

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202601002

协同区域导航的临地伪卫星网络几何构型规划

曲 艺¹, 王 生¹, 冯 慧¹, 罗海波^{1,2}, 刘 强¹, 李崔春¹

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 海南空天信息研究院 海南省地球观测重点实验室, 海南 文昌 571300)

摘 要: 为改善地基伪卫星和气球伪卫星开展协同区域导航应用的服务性能, 提出一种临地协同伪卫星网络几何构型规划方法。首先, 针对临地协同区域导航应用场景, 设计了基于几何精度因子和水平精度因子的伪卫星网络几何构型性能评价指标; 其次, 分析了气球伪卫星的运动学特征和临近空间的环境风场特征, 构建了主动调节飞行高度和利用环境风场的气球伪卫星轨迹调节策略; 最后, 提出了基于正余弦算法的伪卫星网络几何构型规划算法, 讨论了规划算法的约束条件并开展了仿真验证。结果表明: 所提算法能够充分利用环境风场随时空条件变化的特点, 合理规划气球伪卫星的飞行轨迹, 延长其服务时间, 从而改善临地协同伪卫星网络的几何精度因子和水平精度因子, 进而优化伪卫星网络的导航服务性能, 为气球伪卫星在导航领域的应用提供了技术参考。

关键词: 伪卫星; 网络构型规划; 正余弦算法; 几何精度因子

中图分类号: V273

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2026)01-0010-11

伪卫星是能够传播导航信号的发射器。在卫星导航信号被物理遮蔽或被干扰的情况下, 伪卫星可为特定区域提供导航服务或导航增强服务, 同时改善卫星几何分布, 提高导航定位的精度、可用性与完好性^[1-3]。根据搭载平台的不同, 伪卫星可以分为地基伪卫星、空基伪卫星和临基伪卫星(以临近空间飞行器为平台的伪卫星)。与地基伪卫星和空基伪卫星相比, 临基伪卫星以其飞行高度高、覆盖范围广、驻空时间长和部署周期短等优点而备受关注^[4-6]。目前, 在研在用的临近空间飞行器主要包括临近空间无人机、平流层飞艇和高空气球(high altitude balloon, HAB)等。其中, HAB的运维成本低廉, 相关技术最为成熟。近年来, HAB的区域驻留能力^[7-9]和飞行时长^[10]均有所提升, 已在通信^[11-12]、科学探测^[13-14]等领域中得到广泛应用。因此, HAB可作为伪卫星平台(以下简称“气球伪卫星”)在区域导航, 特别是应急导航中发挥重要作用。

在利用伪卫星提供导航服务的过程中, 伪卫星网络几何构型是影响其服务性能的关键因素之一, 有必要对其开展规划研究。宫常青等^[15]对4颗伪卫星的网络构型进行了分析, 认为采用“Y”型构型的几何精度因子可比采用正方形构型的几何精度因子低一个数量级。高社生等^[16]以5颗伪卫星为研究对象, 提出了3种网络构型, 分别计算了各种网络构型的几何精度因子。王伟等^[17]分析了伪卫星网络几何构型对空基伪卫星定位误差的影响, 使用双差方法对空基伪卫星的定位误差开展了Monte Carlo仿真。段晨浩^[18]针对空基伪卫星的网络布局优化问题, 提出了渐进式、目标式、预测式、跟踪式等多种优化策略, 并对其进行了仿真验证。党进伟等^[19]采用“长机-僚机”方式对空基伪卫星进行编队, 采用神经网络对伪卫星集群进行分布式协同编队控制, 以保持伪卫星集群的最佳构型。芦鑫元^[20]针对无人机进场引导需求, 提出了伪卫星布设的约束条件和选址方法, 并通

收稿日期: 2025-06-27

修回日期: 2025-09-05

录用日期: 2025-09-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3901805); 海南省自然科学基金项目(523MS115)

第一作者: 曲艺(1980—), 女, 高级工程师, 主要从事浮空器应用与仿真研究。E-mail: quyi@aircas.ac.cn

引用格式: 曲艺, 王生, 冯慧, 等. 协同区域导航的临地伪卫星网络几何构型规划[J]. 火箭军工程大学学报, 2026, 40(1): 10-20.
QU Yi, WANG Sheng, FENG Hui, et al. Ground- and nearspace-based pseudolites network geometry configuration planning in regional navigation by cooperation[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40(1): 10-20.

过典型场景下的仿真实验, 验证了所提方法的有效性。Song 等^[21]将伪卫星网络布局问题视为多约束的组合优化问题, 利用改进的遗传算法对伪卫星网络布局进行求解。Li 等^[22]以伪卫星网络几何精度因子和伪卫星数量为目标, 利用粒子群算法对空基伪卫星网络的动态部署方案进行了规划。

然而, 上述研究对象大多是地基伪卫星或者以无人机等强动力飞行器为平台的伪卫星, 并不完全适用于以 HAB 为平台的伪卫星。首先, 气球伪卫星的运行轨迹处于持续变化中, 不能将其视为如地基伪卫星、飞艇伪卫星一样的静态节点进行分析; 其次, 气球伪卫星一般不配备动力装置, 而是受风力驱动, 因而其运行轨迹有别于无人机等强动力飞行器; 最后, 气球伪卫星的轨迹调节手段也与其他飞行器不同, 主要通过改变气球伪卫星的飞行高度, 再利用不同高度的水平风场差异来实现飞行轨迹调节。

为解决气球伪卫星网络的几何构型规划问题, 本文以地基伪卫星和气球伪卫星协同区域导航为应用场景, 设计了伪卫星网络几何构型评价指标, 基于气球伪卫星的轨迹调节策略, 提出一种基于正余弦算法的临地协同伪卫星网络几何构型规划算法, 并对其有效性进行了仿真验证。

1 伪卫星网络几何构型评价指标

本文所研究的临地协同区域导航应用场景如图 1 所示, 多颗地基伪卫星和气球伪卫星共同组成临地协同伪卫星网络, 为服务区域内的不同用户提供导航定位服务。

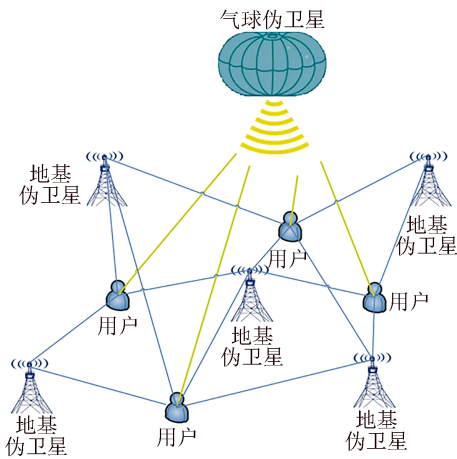


图 1 地基伪卫星和气球伪卫星协同区域导航

Fig. 1 Illustration of regional navigation by cooperation of ground- and HAB-based pseudolites

在此场景下, 地固坐标系中第 i 个用户在 t 时刻的观测矩阵 $\mathbf{H}_{(i,t)}$ 可表示为

$$\mathbf{H}_{(i,t)} = \begin{bmatrix} a_x(i,1,t) & a_y(i,1,t) & a_z(i,1,t) & 1 \\ a_x(i,2,t) & a_y(i,2,t) & a_z(i,2,t) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_x(i,n_B,t) & a_y(i,n_B,t) & a_z(i,n_B,t) & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: n_B 为网络中的伪卫星数量; $a_x(i,j,t)$ 、 $a_y(i,j,t)$ 、 $a_z(i,j,t)$ 分别为第 j 颗伪卫星在 t 时刻相对于第 i 个用户在 x 、 y 、 z 方向上的余弦。

对于第 i 个用户, t 时刻的伪卫星网络几何构型性能可用该时刻的几何精度因子 (geometric dilution of precision, GDOP) 评价; 若用户对授时误差、高程误差不敏感, 则 t 时刻的伪卫星网络几何构型性能还可用水平精度因子 (horizontal dilution of precision, HDOP) 评价。GDOP 和 HDOP 的数学表达式^[23]分别为

$$G_{\text{GDOP}(i,t)} = \sqrt{g_{11}(i,t) + g_{22}(i,t) + g_{33}(i,t) + g_{44}(i,t)} \quad (2)$$

$$G_{\text{HDOP}(i,t)} = \sqrt{g_{11}(i,t) + g_{22}(i,t)} \quad (3)$$

式中: $G_{\text{GDOP}(i,t)}$ 为 t 时刻第 i 个用户的 GDOP; $G_{\text{HDOP}(i,t)}$ 为 t 时刻第 i 个用户的 HDOP; $g_{kk}(i,t)$ 为矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}_{(i,t)}$ 的第 k 个主对角线元素, 即

$$\text{diag}(\tilde{\mathbf{H}}_{(i,t)}) = \begin{bmatrix} g_{11}(i,t) \\ g_{22}(i,t) \\ g_{33}(i,t) \\ g_{44}(i,t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, 矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}_{(i,t)}$ 为

$$\tilde{\mathbf{H}}_{(i,t)} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} (\mathbf{H}_{(i,t)}^T \mathbf{H}_{(i,t)})^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_i^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{S}_i$ 为第 i 个用户的坐标变换矩阵, 可表示为

$$\mathbf{S}_i = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_{u,i} & \cos \lambda_{u,i} & 0 \\ -\sin \varphi_{u,i} \cos \lambda_{u,i} & -\sin \varphi_{u,i} \sin \lambda_{u,i} & \cos \varphi_{u,i} \\ \cos \varphi_{u,i} \cos \lambda_{u,i} & \cos \varphi_{u,i} \sin \lambda_{u,i} & \sin \varphi_{u,i} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\lambda_{u,i}$ 为第 i 个用户所在的经度; $\varphi_{u,i}$ 为第 i 个用户所在的纬度。从第 i 个用户推广到整个服务区域内的多个用户, 则 t 时刻多个用户的 GDOP 平均值和 HDOP 平均值分别为

$$G_{\text{GDOP}(t)} = \frac{1}{n_u} \sum_{i=1}^{n_u} G_{\text{GDOP}(i,t)} \quad (7)$$

$$G_{\text{HDOP}(t)} = \frac{1}{n_u} \sum_{i=1}^{n_u} G_{\text{HDOP}(i,t)} \quad (8)$$

式中: n_u 为服务区域内采样用户的数量。

由于伪卫星网络将在服务周期内持续为用户提供服务,因此本文定义伪卫星网络在其服务时间内的几何构型用多个采样时刻的 GDOP 平均值或 HDOP 平均值进行评价,即

$$G_{\text{GDOP}} = \frac{1}{n_t} \sum_{m=1}^{n_t} G_{\text{GDOP}}(t_m) \quad (9)$$

$$G_{\text{HDOP}} = \frac{1}{n_t} \sum_{m=1}^{n_t} G_{\text{HDOP}}(t_m) \quad (10)$$

式中: t_m 为采样时刻; n_t 为采样总数。

2 伪卫星网络几何构型规划算法

在临地协同区域导航应用场景中,对地基伪卫星网络的几何构型规划研究已经较为成熟,本文重点解决气球伪卫星的轨迹调节问题,以及地基伪卫星和气球伪卫星协同导航的网络构型规划问题。为此,本节首先讨论气球伪卫星的轨迹调节策略,而后提出地基伪卫星和气球伪卫星协同区域导航的网络构型规划算法。

2.1 气球伪卫星飞行轨迹调节策略

本文研究的气球伪卫星没有配备动力装置,故而其主要通过改变自身飞行高度,再利用不同高度的水平风场差异实现飞行轨迹调节。在垂直方向,本文假设气球伪卫星的飞行高度在其设计范围内完全可控;在水平方向,本文假设气球伪卫星的水平飞行速度与其所处环境的风速成正比^[24],可表示为。

$$\lambda' = \gamma \omega_{\varphi}(\lambda, \varphi, h, t) \quad (11)$$

$$\varphi' = \gamma \omega_{\lambda}(\lambda, \varphi, h, t) \quad (12)$$

式中: λ 为气球所在的经度; φ 为气球所在的纬度; h 为气球的飞行高度; $\omega_{\varphi}(\lambda, \varphi, h, t)$ 为气球所处位置 (λ, φ, h) 在 t 时刻的纬向风速; $\omega_{\lambda}(\lambda, \varphi, h, t)$ 为气球所处位置 (λ, φ, h) 在 t 时刻的经向风速; γ 为气球水平方向飞行速度与风速的比例系数,参考文献^[24], γ 取为 1。

水平风场模型(horizontal wind model, HWM)是一种常用的国际参考大气模型,其利用近几十年来的地基观测数据、卫星观测数据和火箭观测数据等拟合得到从地面到 500 km 高度的地球大气风场,已在多个领域中得到广泛应用^[25-27]。根据 HWM 14,中国西北某地某时段风速随高度、经纬度、时间等的变化分别如图 2~图 4 所示。从图中可以清楚看到,不同高度、经度、纬度和时间的风速存在较大差异,对气球伪卫星的运行状态

影响较大,进而对气球伪卫星的导航服务性能产生影响。例如,若气球伪卫星所处环境的风速过大,则可能导致气球伪卫星无法在服务区域内长时间驻留,从而缩短了气球伪卫星的服务时长;若气球伪卫星的飞行高度过低,则可能降低气球伪卫星对伪卫星网络几何构型的改善程度。因而在规划过程中,为气球伪卫星选择合适的风场环境至关重要。

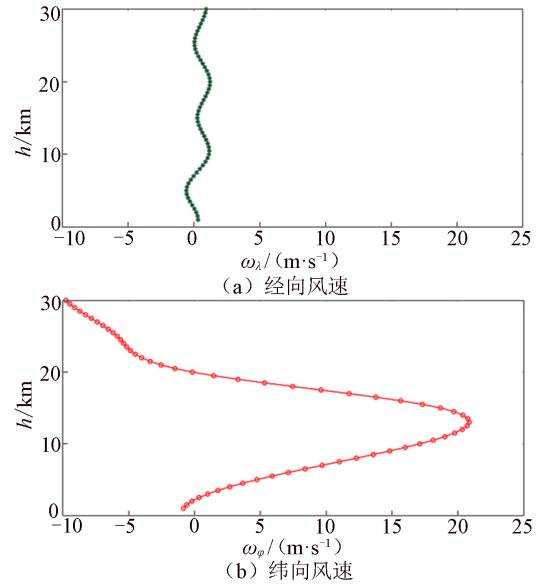


图 2 西北某地某时经向风速和纬向风速随高度变化
Fig. 2 Variations of meridional and latitudinal wind speeds with altitudes in a specific area of northwest China at a specific time

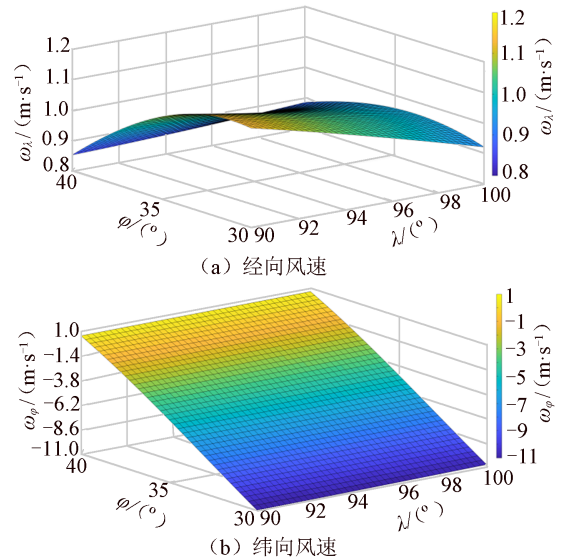


图 3 西北某地某时 20 km 高度经向风速和纬向风速随水平位置变化

Fig. 3 Variations of meridional and latitudinal wind speeds with horizontal positions in a specific area of northwest China at a specific time at an altitude of 20 km

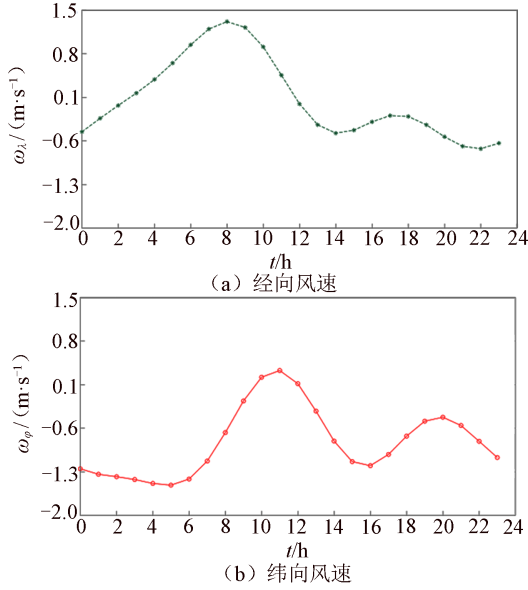


图4 西北某地某日经向风速和纬向风速日变化

Fig. 4 Diurnal variations of meridional and latitudinal wind speeds in a specific area of northwest China on a specific day

2.2 规划算法

鉴于地基伪卫星的几何分布相对固定, 临地协同区域导航中的网络构型变化主要来源于气球伪卫星的位置变化, 因此伪卫星网络几何构型规划的核心在于气球伪卫星的飞行轨迹。为此, 本文采取气球伪卫星主动调节飞行高度, 积极利用环境风场的规划策略, 将临地协同伪卫星网络的几何构型规划问题转化为以气球伪卫星飞行高度为变量、以 G_{GDOP} 或 G_{HDOP} 最小化为目标的组合规划问题。

启发式算法是解决规划问题的常用方法之一^[28-29]。为了解决伪卫星网络的几何构型规划问题, 本文引入正余弦算法, 该算法是一种简洁高效的启发式算法, 利用正余弦函数的波动性与周期性实现对解集的搜索与迭代, 具有原理明晰、控制变量少、搜索能力强等优势, 其迭代方程^[30]为

$$X_{is}^{js}(k_s + 1) = \begin{cases} X_{is}^{js}(k_s) + r_1 \times \sin(r_2) \times \\ |r_3 B_{is}^{js}(k_s) - X_{is}^{js}(k_s)| & 1 \geq r_4 > 0.5 \\ X_{is}^{js}(k_s) + r_1 \times \cos(r_2) \times \\ |r_3 B_{is}^{js}(k_s) - X_{is}^{js}(k_s)| & 0 \leq r_4 \leq 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

式中: k_s 为当前迭代次数; $X_{is}^{js}(k_s)$ 为解 i_s 在第 k_s 次迭代中的第 j_s 维分量; $B_{is}^{js}(k_s)$ 为解集在第 k_s 次迭代时最优解的第 j_s 维分量; r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 均为迭代控制参数。其中, r_2 控制算法在优化迭代过程中的步长, 取值范围为 $[0, 2\pi]$; r_3 控制算法当前最优

解对当前解迭代的影响幅度, 取值范围为 $[0, 2]$; r_4 控制算法在正弦迭代与余弦迭代之间的转换, 取值范围为 $[0, 1]$; r_1 控制迭代扰动量的选择, 取值为

$$r_1 = a_s(1 - k_s/T_s) \quad (14)$$

式中: a_s 为常数, 通常取值为 2; T_s 为算法迭代的最大次数^[31-32]。

本文将正余弦算法的每个备选解看作是一种气球伪卫星的飞行高度组合, 将备选解的优化迭代过程作为气球伪卫星飞行高度的寻优过程。问题求解的主要步骤如下:

- 1) 初始化备选解集, 形成多套气球伪卫星飞行高度备选方案;
- 2) 计算备选解集中每个备选解的适应度, 即分别计算气球伪卫星按照当前高度飞行可获得的 G_{GDOP} 或 G_{HDOP} ;
- 3) 根据各个备选解的适应度选择当前备选解集的最优解;
- 4) 更新参数 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 ;
- 5) 根据更新后的 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 等参数, 更新当前备选解集中的每个备选解;
- 6) 判断更新后的各个备选解是否超限, 若超限, 则将其调整到合理区间;
- 7) 计算更新后的各个备选解的适应度, 进而根据适应度更新解集的当前最优解;
- 8) 若尚未达到迭代最大次数 T_s , 则转入第 4 步继续优化迭代; 若已经达到迭代最大次数 T_s , 则终止迭代并返回结果。

2.3 规划约束

上述规划过程中, 需要根据高空气球的性能考虑气球伪卫星的飞行高度、飞行空域等条件约束。1) 飞行高度约束。受高空气球材料性能、加工工艺、临近空间大气环境等诸多条件约束, 高空气球的飞行高度不能无限升高, 也不能无限降低。气球伪卫星网络构型规划过程中, 需要将气球伪卫星的高度限制在合理范围内, 对于超出合理飞行高度范围的备选解, 应予以调整或者放弃。2) 飞行空域约束。气球伪卫星只能在预定空域范围内飞行, 规划迭代过程中, 应随时判断气球伪卫星是否处于预定空域范围内, 一旦气球伪卫星飞出预定空域, 则按照其不再继续提供导航服务处理。

3 仿真分析

本文以气球伪卫星和地基伪卫星开展临地协

同区域导航应用为背景进行仿真分析, 仿真工具采用 MATLAB 2018b。

3.1 仿真参数设置

本文部分仿真参数设置如下。

1) 大气模型: 采用美国标准大气模型^[33], 该模型描述了大气温度、压强、密度等参数随高度的变化情况, 为工程设计、科学研究提供了重要参考依据, 已广泛应用于航空航天、气象、大气等领域。

2) 导航服务区域与气球伪卫星飞行空域: 以 $92^{\circ}\text{E}\sim 94^{\circ}\text{E}$ 、 $37^{\circ}\text{N}\sim 39^{\circ}\text{N}$ 为导航服务区域, 气球伪卫星飞行空域与导航服务区域相同, 后文中出现的经度 λ 和纬度 φ 均特指东经和北纬。

3) 预期服务时长与数据采样周期: 以 48 h 为预期服务时长, 以 0.25 h 为数据采样周期。

4) 采样用户均匀分布于导航服务区域内, 经向和纬向每隔 0.1° 设置一个采样用户, 共计 441 个采样用户。

5) 参与临地协同组网的地基伪卫星位置参数如表 1 所示。

表 1 地基伪卫星位置参数

Table 1 Position parameters of ground-based pseudolites

地基伪卫星编号	经度/ $(^{\circ})$	纬度/ $(^{\circ})$	高度/km
1	92.00	37.00	1
2	92.00	38.00	1
3	92.00	39.00	1
4	93.00	37.00	1
5	93.00	38.00	1
6	93.00	39.00	1
7	94.00	37.00	1
8	94.00	38.00	1
9	94.00	39.00	1
10	92.67	37.67	1
11	92.67	38.33	1
12	93.33	37.67	1
13	93.33	38.33	1

6) 经计算, 仅有地基伪卫星的情况下, 导航服务区域的 GDOP 均值为 26.30, HDOP 均值为 0.86。地基伪卫星网络状态分布如图 5 所示, 导航服务区域内 GDOP 值在 0~30 之间, 波动起伏较大, HDOP 值在 0~10 之间。

7) 气球伪卫星仿真参数如表 2 所示。气球伪卫星处于初始位置时, 临地协同伪卫星网络提供

给导航服务区域的 GDOP 均值为 5.14, HDOP 均值为 0.74, 网络初始状态分布如图 6 所示。

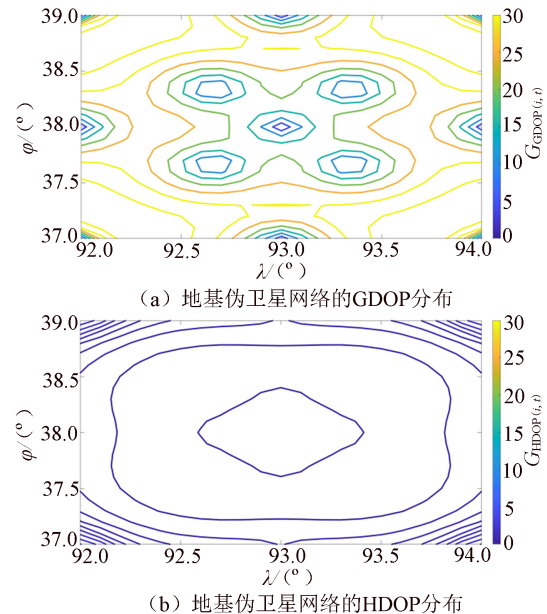


图 5 地基伪卫星网络状态

Fig. 5 State of ground-based pseudolite network

表 2 气球伪卫星仿真参数

Table 2 Simulation parameters of HAB-based pseudolites

参数名称	仿真数值
初始经度/ $(^{\circ})$	93.0
初始纬度/ $(^{\circ})$	37.5
初始飞行高度/km	20.0
最低飞行高度/km	18.0
最高飞行高度/km	22.0
上升速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.6
下降速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.3

对比图 5 (a) 和图 6 (a)、图 5 (b) 和图 6 (b) 可以看到, 服务区域内的 GDOP 最大值从 30 降低至 10 左右, GDOP 均值从 26.30 降低至 5.14, 同时服务区域的 HDOP 分布也有所改善, HDOP 均值从 0.86 降至 0.74, 从而验证了气球伪卫星对地基伪卫星网络几何构型具有较好的改善效果。

3.2 以 GDOP 为评价指标的规划结果

为验证本文算法的有效性, 本节将采用规划算法和不采用规划算法的仿真结果进行对比分析。气球伪卫星飞行高度、气球伪卫星水平飞行轨迹以及预期服务时间内临地协同伪卫星网络 GDOP 均值、伪卫星网络 GDOP 分布变化的对比情况分别如图 7~图 10 所示, 具体统计数据如表 3 所示。若气球伪卫星飞出预定空域范围, 其后续数据将

不在图中显示。图8中“临基1”表示气球伪卫星的初始位置。

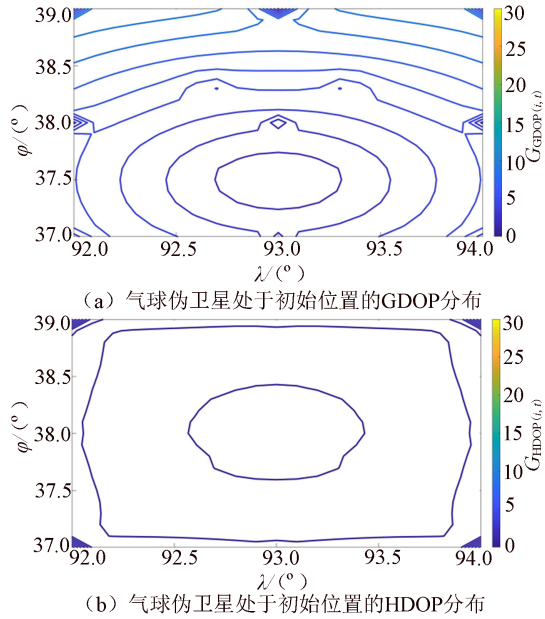


图6 临地协同伪卫星网络初始状态

Fig. 6 Initial state of ground- and nearspace-based cooperation pseudolite network

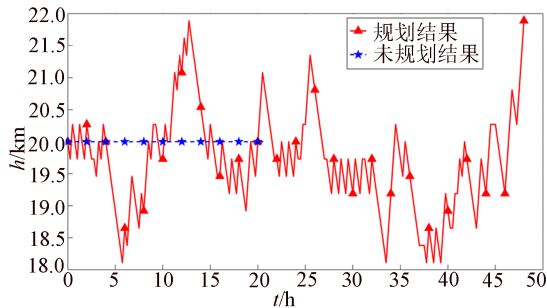


图7 规划与未规划的气球伪卫星飞行高度对比

Fig. 7 Comparison of planned and unplanned HAB-based pseudolite flight altitudes

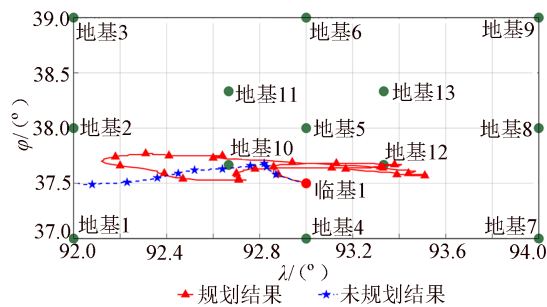


图8 规划与未规划的气球伪卫星水平飞行轨迹对比

Fig. 8 Comparison of planned and unplanned HAB-based pseudolite horizontal flight trajectories

由图7~图9对比分析可知, 本文规划算法充分利用了纬向风速与风向随高度变化的特点, 主动调整气球伪卫星的飞行高度, 进而改变其运动

方向, 既延长了气球伪卫星在服务区域的飞行时间, 又获取了更为有利的伪卫星网络构型。如表3所示, 规划后临地协同伪卫星网络在48 h服务周期内的平均GDOP仅为5.27, 结合图10可以看到, 规划后的伪卫星网络GDOP最大值一般不超过10, 导航定位性能得到较大提升。反观没有采用规划算法的仿真结果, 如图8所示, 尽管气球伪卫星已经选择在风速较低的20 km高度飞行, 但由于纬向风的风向没有发生方向改变, 导致其持续向西飞行, 在服务区域内的驻留时长仅为20.75 h, 在后续大部分时间内未能提供服务, 在预期服务周期内的伪卫星网络GDOP为17.21, 导航定位性能大幅下降。此外, 从图9可以看出, 由于未采用规划算法的气球伪卫星在后期已飞出服务区域, 无法继续提供导航服务, 导致临地协同伪卫星网络构型迅速恶化, 后期网络GDOP均值显著增加。

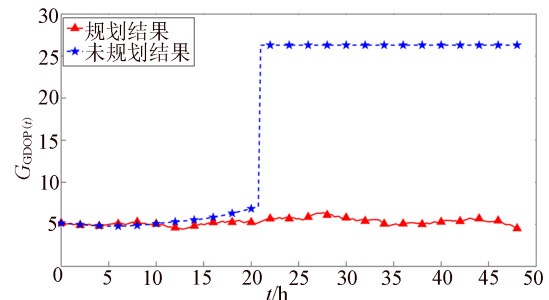


图9 规划与未规划的伪卫星网络平均GDOP对比

Fig. 9 Comparison of planned and unplanned average GDOP of pseudolite networks

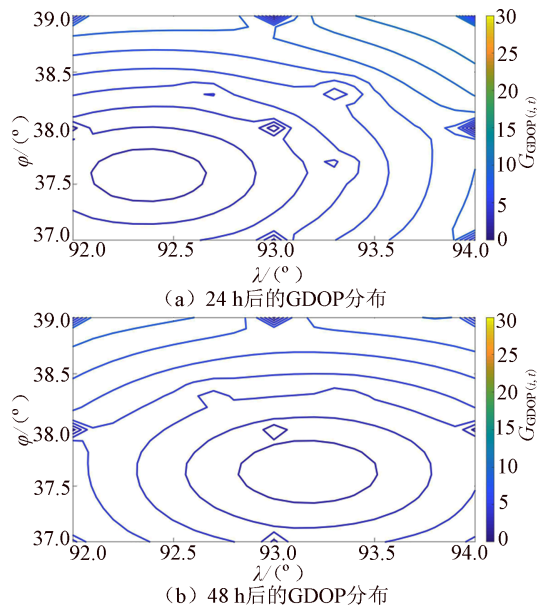


图10 规划结果在不同时刻的伪卫星网络GDOP分布对比

Fig. 10 Comparison of pseudolite network GDOP distributions at different times based on planning results

表 3 采用规划与未规划算法的结果对比
(以 GDOP 为评价指标)

Table 3 Result comparison of planned and unplanned algorithms
(with GDOP as the performance indicator)

是否采用 规划算法	G_{GDOP}	气球伪卫星 服务时长/h
是	5.27	48.00
否	17.21	20.75

3.3 以 HDOP 为评价指标的规划结果

若以 HDOP 为评价指标, 则预期服务时间内的临地协同伪卫星网络 HDOP 均值、伪卫星网络 HDOP 分布变化情况分别如图 11 和图 12 所示, 具体统计数据如表 4 所示。

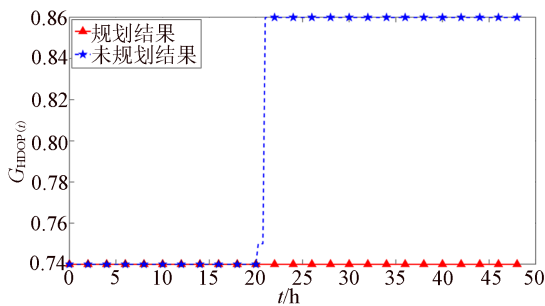


图 11 规划与未规划的伪卫星网络平均 HDOP 对比
Fig. 11 Comparison of planned and unplanned average HDOP of pseudolite networks

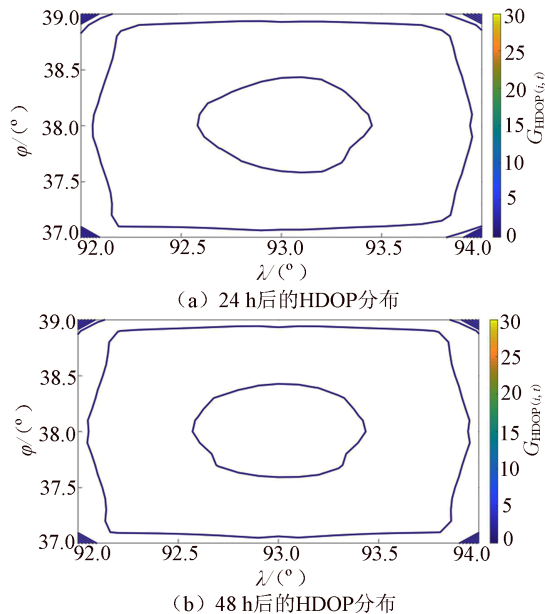


图 12 规划结果在不同时刻的伪卫星网络 HDOP 分布对比
Fig. 12 Comparison of pseudolite network HDOP distributions at different times based on planning results

仿真结果表明, 本文算法在以 HDOP 为评价指标的情况下同样具有良好的规划效果。从图 11

和图 12 可以看出, 规划结果在服务周期内的伪卫星网络平均 HDOP 保持在 0.74 附近, 没有发生大幅退变, 不同区域用户的个体性能差异较小。另外, 从表 4 的数据也可看出, 区域平均 HDOP 从 0.81 降至 0.74, 服务时长从 20.75 h 延长至 48 h, 体现出算法对于气球伪卫星导航服务性能的改善。

表 4 采用规划与未规划算法的结果对比
(以 HDOP 为评价指标)

Table 4 Result comparison of planned and unplanned algorithms
(with HDOP as the performance indicator)

是否采用 规划算法	G_{HDOP}	气球伪卫星 服务时长/h
是	0.74	48.00
否	0.81	20.75

3.4 不同数量地基伪卫星的规划结果

地基伪卫星数量对导航服务性能也存在较大影响, 本节以 GDOP 为评价指标对包含不同数量地基伪卫星的网络性能进行仿真。第一种网络中的地基伪卫星布局同 3.1 节, 共计 13 颗地基伪卫星; 第二种网络仅包含表 1 中的地基伪卫星 1~9, 共计 9 颗地基伪卫星; 第 3 种网络仅包括服务区域顶点和中心的伪卫星, 共计 5 颗地基伪卫星。后 2 种情况的网络初始状态分布分别如图 13 和图 14 所示, 3 种情况的仿真结果对比如图 15 和表 5 所示。

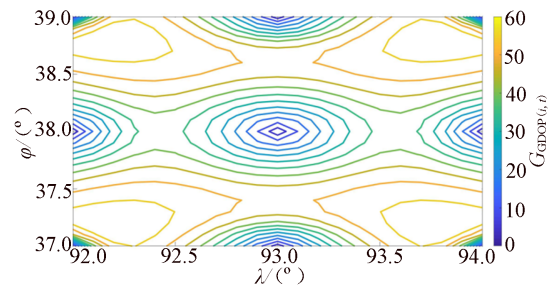


图 13 9 颗地基伪卫星网络的 GDOP 分布
Fig. 13 GDOP distribution of 9 ground-based pseudolites

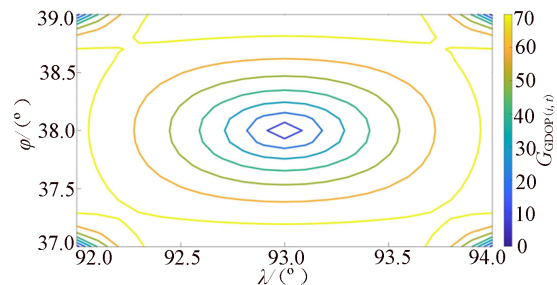


图 14 5 颗地基伪卫星网络的 GDOP 分布
Fig. 14 GDOP distribution of 5 ground-based pseudolites

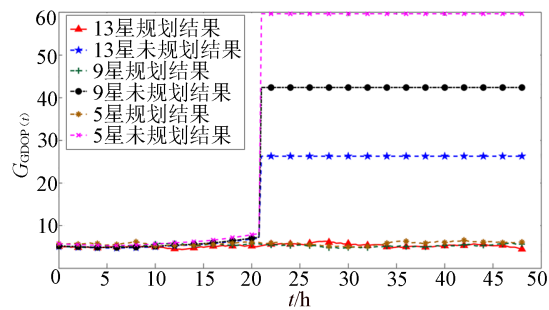


图 15 不同数量的伪卫星网络平均 GDOP 对比
Fig. 15 Comparison of network average GDOP with different numbers of pseudolites

表 5 不同数量地基伪卫星网络的性能对比
Table 5 Performance comparison of networks with different numbers of ground-based pseudolites

地基伪卫星数量	是否采用规划算法	G_{GDOP}	气球伪卫星服务时长/h
13	是	5.27	48.00
13	否	17.21	20.75
9	是	5.33	48.00
9	否	26.36	20.75
5	是	5.80	48.00
5	否	36.38	20.75

由图 5 (a)、图 13~15 对比可得, 在没有气球伪卫星的情况下, 随着地基伪卫星数量从 13 颗减少到 9 颗和 5 颗, 网络平均 GDOP 可从 26.30 增长到 42.40、59.70, 增幅明显, 表明导航服务性能急剧下降。同时, 从表 5 中可以看出, 随着地基伪卫星数量从 13 颗减少到 5 颗, 未采用规划算法的伪卫星网络在服务周期内的平均 GDOP 从 17.21 增加至 36.38, 而在伪卫星网络中补充了气球伪卫星且采取规划算法之后, 3 种情况下的伪卫星网络在服务周期内平均 GDOP 均降至 5.8 以下, 伪卫星网络平均 GDOP 均得到明显改善, 且 3 种情况下的 GDOP 差距显著缩小, 表明在地基伪卫星网络中增加气球伪卫星并对其飞行高度进行控制后, 地基伪卫星数量对网络平均 GDOP 的影响显著减小。

4 结论

本文为改善气球伪卫星和地基伪卫星开展协同导航应用的服务性能, 首先设计了临地协同伪卫星网络几何构型评价指标, 其次构建了伪卫星网络几何构型规划算法, 重点分析了气球伪卫星的飞行轨迹调节策略, 将临地协同伪卫星网络的

几何构型规划问题转化为以气球伪卫星飞行高度的组合规划问题, 并利用正余弦算法进行求解, 最后验证了算法的有效性, 主要结论如下。

1) 将临地协同伪卫星网络的几何构型规划问题转化为以气球伪卫星飞行高度为变量的组合规划问题, 利用正余弦算法进行求解, 可充分利用环境风场在各个维度的变化, 合理规划气球伪卫星的飞行轨迹, 有效延长气球伪卫星的服务时间, 大幅改善临地协同伪卫星网络的服务性能。

2) 在本文仿真条件下, 未经规划的伪卫星网络在预期服务时间内的平均 GDOP 达 17.21, 而规划后伪卫星网络平均 GDOP 可降至 5.27, 改善效果明显。伪卫星网络平均 HDOP 的情况与平均 GDOP 类似, 可从未经规划情况下的 0.81 降低至规划后的 0.74。

3) 在没有气球伪卫星的情况下, 随着地基伪卫星数量的减少, 服务周期内的网络平均 GDOP 急剧增加。而在伪卫星网络中补充了气球伪卫星并进行规划之后, 地基伪卫星的数量对网络平均 GDOP 的影响减小。

未来, 可在实际飞行试验中对本文算法开展进一步的验证与优化, 以期更加贴近气球伪卫星的实际工况, 从而满足高空气球在导航领域中的应用需求。

参考文献

[1] 唐文杰, 陈俊平. 伪卫星系统关键技术发展及其应用[J]. 世界科技研究与发展, 2023, 45(3): 276-284.
TANG W J, CHEN J P. Key technology development and application of pseudolite system[J]. World Sci-Tech R&D, 2023, 45(3): 276-284.

[2] 黄璐, 蔚保国, 李宏生, 等. GNSS 拒止环境下的伪卫星指纹定位方法[J]. 电子学报, 2022, 50(4): 811-822.
HUANG L, YU B G, LI H S, et al. Pseudolite fingerprint positioning method under GNSS rejection environment[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(4): 811-822.

[3] 范曹明. 高精度伪卫星系统关键技术研究与应用[J]. 测绘学报, 2024, 53(2): 396.
FAN C M. Research and application of key technologies for high accuracy pseudolite system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2024, 53(2): 396.

[4] 呼玮, 杨建军, 何苹. 基于临近空间飞艇定位的伪卫星布局研究[J]. 无线电工程, 2009, 39(10): 24-

27.
HU W, YANG J J, HE P. Study on pseudolite configuration scheme based on near space airships [J]. Radio Engineering, 2009, 39(10): 24-27.
- [5] TIWARY K, BEHERA S, SHARADA G, et al. Modeling and simulation of pseudolite-based navigation: a GPS-independent radio navigation system [J]. Defence Science Journal, 2010, 60(5): 541-550.
- [6] 杨一, 高社生, 阎海峰. 临近空间伪卫星几何布局方案设计[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(3): 532-538.
YANG Y, GAO S S, YAN H F. Design on geometric configuration schemes of pseudolite in near space[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(3): 532-538.
- [7] BELLEMARE M G, CANDIDO S, CASTRO P S, et al. Autonomous navigation of stratospheric balloons using reinforcement learning[J]. Nature, 2020, 588(7836): 77-82.
- [8] JIANG Y, LYU M Y, LI J. Station-keeping control design of double balloon system based on horizontal region constraints[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 100: 105792.
- [9] 林康, 马云鹏, 郑泽伟, 等. 基于副气囊的平流层浮空器高度控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(5): 762-770.
LIN K, MA Y P, ZHENG Z W, et al. Height control of stratospheric aerostat based on secondary airbag[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(5): 762-770.
- [10] 邓小龙, 杨希祥, 朱炳杰, 等. 智能平流层浮空器 Loon 关键技术分析与仿真[J]. 航空学报, 2023, 44(8): 28-44.
DENG X L, YANG X X, ZHU B J, et al. Simulation research and key technologies analysis of intelligent stratospheric aerostat Loon[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(8): 28-44.
- [11] 周文炯, 尚建忠, 王文政, 等. 分布式高空气球通信网络功率分配算法[J]. 电讯技术, 2021, 61(8): 965-970.
ZHOU W J, SHANG J Z, WANG W Z, et al. A power allocation algorithm for distributed aerostat networks[J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(8): 965-970.
- [12] ZUIDERVELD K. Contrast limited adaptive histogram equalization[M]//Graphics Gems. Amsterdam: Elsevier, 1994: 474-485.
- [13] ZHANG J Q, CHEN H B, DU Y F, et al. Stratospheric balloon-based dropsonde technology: development and preliminary assessment over the Tibetan plateau[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2021, 14(3): 100039.
- [14] 王梓皓, 姜毅, 黄宛宁, 等. 基于气球平台的临近空间环境原位探测技术研究[J]. 空天技术, 2023(4): 70-79.
WANG Z H, JIANG Y, HUANG W N, et al. Research on in-situ detection technology of near space environment[J]. Aerospace Technology, 2023(4): 70-79.
- [15] 宫常青, 吴晓联, 刘勇. 近地空间伪卫星定位系统浮空器节点构型分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, 12(2): 125-128.
GONG C Q, WU X L, LIU Y. Analysis of airships nodes configuration in near-space navigation and positioning system[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 12(2): 125-128.
- [16] 高社生, 赵飞, 谢梅林. 临近空间伪卫星独立组网几何布局研究[J]. 导航定位学报, 2013, 1(4): 21-25.
GAO S S, ZHAO F, XIE M L. Research on the geometric configuration scheme of near space pseudolite-only positioning system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013, 1(4): 21-25.
- [17] 王玮, 刘宗玉. 伪卫星空中基站的定位算法研究[J]. 宇航计测技术, 2010, 30(1): 15-19.
WANG W, LIU Z Y. The positioning algorithm for airborne pseudolites[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2010, 30(1): 15-19.
- [18] 段晨浩. 基于空基伪卫星高精度定位技术研究[D]. 北京: 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2021: 23-33.
DUAN C H. Research on high precision positioning technology based on space based pseudolite[D]. Beijing: China Academy of Electronics and Information Technology, 2021: 23-33.
- [19] 党进伟, 高社生, 张极. 伪卫星协同编队控制与仿真[J]. 测控技术, 2013, 32(11): 76-79, 83.
DANG J W, GAO S S, ZHANG J. Control and simulation of collaborative formation for pseudolites [J]. Measurement & Control Technology, 2013, 32(11): 76-79, 83.
- [20] 芦鑫元. 面向无人机进场的伪卫星布局与定位仿真技术[J]. 现代导航, 2021, 12(3): 174-178.
LU X Y. Simulation technology on pseudolites layout and position for UAV approach[J]. Modern Navigation, 2021, 12(3): 174-178.
- [21] SONG J C, HOU C P, XUE G X, et al. Study

- of constellation design of pseudolites based on improved adaptive genetic algorithm[J]. *Journal of Communications*, 2016, 11(9): 879-885.
- [22] LI D P, DENG P K, LIU B, et al. Research on the dynamic configuration of air-based pseudolite network[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings: Volume II. Berlin: Springer, 2015: 357-367.
- [23] TANG W J, CHEN J P, YU C, et al. A new ground-based pseudolite system deployment algorithm based on MOPSO[J]. *Sensors*, 2021, 21(16): 5364.
- [24] BLACKMORE L, KUWATA Y, WOLF M T, et al. Global reachability and path planning for planetary exploration with Montgolfier balloons[C]//2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 3581-3588.
- [25] DROB D P, EMMERT J T, CROWLEY G, et al. An empirical model of the earth's horizontal wind fields: HWM 07[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, 113(A12): 2008JA013668.
- [26] TANG Q, ZHOU Y F, DU Z T, et al. A comparison of meteor radar observation over China region with horizontal wind model (HWM 14) [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(1): 98.
- [27] 耿丹, 赵增亮, 万黎, 等. 冬季西北地区临近空间气象火箭探测数据分析[J]. *空间科学学报*, 2022, 42(3): 396-402.
- GENG D, ZHAO Z L, WAN L, et al. Analysis of data from near space meteorological rocket sounding in northwest China in winter[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(3): 396-402.
- [28] 鲜勇, 郭靖, 任乐亮, 等. 无人机航迹规划智能算法研究综述[J]. *火箭军工程大学学报*, 2025, 39(1): 106-121.
- XIAN Y, GUO J, REN L L, et al. Review of intelligent algorithms for unmanned aerial vehicle trajectory planning[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*, 2025, 39(1): 106-121.
- [29] 张志利, 刘瑾, 周召发, 等. 基于沙猫群优化算法和BP模型的光纤陀螺温度补偿研究[J]. *火箭军工程大学学报*, 2024, 38(4): 54-60, 67.
- ZHANG Z L, LIU J, ZHOU Z F, et al. A fiber optic gyroscope temperature compensation method based on SCSO-BP model[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*, 2024, 38(4): 54-60, 67.
- [30] MIRJALILI S. SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2016, 96: 120-133.
- [31] 李聪, 刘昊, 赵雨薇. 融合学习差异与Lévy飞行的动态平衡正弦余弦算法[J]. *辽宁科技大学学报*, 2024, 47(3): 233-240.
- LI C, LIU H, ZHAO Y W. Dynamic balance sine cosine algorithm combining learning difference with Lévy flight[J]. *Journal of University of Science and Technology Liaoning*, 2024, 47(3): 233-240.
- [32] 汤骏杰, 王联国. 一种螺旋更新的正弦余弦算法[J]. *计算机与数字工程*, 2024, 52(9): 2583-2589.
- TANG J J, WANG L G. A spiral update sine cosine algorithm[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2024, 52(9): 2583-2589.
- [33] National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, United States Air Force. U.S. Standard Atmosphere, 1976[M]. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, 1976: 1-20.

Ground- and Nearspace-Based Pseudolites Network Geometry Configuration Planning in Regional Navigation by Cooperation

QU Yi¹, WANG Sheng¹, FENG Hui¹, LUO Haibo^{1,2},
LIU Qiang¹, LI Cuichun¹

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Key Laboratory of Earth Observation of Hainan Province, Hainan Aerospace Information Research Institute, Wenchang 571300, China)

ABSTRACT: A nearspace-based cooperation pseudolite network geometry configuration planning algorithm was proposed to improve the regional navigation service performance provided by the cooperation of

ground- and high altitude balloon (HAB)-based pseudolites. First, a pseudolite network geometry configuration performance indicator was designed based on geometric and horizontal dilations of precision in application scenarios of regional navigation by nearspace-based cooperation. Subsequently, the kinematic characteristics of HAB-based pseudolites and environmental wind field characteristics of nearspace were analyzed, and a HAB-based pseudolite trajectory adjustment strategy of actively changing flight altitudes and utilizing environmental wind field was constructed. Finally, a pseudolite network geometry configuration planning algorithm based on sine-cosine algorithm was proposed, with its constraints discussed and verified through simulations. The simulation results show that the proposed algorithm can effectively exploit the variation of environmental wind field with spatio-temporal conditions, and reasonably plan the flight trajectory of HAB-based pseudolites, thereby extending the service duration. It improves the geometric and horizontal accuracy factors of nearspace-based cooperation pseudolite networks, thereby optimizing the navigation service performance of pseudolite networks and providing technical references for the application of HAB-based pseudolites in navigation.

KEYWORDS: pseudolite; network configuration planning; sine-cosine algorithm; geometric dilation of precision

(编辑: 刘建民)