

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.06.014

基于网格划分的 ADS-B 地面站信号覆盖及选址分析

汤新民^{1,2}, 张颖¹, 胡钰明³, 陈强超⁴

(1. 南京航空航天大学民航学院, 南京 211106; 2. 中国民航大学交通科学与工程学院, 天津 300300; 3. 中南民航空管通信网络科技有限公司, 广州 510080; 4. 中国民用航空中南地区空中交通管理局, 广州 510080)

摘要: 针对通用航空飞行活动的安全监视问题, 合理的广播式自动相关监视 (Automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B) 地面站选址规划能够提高空域的监视范围, 基于网格划分分析 ADS-B 地面站对真实高度的监视信号覆盖范围并进行选址分析。考虑地球曲率和地形遮蔽对信号传播距离的影响, 采用数字地理高程数据建立地理模型, 将空域网格化处理, 用 Xdraw 算法计算网格覆盖性, 确定 ADS-B 地面站对真实高度的最大理论覆盖范围, 构建地面站最大覆盖模型进行空间规划布局。最后, 对 ADS-B 地面站信号覆盖情况进行仿真, 并以湖北省为例, 计算出满足该区域覆盖需求的地面站布局。为实际工作中的地面站布局规划提供了依据。

关键词: 广播式自动相关监视; 覆盖分析; 网格划分; Xdraw 算法; 布局规划

中图分类号: V355.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2022)06-1114-07

Analysis on Signal Coverage and Site Selection for ADS-B Ground Station Based on Grid Division

TANG Xinmin^{1,2}, ZHANG Ying¹, HU Yuming³, CHEN Qiangchao⁴

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. College of Transportation Science & Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

3. Middle South Air Traffic Control Network Technology Co., Ltd, Guangzhou 510080, China;

4. Middle South Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Aiming at the security monitoring problem of general aviation flight activities, a reasonable automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) ground station location planning can improve the airspace surveillance scope. This paper proposes a surveillance signal coverage analysis method of the true height and its location analysis of ADS-B ground station based on grid division. First, considering the influence of earth curvature and terrain shading on the signal propagation distance, we establish the geographic model by the digital elevation model (DEM), and divide the airspace into grids. Second, the grid coverage is calculated by the Xdraw algorithm, and the maximum theoretical coverage of ADS-B ground station at the true height is determined. Third, the maximum coverage model of the ground station is constructed for spatial planning and layout. Finally, the signal coverage of ADS-B ground station is simulated as Hubei Province is taken as an example. The layout of ground stations that meet the coverage requirements of this area is calculated. The results demonstrate that the proposed method can provide a foundation the

基金项目: 国家自然科学基金(61773202, 52072174); 中国航空无线电电子研究所航空电子系统综合技术国防科技重点实验室基金(6142505180407); 中国民航管理干部学院民航通用航空运行重点实验室开放基金(CAMICKFJJ-2019-04)。

收稿日期: 2022-02-24; **修订日期:** 2022-05-25

通信作者: 汤新民, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: tangxinmin@nuaa.edu.cn。

引用格式: 汤新民, 张颖, 胡钰明, 等. 基于网格划分的 ADS-B 地面站信号覆盖及选址分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6): 1114-1120. TANG Xinmin, ZHANG Ying, HU Yuming, et al. Analysis on signal coverage and site selection for ADS-B ground station based on grid division[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(6): 1114-1120.

layout planning of ground stations in practice.

Key words: automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B); coverage analysis; grid division; Xdraw algorithm; layout planning

随着通用航空在工业、农业、建筑业及交通等众多领域的应用日益普遍,通用航空的飞行安全技术保障手段相对匮乏,其安全监视问题不容忽视,完善通用航空的安全监视体系已经成为目前深化低空空域改革的重要举措之一。由于通用航空的活动范围通常为真高1 000 m或标高3 000 m以下,受地形及地面障碍物的影响更大,要求低空空域监视服务系统具有更高的精度及监视冗余能力。广播式自动相关监视(Automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)作为未来的主要监视技术,能够满足投资成本低、覆盖范围大的要求,在确保飞行安全方面发挥重要作用^[1-2]。在不同的地形条件下,ADS-B地面站的信号覆盖范围存在差异,当观察目标为通用航空飞行器时,不仅需要知道地面站对任意高度层的通视情况,还要知道地面站对任意真实高度的通视情况,同时区域内合理的规划布局能够提高ADS-B地面站的监视精度和准确性^[3]。

ADS-B地面站信号覆盖范围受地形地貌影响,尤其在视距波分析过程中,地球曲率和地形遮蔽对信号传输具有较大影响^[4-6]。同时结合地理高程数据和天线模型计算空间传播下的ADS-B视线截止距离,获得信号覆盖范围。文献[7]通过地理数据模型和传输衰减模型,结合实际地形状况进行无线覆盖分析,但是该模型主要针对城市地区以及高空飞行的情况。文献[8]提出了一种将复杂的三维计算简化为二维剖面的新的覆盖分析方法,为信号覆盖的发展带来了新的思路。文献[9]结合地理高程数据(Digital elevation model, DEM)地形和电磁波理论,对空间传播下的ADS-B视线截止距离进行计算,提出了提高基站信号覆盖的方法。基于地面站的信号覆盖范围,可以在区域内进行规划布局。目前对ADS-B地面站选址的研究相对较少,其布局研究与通信基站的选址类似,常用的方法包括栅格法^[10]、启发式优化算法^[11]及最大覆盖模型^[12-13]等,不同之处在于要考虑到地形及航空器超障高度等因素对选址的影响。

但是目前关于ADS-B地面站信号覆盖范围的分析,大多是某一基站对选定高度层的信号监视范围计算,不完全适用于低空条件下的复杂地形环境。地形的变化会直接影响到飞行器的飞行方向、速度和飞行姿态等,因此针对通用航空的监视需求,本文提出一种基于网格划分的ADS-B地面站

真高信号监视覆盖范围分析方法并进行选址分析,以期对ADS-B地面站布局规划的相关需求提供参考。

1 通视距离影响因素

1.1 地球曲率对可视距离的影响

ADS-B天线的传播方式为视距传播,受地球曲率影响较大。认为地球模型是球体,视线传播会被凸起的地表阻挡,导致空间波传播存在一个最大直视距离,该最大直视距离通过视距传播模型计算,如图1所示。

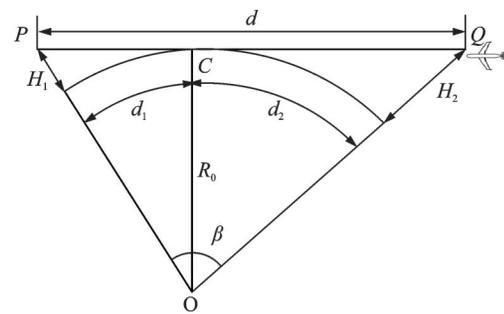


图1 视距传播模型

Fig.1 Sight distance propagation model

若地球半径为 R_0 ,天线及接收机所在高度分别为 H_1 和 H_2 ,两点的连线与地表相切于反射点 C 点, $d_0 = d_1 + d_2$ 即为地球曲率因素影响下的最大直视距离。地球半径 R_0 远大于天线和接收机的高度 H_1 和 H_2 ,由几何关系可得

$$d_0 = d_1 + d_2 \approx \sqrt{2R_0} (\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}) \quad (1)$$

电磁波会受地球曲率的影响,在正常的大气条件下以曲线的形式传播。考虑在标准大气条件下的地球等效曲率半径为 $R_e = 8493$ km,则视距 d_0 为

$$d_0 = 4.1(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}) \quad (2)$$

最大直视距离 d 对应圆心角 β

$$\beta = \arccos \frac{R_e}{R_e + H_1} + \arccos \frac{R_e}{R_e + H_2} \quad (3)$$

式中: H_1 和 H_2 的单位均为米, d_0 的单位为千米。

1.2 地形遮蔽对通视距离的影响

遮蔽角是指地面站天线和关键点之间的连线与地平线之间的夹角,是能够发现某一方位上探测目标的最小角度,可以作为判定视点与目标点是否通视的依据^[14]。以ADS-B地面站周围每个山顶作为通视分析关键点,将飞机所处位置与地面站之间

连线和水平线的夹角作为测量角度,该连线可能在水平面以上或以下。设向上为正,向下为负,分为以下2种情况讨论。

(1)当遮蔽角为正时,沿 ADS-B 地面站接收天线与关键点顶端做一条射线,该射线与水平面夹角为 $\theta_{ci}(i=1,2,\dots)$,即为遮蔽角,在山峰后面会形成一个盲区,当飞机与地面站连线和水平面的夹角小于遮蔽角,目标被遮挡无法被发现。如图2所示,虚线表示地面一定真高。对应 A 处真高的飞机,其与地面站连线未被任何地形遮挡,信号可以被地面站接收;对于 B 处真高的飞机,其与地面站连线虽未被关键点①遮挡,但被关键点②遮挡,测量角度小于关键点②处遮蔽角 θ_{c2} ,信号同样无法被地面站接收。

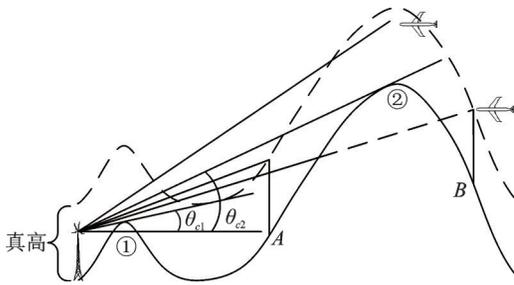


图2 遮蔽角为正值时信号覆盖盲区

Fig.2 Blind area when the shielding angle is positive

(2)当遮蔽角为负时,遮蔽角为 $\theta_{cj}(j=1,2,\dots)$,当飞机与地面站连线和水平面的夹角的大小大于遮蔽角,目标被遮挡无法被发现。如图3所示,对应 A' 处真高的飞机测量角度大于关键点①处遮蔽角 θ_{c1} ,其位于 ADS-B 地面站的真高信号覆盖盲区。B' 较 A' 位置远,但信号未被地形遮挡。

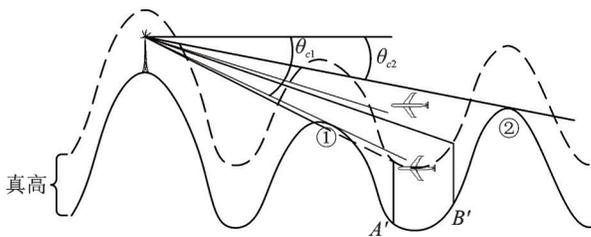


图3 遮蔽角为负值时信号覆盖盲区

Fig.3 Blind area when the shielding angle is negative

针对真高的遮蔽情况,本文采用在确定真高的前提下,对空域进行网格划分,计算每个网格对应的遮蔽角,比较飞机所处位置对应测量角度与遮蔽角的大小关系,判断是否可视。对任意高度层,高度层认为是一个平面,ADS-B地面站的监视信号覆盖范围为一段连续区域。而对任意真实高度层,高度层随地形变化,地面站的监视信号覆盖范围可

能由多段不连续区域共同构成。

2 覆盖范围分析

2.1 数字高程插值

在地理信息系统中,大多用 DEM 表示地形特征。DEM 数据以规则网格形式采样与存储,本文采用经改进形成的 ASTER GDEM V2 版数据,其每个单元覆盖 $1^\circ \times 1^\circ$ 的地理范围,以此对起伏地形环境进行建模更接近真实地理形态。DEM 是地球表面地形状态的离散化表达,只存储了网格点的高程数据,高程点数据不总是完全的,加上通用航空的飞行活动在低空空域中进行,对精度要求更高,对于样本点不是网格点的,需要通过已知高程值内插等高线,以形成光滑的曲线,能够更加精确的反映地形起伏情况。

常用的高程内插算法包括线性内插、样条函数内插,克里金内插法、双线性内插等,考虑到区域内高程数据具有空间相关性,本文采用克里金(Kriging)插值法。

假定把数字高程模型分成若干单元,待插值点所在单元内的 n 个已知点的高程值为 $H_m(m=1,2,\dots,n)$,则未知点 x 处的高程值为

$$H_x = \sum_{m=1}^n \lambda_m H_m \quad (4)$$

式中 λ_m 为第 m 个点的高程值对未知点高程值的权重。为保证最优线性无偏估计,则要求无偏性和估计方差最小

$$\sum_{m=1}^n \lambda_m = 1 \quad (5)$$

$$\min S = \sigma_m^2 = E[(H_x - H_m)^2] \quad (6)$$

2.2 网格编码

空域网格化方法可实现空域的精细化处理。本文基于网格划分计算每个 ADS-B 地面站的覆盖范围。首先需要对目标空域进行网格化处理。网格化分析思想是把目标区域划分为一系列网格,每个网格对应一个特定的空间位置,最常见的是划分为大小相同的正方形网格,每个网格包含经度、纬度和高程信息,用网格中心点表示该网格区域。步骤如下:

(1)确定目标空域网格范围:确定目标低空空域范围,通过墨卡托投影将空域范围转换为直角坐标表示;

(2)网格划分:确定空域网格的单位长度,将目标空域分为大小一致的网格,网格大小直接影响结果可靠性;

(3)网格编码:用每个网格的中心点表示该网格区域并进行编码。网格编码常见的有2种方法,

即编号法和坐标系法,每个网格对应唯一的表达形式。这里采用直角坐标来表示网格。

2.3 区域任意目标点可视性计算

Xdraw 算法是离散的可视域分析算法,以观察点为中心从内到外逐层扩散,每一点都有与之对应的遮蔽角^[15]。当要对第 i 环格点可视性进行计算时,将其遮蔽角与第 $i-1$ 环进行比较,计算每个网格的可视性,最终得到不同地形条件下的可视区域,即可视域。如图 4 所示为 Xdraw 算法示意图。

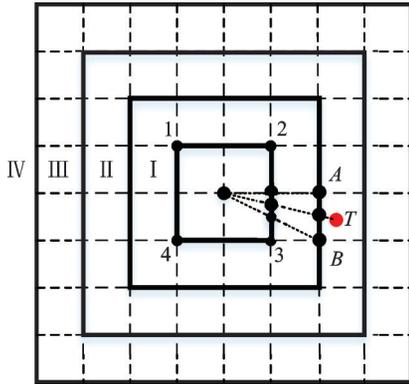


图 4 Xdraw 算法示意图

Fig.4 Schematic diagram of Xdraw algorithm

当选定 ADS-B 地面站位置时,以地面站作为观察点中心,采用 Xdraw 算法进行分析。通视分析示意图如图 5 所示。V 表示地面站位置, T' 为飞行器位置,取二者之间的连线作为分析方位,将连线进行等间距采样,即划分网格,并获得每个采样点的高程,对于高程值未知的点则通过插值法获得,同时每个采样点对应一个遮蔽角。

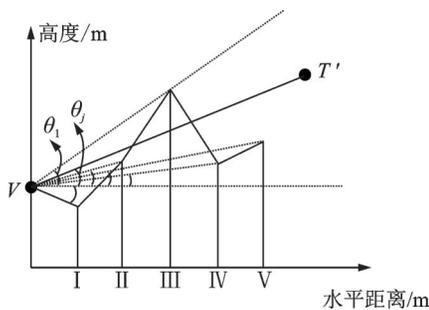


图 5 通视分析示意图

Fig.5 Schematic diagram of visibility analysis

设网格划分时单位网格对应圆心角 $\Delta\beta$, 则对某一方位的网格数为 $k = \frac{\beta}{\Delta\beta}$ 。 h_i 表示地面某点的海拔高度,每个采样点对应的地形遮蔽角为

$$\theta_i = \arctan \frac{(R_e + h_i) \times \cos(i \times \Delta\beta) - (R_e + H_1)}{(R_e + h_i) \times \sin(i \times \Delta\beta)}$$

$$i = 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

每个网格对应飞行器处于任意真实高度的测

量角度为

$$\theta_j = \arctan \frac{(R_e + H_2) \times \cos(j \times \Delta\beta) - (R_e + H_1)}{(R_e + H_2) \times \sin(j \times \Delta\beta)}$$

$$j = 1, 2, \dots, k \quad (8)$$

比较 θ_i 和 θ_j 确定网格的可视性。如图 5 所示,二者之间的测量角度为 θ_j , 每个采样点对应的遮蔽角中, θ_1 为该方向上的最大遮蔽角,由于 $\theta_j < \theta_1$, T' 虽然不受采样点 IV、V 的遮蔽,但被采样点 III 处地形遮蔽,同样处于地面站 V 的监视盲区。利用相同方法依次对所有方位的所有网格点进行判别,得到所有样点的可视信息,直至扩散半径达到最大直视距离,算法停止,最终得到不同方位的 ADS-B 视线截止距离,计算出每个地面站的覆盖矩阵。

3 ADS-B 布局模型建立

3.1 ADS-B 布局原则

地面站部署的最终目的是通过尽量少的地面站数量,实现低空空域的监视信号覆盖范围最大化,尽可能减少信号盲区,同时具备适当的冗余覆盖。在确定不同位置 ADS-B 地面站的覆盖范围前提下,根据目标空域的监视范围要求,综合度量各地面站的监视性能,分析地面站部署的优先顺序进行规划布局。因此,ADS-B 地面站选址应满足以下基本原则:

- (1) ADS-B 地面站的监视范围应当考虑空中交通管制需要,适应机场、航路的发展规划。
- (2) 在满足监视需求的情况下,地面站数量应尽可能少,同时又要考虑到地面站分布位置的均衡性。
- (3) ADS-B 地面站监视覆盖面积最大化,保证良好的监视效果。

(4) 适当的冗余覆盖能够确保同一架航空器可以被不同的地面站监视到,提高目标定位的精度,多地面站的监视能够在一定程度上避免单地面站接收报文出现分析错误的情况。

3.2 数学模型建立

ADS-B 地面站部署的主要目的是通过部署尽可能少的地面站数量,减少覆盖盲区,使覆盖空域面积最大,因此在满足全覆盖要求的情况下,以地面站数目最少为优化目标,可以采用集合覆盖模型来解决这一问题,对模型中涉及到的集合、参数和决策变量的定义为: G 表示被划分为 M 行 N 列的空域网格集合; K 表示可以建设 ADS-B 地面站的候选点集合; $f_{ij}(k)$ 表示地面站 k 对网格 g_{ij} 的可视情况,其中 1 表示可视, 0 表示不可视; $\Omega_{ij} = \{k | f_{ij}(k) = 1\}$ 表示能够满足覆盖网格 g_{ij} 的地面站选址

候选点集合; $A_k = \begin{cases} 1 & \text{在地面站候选点 } k \text{ 处建站} \\ 0 & \text{不在地面站候选点 } k \text{ 处建站} \end{cases}$;

D_k 表示地面站 k 的覆盖矩阵有

$$D_k = \begin{bmatrix} f_{11}(k) & \cdots & f_{1N}(k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{M1}(k) & \cdots & f_{MN}(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

可以建立如下覆盖模型

$$\min z = \sum_{k \in K} A_k \quad (10)$$

$$\sum_{k \in \Omega_j} f_{ij}(k) \geq 1; \forall 1 \leq i \leq M; 1 \leq j \leq N \quad (11)$$

$$A_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K \quad (12)$$

式(10)为覆盖模型的目标函数,优化目标为ADS-B地面站的选址数量最少;约束(11)保证若

$$D' = \begin{bmatrix} f_{11}(1) & \cdots & f_{1N}(1) & f_{21}(1) & \cdots & f_{2N}(1) & \cdots & f_{M1}(1) & \cdots & f_{MN}(1) \\ f_{11}(2) & \cdots & f_{1N}(2) & f_{21}(2) & \cdots & f_{2N}(2) & \cdots & f_{M1}(2) & \cdots & f_{MN}(2) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{11}(k) & \cdots & f_{1N}(k) & f_{21}(k) & \cdots & f_{2N}(k) & \cdots & f_{M1}(k) & \cdots & f_{MN}(k) \end{bmatrix} \quad (14)$$

借助LINGO软件,通过转换后的矩阵对覆盖模型进行求解,可确定符合条件的地面站建设数量和位置。所有被选中的地面站覆盖矩阵叠加为选址布站后目标区域的监视信号总体覆盖矩阵,即 $D = \sum_{k=1}^{\infty} D_k$, 总体覆盖矩阵能够反映目标区域内的信号能否被有效监视,可以用来评价地面站组网的覆盖性。

4 仿真验证

World Wind Java是美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的一个三维地理信息软件,该软件提供了完整的三维地理信息平台基础功能代码,为进行ADS-B地面站的覆盖性分析带来了便利。基于World Wind开源软件包开发ADS-B地面站覆盖性分析软件。为验证本文提出方法的正确性,选取湖北省地区作为ADS-B地面站信号覆盖范围的区域。

借助World Wind三维地理信息系统,选取DEM精度为90 m的数据,单位网格间距为100 m,以ADS-B地面站为观察点中心,最大直视距离为半径,仿真同一地面站对不同高度层及真实高度的覆盖情况。选取湖北省内经度为111.537 9°、纬度为30.590 1°处设立地面站,该位置地理高程为140 m,现有移动通信铁塔高度为50 m,认为天线的海拔高度为190 m,对该位置进行分析,得到的信号覆盖范围示意图如图6~8所示。

图6~8选择同一位置地面站,分别模拟了对

网格 g_{ij} 被地面站覆盖,则该网格满足至少被ADS-B地面站覆盖一次;约束(12)保证决策变量为0-1变量。

通过地面站的覆盖性分析,得到每个地面站选址候选点的覆盖矩阵 D_k 。为方便求解,对覆盖矩阵进行转换:

(1)将 $M \times N$ 维矩阵 D_k 转换为1行 $M \times N$ 列的矩阵 D'_k

$$D'_k = [f_{11}(k) \cdots f_{1N}(k) f_{21}(k) \cdots f_{2N}(k) \cdots f_{M1}(k) \cdots f_{MN}(k)] \quad (13)$$

(2)以地面站选址候选点为横行,以空域网格为纵列,将选址候选点的覆盖矩阵转化为候选点总体覆盖矩阵 D'

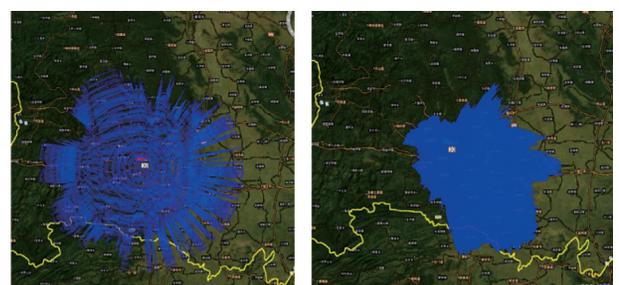
真实高度和高度层为150、300和600 m的监视信号覆盖情况。由仿真结果可以看出,地面站位置东西部地势差别较大,西侧的高地势对信号遮挡影响较大;对真高或指定高度层,同一地面站的信号覆盖范围随高度的上升而逐渐增大;对同样高度,真实高度与同高度的指定高度层覆盖范围相比,地面站对真实高度的覆盖范围较大,且对真高的覆盖范围为几段不连续区域的覆盖叠加,对某高度层的覆盖范围为一段连续区域,与实际情况相符。



(a) True height of 150 m (b) Absolute height of 150 m

图6 高度150 m的信号覆盖范围

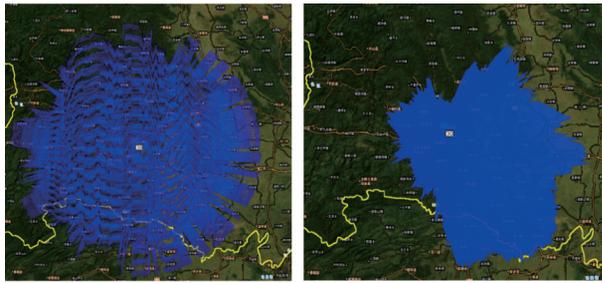
Fig.6 Ground station signal coverage at the 150 m height



(a) True height of 300 m (b) Absolute height of 300 m

图7 高度300 m的信号覆盖范围

Fig.7 Ground station signal coverage at the 300 m height



(a) True height of 600 m (b) Absolute height of 600 m

图 8 高度 600 m 的信号覆盖范围

Fig.8 Ground station signal coverage at the 600 m height

考虑到湖北省的地势高低相差悬殊,为了便于分析,基于湖北省的地势特点,本文将湖北省以东经 112°为界限,将湖北省划分为东、西两部分进行分析。对于湖北省西部地区,地势较高且较为复杂,需要更多数量的地面站保证最大范围的信号覆盖;对于湖北省东部地区,地势较为平坦,单个地面站的覆盖范围较西部大,所需地面站数量较东部少。由于最大覆盖模型有无限多个候选点,求解存在一定难度,首先需要对候选点进行预处理。由于地面站部署位置越高,覆盖范围越大,因此本文以西部地区为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的大小、东部地区为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的大小,将湖北省区域进行网格划分。将地面站部署在湖北省现有信号铁塔上,考虑地理高程和地面站天线高度,筛选出每个网格中海拔高度最高的铁塔位置作为地面站部署的候选位置。

本文以实现湖北省真实高度 600 m 的全覆盖为监视需求。首先通过 WorldWind 平台,计算每个地面站对真高 600 m 的覆盖矩阵。LINGO 软件作为专业的优化模型求解软件,适用于求解整数规划问题,利用 LINGO 软件对文中的最大覆盖模型进行求解。

仿真结果表明最佳目标函数值为 32,即考虑湖北省初步规划包括站点 6、11、14 等在内的 32 个地面站。通过 WorldWind 平台对该地面站组网的信号覆盖范围进行仿真,其中湖北省真实高度为 150、300 和 600 m 的信号覆盖情况分别如图 9~11 所示。

仿真结果表明,本文选择的地面站位置能够基本实现湖北省对真实高度 600 m 的全域覆盖,且包含一定的覆盖冗余。地面站的监视信号覆盖范围与湖北省的地势特点有较大关系,低平的中间区域地面站覆盖范围较为连续,部署数量较少,地势复杂的西部山区需更多的地面站实现更大范围的监视信号覆盖,满足地面站部署的基本原则。

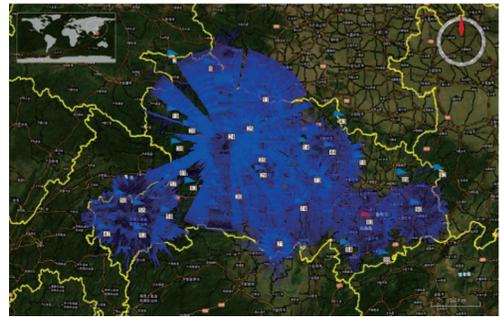


图 9 地面站组网对 150 m 真实高度的覆盖范围

Fig.9 Coverage of ground station network at the true height of 150 m



图 10 地面站组网对 300 m 真实高度的覆盖范围

Fig.10 Coverage of ground station network at the true height of 300 m



图 11 地面站组网对 600 m 真实高度的覆盖范围

Fig.11 Coverage of ground station network at the true height of 600 m

5 结 论

地面站信号覆盖范围分析及选址研究可应用于航路和飞行扇区安全评估等场景,是完善通用航空监视服务体系的重要内容之一。本文以湖北省地区为例,基于信号覆盖影响因素理论及网格化处理方法,在 WorldWind 平台开发了地面站信号覆盖范围分析系统,计算地面站对不同高度情况下的监视信号覆盖范围。通过将地面站对指定高度层与真实高度的信号覆盖范围进行对比,验证了算法的可行性,提出了地面站布局规划的原则和部署模型,基于地面站对真实高度的监视覆盖矩阵确定了布局方案。针对湖北地区进行地面站选址工作,对

于通用航空的低空飞行具有较好的实用性,可为进行通用航空的航路规划提供参考和依据。

参考文献:

- [1] CHEN Wenhui, CHEN Quanshan, WANG Yu, et al. The application of ADS-B technology in aviation management in China[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Arts, Management, Education and Innovation. Soul, South Korea: Clausius Scientific Press, 2019: 234-239.
- [2] 郭婧,王嫣然,薛广月,等.基于北斗的民航ADS-B运行性能测试与评估[J].民航学报,2018,2(5): 61-64,112.
GUO Jing, WANG Yanran, XUE Guangyue, et al. The test and evaluation of ADS-B operation performance based on BDS[J]. Journal of Civil Aviation, 2018, 2(5): 61-64,112.
- [3] 覃睿,史娅琪,王明科.面向低空飞行安全监视的ADS-B地面站空间布局规划方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(7): 100-105.
QIN Rui, SHI Yaqi, WANG Mingke. Spatial distribution programming method of ADS-B ground station oriented to low altitude flight safety[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2018, 37(7): 100-105.
- [4] 邱航,陈雷霆.地形影响下雷达作用范围三维可视化研究[J].电子测量与仪器学报,2010,24(6): 528-535.
QIU Hang, CHEN Leiting. 3D visualization of radar coverage under considering terrain effect[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(6): 528-535.
- [5] JHENG S L, JAN S S, CHEN Y H. 1090 MHz ADS-B based wide area multilateration system for alternative positioning navigation and timing[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(16): 9490-9501.
- [6] 董晶,陈辉,刘云龙.基于地球曲率的雷达地形遮蔽盲区计算[J].中国电子科学研究院学报,2021,16(4): 408-413.
DONG Jing, CHEN Hui, LIU Yunlong. Calculation of radar terrain blind space based on earth curvature [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2021, 16(4): 408-413.
- [7] 张智强.ADS-B地面站的规划与建设[J].指挥信息系统与技术,2011,2(4): 27-30.
ZHANG Zhiqiang. Planning and construction of ADS-B ground station [J]. Command Information System and Technology, 2011, 2(4): 27-30.
- [8] LI Jian, ZHU Zhiqiang, CHENG Yansong. Research and development of general coverage analysis model for air traffic control stations[C]//Proceedings of 2020 IEEE 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology. Weihai, China: IEEE, 2020.
- [9] CAO Bo, LIU Wenping, ZHANG Liang, et al. Simulation analysis of signal coverage of ADS-B base station based on DEM[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1865: 042010.
- [10] 刘宏波,高俊,古尚利.基于栅格化空域的数据链站点选址优化[J].火力与指挥控制,2015,40(12): 18-21.
LIU Hongbo, GAO Jun, GU Shangli. Research on location optimization of data link site based on grid airspace[J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(12): 18-21.
- [11] 金伟正,宋超,罗义军.基于人工鱼群算法的电力无线专网基站选址规划[J].武汉大学学报(工学版), 2021, 54(6): 551-556.
JIN Weizheng, SONG Chao, LUO Yijun. Base station location planning of power wireless private network based on artificial fish swarm algorithm[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(6): 551-556.
- [12] 刘宏波,孟进,刘琴涛,等.地空超短波数据链站点选址及覆盖优化[J].兵工学报,2019,40(10): 2105-2110.
LIU Hongbo, MENG Jin, LIU Qintao, et al. Site selection and coverage optimization of ground-to-air ultra-short wave data link[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(10): 2105-2110.
- [13] 陈明.基于空间连续需求的最大覆盖选址模型及应用[J].物流技术,2014,33(5): 169-172,175.
CHEN Ming. Application of maximum coverage location model based on continual demand in defined space [J]. Logistics Technology, 2014, 33(5): 169-172,175.
- [14] 冯克涛,李晓毅,曲晨,等.基于DEM的民航地空VHF通信有效覆盖仿真研究[J].系统工程与电子技术,2022,44(2): 684-695.
FENG Ketao, LI Xiaoyi, QU Chen, et al. Simulation research on effective coverage of civil aviation ground to air VHF communication based on DEM[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(2): 684-695.
- [15] ZHANG Jianbo, ZHAO Subin, YE Zhuangzhuang. Spark-enabled Xdraw viewshed analysis[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 2017-2029.

(编辑:张蓓)