research Institute, Academy of Military Science, Beijing 100091, China; zhangshuai9999@outlook.com

Zhige Xie

War Research Institute, Academy of Military Science, Beijing 100091, China;

Xinhai Xu

War Research Institute, Academy of Military Science, Beijing 100091, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

A Simulation Method of Airborne Radar Real-time Detection Based on Three-dimensional Subdivision

Abstract

Abstract: The emergence and rapid development of UAVs make the target detection of UAV airborne radar in combat simulation great research valuable. In the existing combat simulation platforms at home and abroad, the detection relationship between radar and target is pairwise interactive, and the calculation overhead increases linearly or ultra-linear following the increase of entity numbers, which is difficult to carry out the large-scale real-time combat simulation. *Based on the concept of three-dimensional meshing, an airborne radar target detection simulation method is proposed, which can quickly judge the success or failure of detection by making a detection template before simulation to query the template and carry out brief calculation in the simulation.* The method effectively reduces the calculation cost of detection and provides a strong support for large-scale real-time combat simulation.

Keywords

combat simulation, airborne radar, target detection, three-dimensional divided meshes

Authors

Ying Xu, Shuai Zhang, Zhige Xie, Xinhai Xu, Manhui Sun, and Ning Guo

Recommended Citation

Ying Xu, Shuai Zhang, Zhige Xie, Xinhai Xu, Manhui Sun, Ning Guo. A Simulation Method of Airborne Radar Real-time Detection Based on Three-dimensional Subdivision[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(2): 268-276.

基于三维剖分的机载雷达实时探测仿真方法

徐颖, 张帅*, 谢智歌, 徐新海, 孙曼晖, 郭宁

(军事科学院 战争研究院, 北京 100091)

摘要: 无人机的出现及迅猛发展, 使得作战仿真中无人机机载雷达的目标探测问题具备较大的研究价值。国内外已有的作战仿真平台中, 雷达与目标间探测关系的计算是两两交互式的, 计算开销随实体数量呈线性或超线性增长, 难以应对大规模实时作战仿真场景。基于三维剖分网格的理念, 提出一种机载雷达目标探测仿真方法, 通过在仿真前制作探测模板, 仿真中查询模板及简要计算, 可迅速判断探测成败。该方法有效降低了探测的计算量, 为大规模实时作战仿真提供了有力支撑。

关键词: 作战仿真; 机载雷达; 目标探测; 三维剖分网格

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)02-0268-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0976

引用格式: 徐颖, 张帅, 谢智歌, 等. 基于三维剖分的机载雷达实时探测仿真方法[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(2): 268-276.

Reference format: Xu Ying, Zhang Shuai, Xie Zhige, et al. A Simulation Method of Airborne Radar Real-time Detection Based on Three-dimensional Subdivision[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(2): 268-276.

A Simulation Method of Airborne Radar Real-time Detection Based on Three-dimensional Subdivision

Xu Ying, Zhang Shuai*, Xie Zhige, Xu Xinhai, Sun Manhui, Guo Ning

(War Research Institute, Academy of Military Science, Beijing 100091, China)

Abstract: The emergence and rapid development of UAVs make the target detection of UAV airborne radar in combat simulation great research valuable. In the existing combat simulation platforms at home and abroad, the detection relationship between radar and target is pairwise interactive, and the calculation overhead increases linearly or ultra-linear following the increase of entity numbers, which is difficult to carry out the large-scale real-time combat simulation. Based on the concept of three-dimensional meshing, an airborne radar target detection simulation method is proposed, which can quickly judge the success or failure of detection by making a detection template before simulation to query the template and carry out brief calculation in the simulation. The method effectively reduces the calculation cost of detection and provides a strong support for large-scale real-time combat simulation.

Keywords: combat simulation; airborne radar; target detection; three-dimensional divided meshes

0 引言

评估作战理论的效能, 最直接和真切的方式是外场试验或实战演练, 但其存在成本高、耗时

长、保密性差、易受环境制约等诸多问题, 因此, 投资少、效率高、技术好的计算机仿真技术成为更广泛的评估方式。

本文聚焦体系对抗作战中的机载雷达目标探

收稿日期: 2021-09-18

修回日期: 2021-11-29

第一作者: 徐颖(1992-), 女, 助理研究员, 博士, 研究方向为时空数据组织与分析。E-mail: xuying92@126.com

通讯作者: 张帅(1986-), 男, 助理研究员, 博士, 研究方向为作战仿真。E-mail: zhangshuai9999@outlook.com

测, 一方面是因为能否获取制电磁权已成为决定战争胜败的关键因素之一, 而雷达是敌我双方争夺制电磁权的焦点; 另一方面是因为无人机技术的迅速发展, 大规模无人机机载雷达投入战争, 已成为未来战争的大势所趋。

在以往的雷达仿真工作中, 主要分为信号级仿真和功能级仿真2种^[1]。信号级仿真的特点是参数多、流程长、仿真粒度细, 主要用于面向实际雷达装备的仿真。功能级仿真只考虑功能层面的模拟, 仿真粒度粗, 能够运用于实时作战仿真平台。本文面向的是体系作战仿真平台上的雷达探测, 需要满足实时仿真的要求, 所以采用的是功能级仿真。

在作战仿真平台方面, 国内外已有不少研究, 如CMANO(command: modern air/naval operations-wargame)^[2]、JTLS(joint theater level simulation)^[3]、JWARS(joint warfare system)^[4]、兵棋系统^[5]、XSIM(xsim studio)平台^[6]、墨子^[7]等。其中, JTLS、JWARS和兵棋系统均采用平面网格进行雷达探测仿真, 难以表征雷达探测范围的三维特征; 而CMANO、XSIM、墨子中的雷达探测均基于两两交互关系实现, 在每个仿真时间步, m 个雷达与 n 次目标要进行 $m \times n$ 次探测运算, 扩展性较差, 难以完成大规模作战场景下仿真的实时计算。

本文提出一种基于三维剖分网格、面向大规模作战的机载雷达目标探测的仿真方法, 使其不仅能描述三维特征, 让仿真更加真实, 而且能够做到足够高效, 为仿真时间步在几十毫秒量级的实时探测提供有效支撑。本文中考虑的雷达均为机扫雷达。

1 基于三维剖分网格的机载雷达目标探测仿真方法

三维剖分网格, 是将地球及其表面的邻近空间剖分成体积和形状相似、既无缝隙也不重叠的

多层次离散网格。所有网格形成空间的层次性递归划分以及剖分网格在地球空间中的多尺度嵌套关系^[8]。本文中, 用三维剖分网格的集合表示雷达的探测波束的范围空间, 相当于将该空间离散化, 便于探测仿真的计算。

本文采用的是北大程承旗团队提出的GeoSOT(geographical coordinate global subdivision based on one-dimension-integer and two to n^{th} power)-3D网格划分体系^[9]。为了使得剖分网格大小为二进制整型, GeoSOT-3D将地球空间扩展为 $512^\circ \times 512^\circ \times 512^\circ$, 将 1° 扩展成 $64'$, $1'$ 扩展成 $64''$, 实现整度、整分、整秒的八叉树剖分。GeoSOT-3D剖分网格分为32级, 0级对应 $512^\circ \times 512^\circ \times 512^\circ$ 的最大方格, 随着层级加深, 空间不断被均分成8份, 如图1所示, 直到32级网格边长为 $1/2048''$ (1.5 cm)。

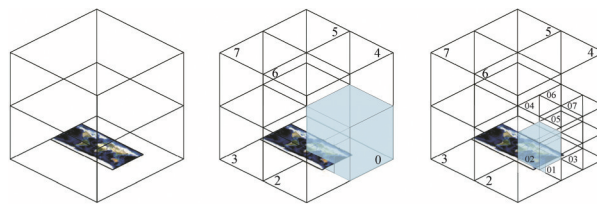


图1 GeoSOT-3D网格多级剖分
Fig. 1 Multi-level subdivision of GeoSOT-3D

本文提出的机载雷达目标探测仿真方法, 其流程如图2所示。分为仿真前、仿真中两大部分。

仿真前的主要工作是制作探测模板, 如图2中第一个灰底方块所示。探测模板是实现快速仿真计算的重要基础。每个探测模板, 是在给定雷达初始中心位置、俯仰角和方位角后, 雷达探测范围内探测数据记录的集合。每条探测数据记录是一个网格的相关数据, 包括该网格编码、雷达ID、该网格内雷达探测目标时, 波束照射目标表面的反射截面积(radar cross-section, RCS)最大值 RCS_{max} , 如表1所示。

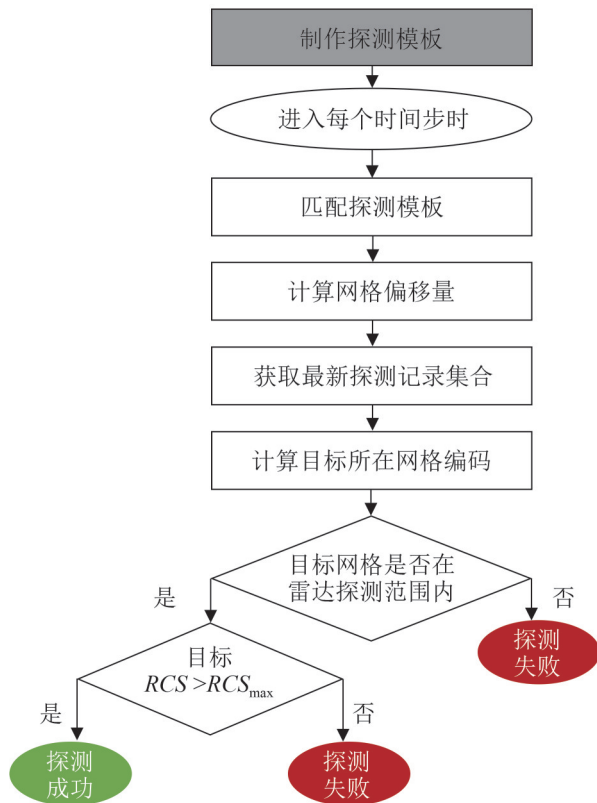


图 2 机载雷达探测流程

Fig. 2 Airborne radar detection flow chart

表 1 预先存放在存储空间中的数据记录
Table 1 Data records pre-stored in storage space

网格编码	雷达 ID	RCS_{max}
100000	R01	53.2
	R02	54.3
100001	R02	25.6
...		

仿真中的每个时间步里，探测的具体操作步骤如图 2 中灰色格子之后的格子所示。

step 1: 根据机载雷达当前的俯仰角和方位角，匹配事先制作好的某个模板；

step 2: 计算雷达当前中心所在网格与模板的中心网格间的网格偏移量 CO_{cc} ；

step 3: 根据 CO_{cc} 计算雷达当前探测范围内的所有网格编码，获取最新探测数据记录集合；

step 4: 计算所有探测目标所在的网格编码；

step 5: 根据网格编码，判断目标所在网格是否在雷达探测范围内，如果不在，说明目标未被

雷达探测到，如果在，取出对应数据记录中的 RCS_{max} 与目标的 RCS 比较，如果后者数值较大，则表明探测成功，否则探测失败。

上述过程的实现，需要 3 个关键技术做支撑：

(1) 网格编码及偏移量计算技术。网格编码的计算，主要是指将网格最小角点(也可取网格的其他点，本文取最小角点)的三维经纬高坐标，转换成一维网格编码。网格偏移量的计算，是指任意 2 个网格在 3 个维度上相差格子数的计算。

(2) 雷达探测模板制作技术。

(3) 最新探测记录获取技术。机载雷达的探测区域时时在变，需要根据预设模板和偏移量 CO_{cc} 获取最新的区域内网格编码集合及网格内的 RCS_{max} 。由于会涉及到大量的数据写入，容易成为探测过程中的性能瓶颈。

2 网格编码及偏移量计算技术

2.1 三维剖分网格编码计算

本文未采用 GeoSOT-3D 的网格编码方式，而是提出局部编码。相较于 GeoSOT-3D 为每个网格提供全球唯一编码，局部编码为小范围局部空间内的网格提供较短编码，能显著减少编码的存储空间，并提高计算效率。

局部编码的计算方式如下：

(1) 找到局部空间的最小角点，如图 3 所示的 $(10^{\circ}0'00'', 10^{\circ}0'00'', 10^{\circ}0'00'')$ 。

(2) 定下该空间内使用的 GeoSOT-3D 网格层级，如 16 级(网格边长为 1 km)。

(3) 计算单维基数 β 。即局部空间内，经纬高 3 个维度上，最多需要用几个十进制位表示，进而得到其基数。如图 3 所示，3 个维度的网格数均在百位，需要用 3 个十进制位表示，那么 β 定为 1 000。

(4) 计算网格在 3 个维度上相对于局部空间最小角点的顺序编号，如图 3 中，坐标点 $(10^{\circ}22'33'', 12^{\circ}23'34'', 10^{\circ}44'8'')$ 所在网格，在经纬高三个方

向上相对于最小角点的编号为45、287、88。

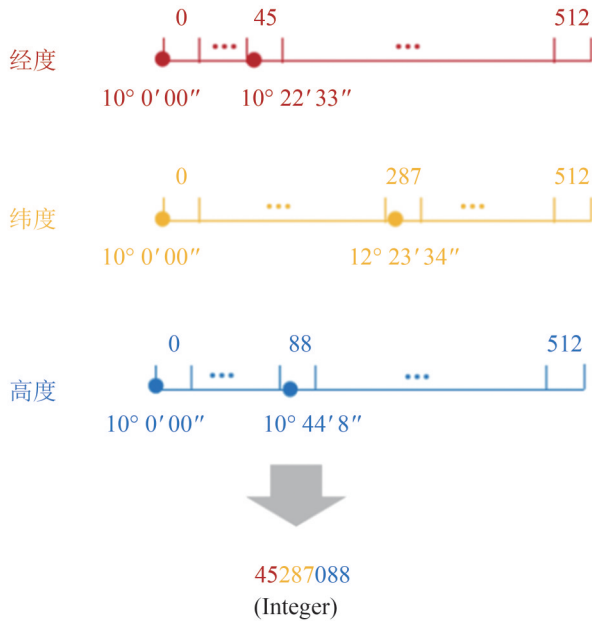


图3 局部编码方式

Fig. 3 Local encoding method

(5) 将3个维度的编号直接按经纬高的顺序拼接起来即可得到。由于 $\beta=1\ 000$ ，每个维度的编号数字需在头部补充为3个十进制位(经度除外)。因此得到局部编码为45287088。

上述坐标点所在网格 GeoSOT-3D 一维十进制网格编码为“0000072501617626”，以 Python 语言为例，使用字符串表示，占用 68 字节；局部编码为 45287088，使用整型表示，占用 28 字节，存储数据量减少 58.82%，这能显著加速机载雷达目标探测过程中的数据存储、数据查询等操作。

2.2 网格偏移量计算

网格偏移量是指不同位置的 2 个网格之间，在经度、纬度、高度方向上，分别相差几个网格。网格偏移量会被频繁用在机载雷达的目标探测仿真过程中。

网格偏移量具有方向性。如网格 A 的局部编码是 123123123，说明其在经度、纬度、高度方向上均是第 123 个格子；网格 B 的局部编码为

120133145，说明其在经度方向上是第 120 个格子，在纬度方向上是第 133 个格子，在高度方向上是第 145 个格子，那么 A、B 的网格偏移量 $CO_{AB}=\{-3, 10, 22\}$ 。

设网格 A 的局部编码为 C_A ，网格 B 的局部编码为 C_B ，则 A、B 的网格偏移量为

$$CO_{AB}=\{O_{lon}, O_{lat}, O_{alt}\} \quad (1)$$

$$O_{lon}=\left(\frac{C_B}{\beta^2}\right)-\left(\frac{C_A}{\beta^2}\right) \quad (2)$$

$$O_{lat}=\left(\frac{C_B}{\beta}\% \beta\right)-\left(\frac{C_A}{\beta}\% \beta\right) \quad (3)$$

$$O_{alt}=(C_B \% \beta^2)-(C_A \% \beta^2) \quad (4)$$

式中： β 为网格局部编码的单维基数； O_{lon} 、 O_{lat} 和 O_{alt} 分别为经、纬、高维度上的偏移量。

3 雷达探测模板制作技术

预设雷达探测模板是基于三维剖分网格的雷达探测仿真中最重要的技术之一。它能极大简化仿真过程中每个时间步的探测计算过程，从而为实时仿真甚至超实时仿真提供坚实的保障。

假设雷达的扫描周期(即雷达波束扫描一圈所需的时间)为 T ，仿真的每个时间步时长为 τ ，设置 τ 可整除 T ，则一个扫描周期共有 $\alpha=T/\tau$ 个时间步。每个时间步内的扫描区域，由三维剖分网格集合近似表示，图4为扫描区域由网格表示的二维简化版。为每个时间步制作一个模板，该模板实际为一个数据表，表1中的记录就表示该时间步的扫描区域内的一个网格的相关数据，即网格编码、雷达ID、网格内探测威力最大值。

探测威力最大值如式(5)所示，它由雷达方程^[10]演化而来。

$$RCS_{\max}=4\pi R^2 \lim_{R \rightarrow \infty} \left(\frac{P_{Dr}}{P_r}\right) \quad (5)$$

式中： R 为雷达位置到网格的最大距离； P_r 为雷达接收天线的截获功率； P_{Dr} 为接收天线的散射波功率密度。

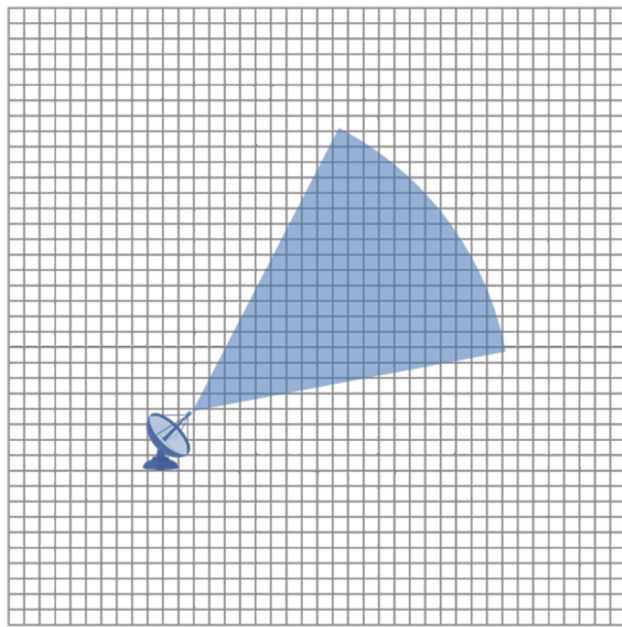


图 4 雷达探测范围二维简化
Fig. 4 Two-dimensional simplified schematic diagram of radar detection range

对于静态雷达，位置固定、扫描角度固定，因此只需制作 α 个模板；而对于机载雷达，在飞行过程中的俯仰角和方位角可能实时在变，所以需要制作角度会有重叠的多个模板，其模板数是 α 的数倍，如图 5 所示。

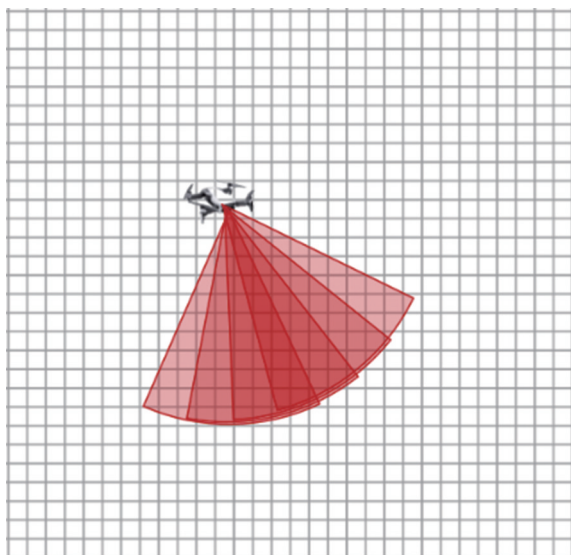


图 5 动态雷达的多个重叠探测模板二维示意图
Fig. 5 Two-dimensional simplified schematic diagram of airborne radar overlapped detect templates

模板制作好后，在仿真过程中，静态雷达通过当前扫描角度获取当前时间步的预设模板，判断目标所在网格是否在模板的网格集合内，如果在，则进一步判断目标的 RCS 是否大于该网格的 RCS_{max} ；否则探测失败。如果 RCS 大于该网格的 RCS_{max} ，表明该静态雷达成功探测了该目标，否则探测失败。

预设模板的方式，可以从至少 2 个方面降低计算量：①从雷达方程等的计算操作简化成了查询操作；②表 1 中的数据记录，每个网格编码对应的雷达数量是不同的，只有探测范围覆盖到该网格的雷达，才会拥有一条数据记录，因此， m 个雷达、 n 个目标从原来的两两交互计算的 $m \times n$ 次计算，变成了最坏情况时才有 $m \times n$ 次计算，最好情况时只有 $m + n$ 次计算。

4 最新探测记录获取技术

本节将会介绍 3 种不同的获取策略，分别是先擦后写(erase before write, EBW)、标记中心并只更新移动的(mark center and update only the moved, MCUOM)、时空反向偏移(temporal spatial reverse offsetting, TSRO)。EBW 是最基础且直观的，MCUOM 是基于 EBW 的改进，TSRO 则是基于一种全新的理念，使其能够获得 3 种策略中的最佳性能。

所有的更新策略，都基于一个假设——偏移近似。对于一个机载雷达，它的探测范围内的网格集合，可以根据模板整体平移而得。当机载雷达的中心位置已经偏离模板的中心位置后，首先可以根据其俯仰角和方位角，对应到一个预设的探测模板；然后，该模板内的所有网格的编码，加上 CO_{CC} ，得到与模板中网格数量相同的新的网格集合，这个新的网格集合，即可作为机载雷达的最新探测范围网格集合，如图 6 所示。而新的网格内的 RCS_{max} ，即为偏移前对应模板网格内的 RCS_{max} ，这样就得到了最新的探测记录集合。

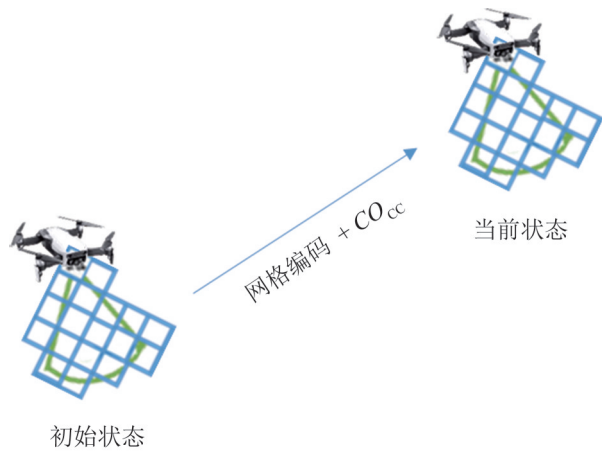


图 6 偏移近似

Fig. 6 Offsetting approximation

基于偏移近似的假设, 可以根据预设模板快速获取最新探测范围的网格集合, 虽然会损失部分精度, 但网格尺寸越小时精度越高, 因此, 可以通过精度与计算效率的折中, 得到满足一定精度范围的最佳网格尺寸。

4.1 EBW 策略

EBW 是指先擦除后写入, 并且擦除结束后才能开始写入。假设雷达 R 在上一时间步的记录集合为 S_R , EBW 的做法是, 在每个时间步:

(1) 擦: 对每个机载雷达 R , 先将 R 的 S_R 中所有记录的 RCS_{max} 值写为 ∞ 。将 S_R 中编码对应的数据记录中的 RCS_{max} 值重写, 而非直接删除。这是因为删除一条数据记录的时间开销, 要高于修改内部一个值的时间开销。

(2) 写: 遍历 S_R 中的网格编码, 每个编码加上 CO_{cc} 得到新的编码, 将记录“新编码—雷达 ID—旧编码对应 RCS_{max} 值”写入存储空间中。如果得到的新编码, 在数据大表中已有对应记录了, 那么, 只需修改其对应的 RCS_{max} 值, 否则, 需要新增一整条记录。

假设 S_R 中有 N 个网格编码, 那么, 在一个时间步里, 一个雷达需要更新的记录条数为 $2N$, 那么 m 个雷达需要更新 $2mN$ 条记录。单个时间步的更新时间开销将会随 m 和 N 的规模线性甚至超线

性增长, 不适合扩展到大规模的场景, 应用非常受限。

4.2 MCUOM 策略

根据上一小节的结论, 想要降低每个时间步的更新开销 $2mN$, 可以减小 m 或 N 的值。减小 m 的值意味着减少需要更新的雷达数量; 减小 N 的值意味着减少单个雷达需要更新的网格数量。

MCUOM 是指“标记中心并只更新移动的”, 其中, “标记中心”对应着减小 N 值的方法, “只更新移动的”对应着减小 m 值的方法。

“只更新移动的”, 即在每个时间步的擦除 S_R 内 RCS_{max} 值前, 先对每个机载雷达做 2 层判断:

(1) 该雷达当前中心位置所在的网格, 是否与上一个时间步相同?

(2) 该雷达当前对应的模板, 是否与上一时间步相同?

如果这 2 个判断的结果都为“是”, 那么, 当前时间步该雷达的 S_R 无需擦除 RCS_{max} ; 如果有一个“否”, 则需擦除 S_R 。在网格尺寸较大或飞机速度较慢的情况下, 该方法能显著减少需要更新的网格数量。

“标记中心”的主要思想是在表 1 所示的表格中, 增加一个新列——雷达中心网格编码, 如表 2 所示。于是, 在更新时无需对旧网格记录里的 RCS_{max} 写“ ∞ ”, 只需写新网格对应的记录, 这样能将需更新的记录量减半。而在之后的判断目标编码是否在雷达探测范围内时, 会多加一个判断: 记录中的雷达中心网格编码是否和雷达当前中心网格编码相同? 如果相同, 则该记录有效, 否则无效。

通过 MCUOM 策略, 能将每个时间步的更新记录数量, 减至 mN 以下, 即至少减少了 50% 的更新开销。但是, 在雷达数量较多, 网格数量较多的情况下, 该策略可能仍然无法保证更新在一个时间步内完成。因此, 需要一个更彻底的方法, 解决更新问题。

表 2 带雷达中心网格编码的数据记录
Table 2 Data record with radar center mesh code

网格编码	雷达 ID	RCS_{max}	雷达中心网格编码
100000	R01	53.2	15678
	R02	54.3	15677
100001	R02	25.6	18765
...			

4.3 TSRO 策略

该策略能够彻底消除更新操作，使得每个时间步需要更新的记录数为 0。

该策略的创新之处在于，从目标的视角来看待更新问题。在当前时间步算出 CO_{CC} ，及取得对应的初始模板后，用目标的网格编码 C_{target} ，减去 CO_{CC} ，得到 C'_{target} ，即图 6 中箭头的反向操作，然后直接判断 C'_{target} 是否在初始模板中，如果在，则取出对应的 RCS_{max} 值做判断是否探测成功；反之，说明目标不在雷达探测范围内，探测失败。

实际上，这是将当前时间步中目标与雷达的连线，整体平移到仿真前的初始状态。平移前后，目标与雷达的相对位置没有改变，因此完全可以用 C'_{target} 与初始模板做判断。

5 实验结果分析

利用本文方法，开展雷达探测的仿真实验，从而评估本文中使用的 3 种更新策略的性能。实验中的参数设置如表 3 所示。

表 3 实验参数
Table 3 Experiment parameters

参数	取值
局部世界大小/km	长、宽、高均为 1 048.576
网格边长/km	2.048
探测距离/km	160
探测模板俯仰角度/(°)	30
探测模板方位角度/(°)	60
探测模板网格数量	649 796
雷达数量	18
目标数量	16
时间步长 τ /ms	50

当前的仿真实验，是在图 7 所示局部世界而非全球的全局世界中开展的。该局部世界中，共设 18 架机载雷达，在仿真开始后，逐步打开雷达开关，至第 35 个时间步时，开启第 7 架雷达。由于做的是前 50 个时间步的测试，因此最多开启了 7 架雷达。实验中，假设所有雷达的型号相同，因此它们的最大探测距离、单个时间步内的波束角度均相同。描述雷达探测范围的网格，使用的是尺寸为 2 km 左右的网格，所制作的单个时间步的扫描波束包含的网格数量为 649 796 个。



图 7 仿真环境

Fig. 7 Simulation environment

该仿真实验中，7 架雷达的飞行轨迹各不相同，轨迹数据取自如图 7 所示的仿真环境中。后文的实验中，是从 50 个时间步中取出较有代表性的 5 个(Tick 8、Tick 11、Tick 20、Tick 35、Tick 37)，观察实验结果。

5.1 需更新的网格数量对比

在这 5 个被选出的时间步中，3 种策略分别需要的更新的记录数量如表 4 所示。由该表可以看出，每个时间步，MCUOM 的需更新记录数量不到 EBW 的 20%；而平均更新量，MCUOM 只有 EBW 的 5.74%，更新开销减小 94.26%。而 TSRO 直接将更新开销降为 0。这说明 MCUOM 与 TSRO 对记录更新的效果非常显著。

5.2 目标探测性能对比

表 5 与图 8 显示的是 5 个代表性时间步中，雷

达探测范围更新及做目标探测的时间开销。由于数值差距较大, 在图中y轴使用的是对数刻度。

表4 5个时间步中各策略需要更新的记录数
Table 4 Number of records that each strategy needs to update in 5 time steps

时间步	开启雷达数	EBW	MCUOM	TSRO
Tick 8	4	5 198 368	649 796 (12.5%)	0
Tick 11	5	6 497 960	649 796 (10.0%)	0
Tick 20	6	7 797 552	1 299 592 (16.7%)	0
Tick 35	7	9 097 144	1 299 592 (14.3%)	0
Tick 37	7	9 097 144	0 (0%)	0
平均值	5.4	7 017 796.80	402 873.52 (5.74%)	0

注: 百分比是MCUOM更新的记录数占EBW更新记录数的比例。

表5 5个时间步中各策略更新及探测耗时
Table 5 Time-consuming that each strategy needs to update and detect in 5 time steps μs

时间步	EBW	MCUOM	TSRO
Tick 8	1 021 565	135 860	96
Tick 11	1 902 071	96 073	79
Tick 20	2 386 971	299 226	125
Tick 35	2 544 291	464 859	113
Tick 37	2 521 236	32	164

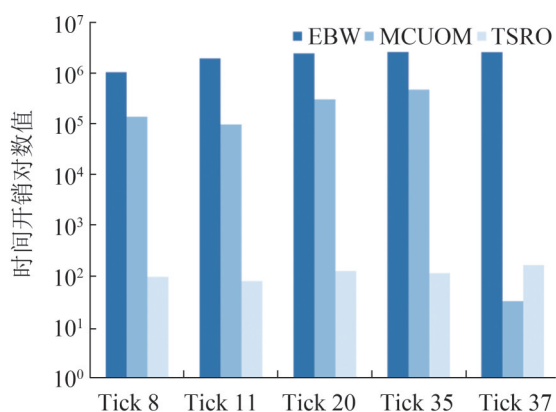


图8 3种策略的时间开销对比
Fig. 8 Comparison chart of time cost of 3 strategies

从表5与图8可以看出, EBW的时间开销, 比MCUOM高出约1个数量级, 而MCUOM的时

间开销, 比TSRO高出约3个数量级。由此可见, 更新的耗时, 远高于探测的耗时, 因此更新极易成为机载雷达做目标探测仿真的性能瓶颈。

图8中的最后一组柱形中, MCUOM的耗时竟比TSRO少, 这是因为在Tick 37时, MCUOM所需更新的记录数, 和TSRO一样都为0, 因此都只有探测的开销。而TSRO在探测中, 需要计算目标的时空反向偏移网格编码, 因此开销比MCUOM要大。即便如此, TSRO的开销始终未高于200 μs , 完全可以支撑时间步长 $\tau=50\text{ms}$ 的实时仿真。

6 结论

本文提出一种面向三维作战仿真场景的机载雷达目标探测的仿真方法。方法基于三维剖分网格, 通过网格将雷达探测范围内的威力值离散化, 并在仿真开始前, 制作基于网格的探测模板, 该模板在仿真过程中极大发挥了简化计算的作用。由模板带来的探测记录更新问题, 通过提出的更新策略而有效避开了性能瓶颈。实验结果表明, 使用本文的仿真方法能将探测全过程的耗时降到1ms以内, 能够支撑大规模对抗作战实时仿真。

使用探测模板简化仿真中的计算, 为作战仿真中雷达高效探测提供了一种可行的思路。但是, 如何获取雷达探测范围更精准的网格表达, 如何计算每个网格内的更精确的威力值, 如何考虑噪音、欺骗等干扰的影响等, 都是未来亟待解决的问题, 需要进一步深入思考与探索。

参考文献:

- [1] 王国玉. 雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
Wang Guoyu. Mathematical Simulation and Evaluation of Radar Electronic Warfare System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.
- [2] Matrix Games. Command: Modern Air/Naval Operations-Wargame of the Year Edition[EB/OL]. (2019-03-16) [2021-03-30]. <https://www.matrixgames.com/game/command-modern-air-naval-operations-wargame-of-the-year-edition>.
- [3] Bowers A, Prochnow D L. Multi-Resolution Modeling in

- the JTLS-JCATS Federation[C]//IEEE Fall Simulation Interoperability. Washington: IEEE CS Press, 2003.
- [4] Maxwell D T. An Overview of the Joint Warfare System (jwars)[J/OL]. Phalanx(S0195-1920), [2021-03-30]. http://www.srv1tmp.mitre.org/work/tech_papers/tech_papers_00/maxwell_jwars/maxwell_jwars.pdf.
- [5] 吴大愚, 柳少军. 基于多分辨率网格的兵棋对空探测算法研究[J]. 装备学院学报, 2016, 27(3): 90-95.
Wu Dayu, Liu Shaojun. Research on Air Target Detection Algorithm of Wargame Based on Multi-resolution Grid [J]. Journal of Equipment Academy, 2016, 27(3): 90-95.
- [6] 阮开智, 袁晴晴, 翟文华, 等. 基于 Xsim 平台的防空导弹武器系统仿真平台设计[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(1): 142-148.
Ruan Kaizhi, Yuan Qingqing, Zhai Wenhua, et al. Design of Air Defense Missile Weapon System Simulation Platform Based on Xsim Platform[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(1): 142-148.
- [7] 华成防务技术有限公司. 墨子·未来指挥官联合作战推演系统[EB/OL]. (2020-08-01) [2021-03-30]. <http://www.hs-defense.com/#/mz>.
Huashu Defense Technology Co., Ltd. Mozi·Future Commander Joint Operations Deduction System[EB/OL]. (2020-08-01) [2021-03-30]. <http://www.hs-defense.com/#/mz>.
- [8] 程承旗. 空间信息剖分组织导论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
Cheng Chengqi. Introduction to Spatial Information Dissection Organization[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [9] 胡晓光, 程承旗, 童晓冲. 基于GeoSOT-3D的三维数据表达研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(6): 1022-1028.
Hu Xiaoguang, Cheng Chengqi, Tong Xiaochong. The Representation of Three-Dimensional Data Based on GeoSOT-3D[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 51(6): 1022-1028.
- [10] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 3版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
Ding Lufei, Geng Fulu. Radar Principles[M]. 3rd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2002.