

引用格式: ZHAO Taifei, YAO Jiatong, LIU Yang, et al. A Wireless UV-assisted Secret Communication Coverage Method for UAV[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(2):0206005

赵太飞,姚佳彤,刘阳,等.一种无线紫外光协助的无人机隐秘通信覆盖方法[J].光子学报,2023,52(2):0206005

一种无线紫外光协助的无人机隐秘通信 覆盖方法

赵太飞,姚佳彤,刘阳,郑博睿

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘要:建立机载无线紫外光非直视通信模型与无人机覆盖模型,引入三种相对虚拟力,提出一种基于相对距离的改进虚拟力覆盖算法控制无人机移动,仿真分析了不同场景下算法的性能以及紫外光通信角度对算法覆盖率影响。仿真结果表明,所提算法减小了无效覆盖以及重叠覆盖,相比随机部署算法、贪婪虚拟力算法和移动部署算法的覆盖率分别提高了 18.33%, 3.15% 和 1.83%,并减小了无人机的能量消耗。

关键词:无人机;无线紫外光通信;区域覆盖;虚拟力;隐秘通信

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20235202.0206005

0 引言

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)具有生存能力强、机动性好、隐蔽性高、成本低等特点,在跟踪定位、情报侦查、战场搜索等军事领域中应用广泛^[1]。随着战场形态逐渐趋向信息化,无人机开始作为空中基站对地面用户进行网络覆盖^[2],为构建战时应急无线通信覆盖网络提供可靠支撑。

无人机部署位置优化是利用无人机作为空中基站构建无线通信网络时面临的一个重要问题^[3]。如何通过优化无人机的位置为地面用户提供通信覆盖以满足路径损耗、最大覆盖率等要求,国内外学者对此提出了多种算法解决无人机基站部署问题,最常见的有聚类算法^[4-5]、启发式算法^[6-8]、学习算法^[9-10]等。文献[4]提出了一种椭圆聚类算法,通过调整天线的发射功率和位置,以最小的传输功率避免用户间的干扰并最大化无人机的覆盖概率。文献[5]提出了一种基于用户带宽需求的k均值聚类算法,通过对地面用户进行聚类以确定无人机的二维坐标,最小化无人机部署时延的同时减小无人机的数量。上述算法比较简单快速,但求解结果容易依赖初值,仅能求出局部最优解。文献[6]提出了一种基于粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)的三维定位算法,通过在有限边界中利用粒子群搜索空间估计目标无人机的位置。文献[7]提出一种基于改进遗传算法求解三维无人机基站部署问题,将问题分别解耦为垂直纬度和水平纬度,首先基于空对地信道模型确定无人机的最佳垂直高度,其次通过改进遗传算法获取无人机的最佳水平位置。文献[8]提出一种基于甲虫搜索的改进 PSO 算法优化无人机辅助通信网络,利用甲虫搜索算法的个体寻优优势,对传统 PSO 算法进行改进,以改善无人机辅助网络的通信服务质量。上述启发式算法易于实现,并且可以获得问题最优解,但是算法收敛速度较慢,不适用于移动场景。文献[9]在保证地面终端服务质量的前提下,提出一种基于强化学习的多地面终端分组方法优化无人机的 3D 位置和发射功率以部署最少数量的无人机。文献[10]提出了一种基于 Q-learning 的部署算法,让每一架无人机都充当一个代理,通过反复学习来确定自己的三维部署位置。学习算法可以实时学习地面用户的需求,进而控制无人机的部署,但是

基金项目:国家自然科学基金(No. 61971345),陕西省教育厅科研计划项目(No. 17-JF024),陕西省重点研发计划一般项目(No. 2021GY-044),榆林市科技计划项目(No.2019-145)

第一作者(通讯作者):赵太飞, zhaotaifei@163.com

收稿日期:2022-09-01;录用日期:2022-09-28

<http://www.photon.ac.cn>

前期需要大量的数据进行训练,导致算法开销较大。因此,为了解决传统部署算法实时性不高、计算开销大等缺点,研究者^[11]将虚拟力的概念引入无人机部署位置优化问题中,即无人机根据所处环境构造目标方位的引力场和障碍物的斥力场,使无人机向着虚拟引力和虚拟斥力的合力方向运动,可以实时的对无人机进行部署,但传统的虚拟力算法存在一定缺陷,如存在覆盖空洞、功耗过大的问题,文献^[12]提出了改进虚拟力算法,在保持较低能耗的前提下提高网络覆盖率,并加快收敛速度,使节点到达平衡状态。

在强电磁干扰、“电磁静默”等复杂军事环境下,传统的无线通信方式容易被敌方干扰和窃听,而有线通信需要提前铺设电缆,不易用于复杂、动态多变的军事环境。复杂电磁环境下的无线通信是目前的主要研究热点之一,为了更好的满足复杂军事场景的通信需求,采用一种新型的通信方式来提高通信时的抗干扰性和地形适应性是非常有必要的。量子通信技术通过光纤通信或卫星网络等信道中的量子网络进行量子信息交换,通过密钥对信息进行加密处理,利用量子纠缠技术可以准确提取信息并有效防止敌方窃听^[13]。卫星互联网通过多星组网的方式实现对地球表面的全覆盖,并为用户提供互联网接入服务。卫星互联网具有覆盖方位广,环境适应性强等优点,可以为受到网络攻击的己方提供互联网服务,是一种能够完成向终端用户提供互联网接入的新型通信网络^[14]。无线紫外光通信主要是利用大气中臭氧层对“日盲”波段(200~280 nm)紫外光的散射进行数据传输^[15],因此,无线紫外光通信具有背景噪声小,抗干扰能力强、数据传输保密性高、低功耗,便于机载、可进行非直视通信^[16]等特点,能够为复杂环境中无人机与用户间提供可靠的隐秘通信。

为了提升复杂军事环境中无人机部署位置优化问题,本文将结合紫外光单次散射通信模型和虚拟力算法,提出一种基于相对距离的改进虚拟力算法(Improved Virtual Force Algorithm Based on Relative Distance, IVFA-RD)进行多无人机目标区域覆盖中的位置优化问题,解决目标区域覆盖率低、无人机部署能耗大的问题,最后通过仿真对算法性能进行分析。

1 系统模型

针对战况激烈导致近距离基站损毁、因作战区域影响难以架设基站等场景造成的通信瘫痪问题,使用无人机作为空中基站通过自主移动构成空中基站对地面用户进行通信覆盖,达到改善通信质量和保障作战信息的隐秘传输的目的。如图1所示,无人机悬停在一定高度为尽可能多的用户提供通信服务,无人机以其在地面上的投影为中心,以覆盖范围为半径,在其半径范围内的用户认为被覆盖,反之则不在。

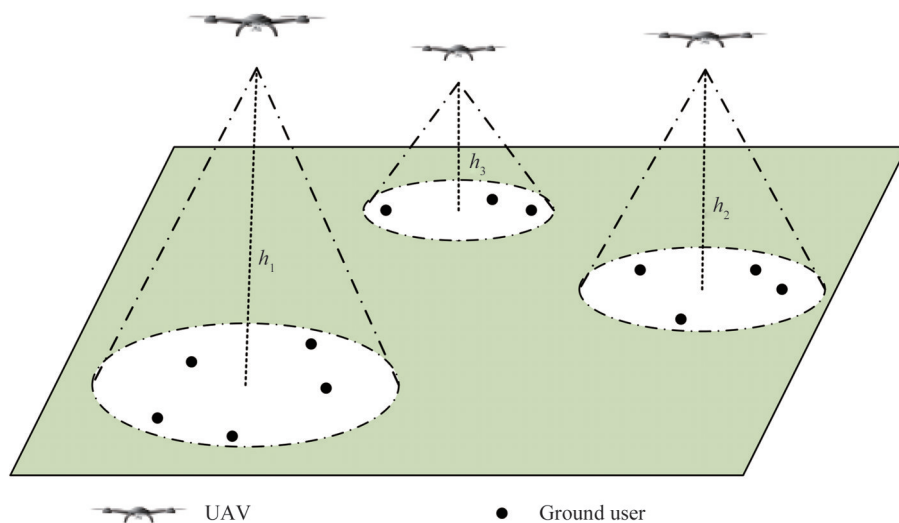


图1 无人机基站覆盖场景示意图

Fig.1 Schematic diagram of coverage scenario of UAV base station

1.1 机载无线紫外光非直视通信模型

根据收发端是否对准,紫外光通信分为直视通信(Line-of-Sight, LOS)和非直视通信(Non-Line-of-Sight, NLOS)两类^[17],在复杂的动态环境中,无人机和地面用户很难保证时刻对准,因此本文只考虑紫外光NLOS通信。紫外光NLOS通信系统具有全方位性、收发端无需对准、地形适应性强等特点,且由于大气的

吸收和散射特性,光子每被散射一次其携带的能量就会减少,因此本文以紫外光非直视单次散射链路模型作为研究对象。机载无线紫外光非直视通信模型如图2所示,其中 r 是收发端的间距, r_1 和 r_2 分别是发射端和接收端到公共散射体的距离, ϕ_R 是接收视场角, ϕ_T 是发送端的发散角, θ_R 和 θ_T 是收发仰角, θ_s 是散射角, V 是有效散射体, h 是无人机的飞行高度, R 是无人机的覆盖半径。当 θ_R 和 θ_T 都小于 90° 时属于无线紫外NLOS(c)类通信,该类通信方式能够获取较高的信道带宽和较小的信道时延且具有较强的方向覆盖性,更适合作为机载通信覆盖模型使用。

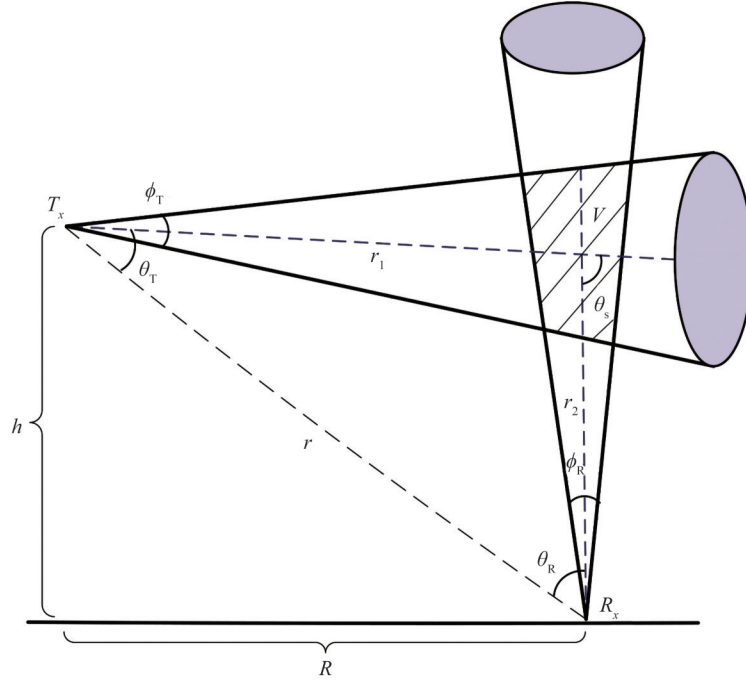


图2 机载无线紫外光非直视单次散射通信模型

Fig.2 Airborne wireless ultraviolet NLOS scattering communication model

由图2可知,无线紫外光非直视通信的过程为:无人机作为发送端 T_x 以发射功率 P_t 向空间发射紫外光信号,光信号经有效散射体 V 的散射后,地面用户作为接收端 R_x 对光信号进行接收。因此,无线紫外光NLOS单次通信散射的过程可以划分为三部分:发送端 T_x 到有效散射体 V 的路径 r_1 可作为LOS链路处理;紫外光光子在有效散射体 V 中进行散射;从散射体 V 到接收端 R_x 的路径 r_2 同样可以看作一条LOS链路。其接收光功率 $P_{r, \text{NLOS}}$ 可以表示为^[18]

$$P_{r, \text{NLOS}} = \left(\frac{P_t}{\Omega_1} \right) \left(\frac{e^{-K_e r_1}}{r_1^2} \right) \left(\frac{K_s}{4\pi} P_s V \right) \left(\frac{\lambda}{4\pi r_2} \right)^2 \exp(-K_e r_2) \left(\frac{4\pi A_r}{\lambda^2} \right) \quad (1)$$

式中, P_t 是发射功率, Ω_1 是发送立体角且 $\Omega_1 = 2\pi[1 - \cos(\phi_1/2)]$, $\theta_s = \theta_1 + \theta_2$, P_s 为 θ_s 的相函数, $r_1 = r \sin \theta_2 / \sin \theta_s$, $r_2 = r \sin \theta_1 / \sin \theta_s$, A_r 是接收孔径面积, $K_e = K_s + K_a$ 是散射衰减系数, K_s 为大气散射系数, K_a 为吸收系数, $V \approx r_2 \phi_2 r^2$,将上述表达式代入式(1)得

$$P_{r, \text{NLOS}} = \frac{P_t A_r K_s P_s \phi_R \phi_T^2 \sin(\theta_T + \theta_R)}{32\pi^3 r \sin \theta_T (1 - \cos \frac{\phi_T}{2})} \exp \left[\frac{-K_e r (\sin \theta_T + \sin \theta_R)}{\sin(\theta_T + \theta_R)} \right] \quad (2)$$

式中, r 是收发端之间的间距。

在紫外光NLOS通信中,路径损耗是指发射功率与接收功率的比值,因此紫外光NLOS通信的路径损耗为

$$L_{\text{NLOS}} = \frac{P_t}{P_r} = \frac{32\pi^3 r \sin \theta_T (1 - \cos(\phi_T/2))}{A_r K_s P_s \phi_R \phi_T^2 \sin(\theta_T + \theta_R)} \exp \left[\frac{K_e r (\sin \theta_T + \sin \theta_R)}{\sin(\theta_T + \theta_R)} \right] \quad (3)$$

但在实际的近距离通信过程中, r 一般小于 1 km, 因此路径损耗可以简化为^[19]

$$L_{\text{NLOS}} = \xi r^\alpha \quad (4)$$

式中, ξ 为路径损耗因子, α 为路径损耗指数, 两者均是和收发仰角有关的参数。

根据紫外光 NLOS 接收光功率表达式(3), 可以变形为

$$\begin{cases} a = \frac{P_t A_r K_s P_s \phi_R \phi_T^2 \sin(\theta_T + \theta_R)}{32\pi^3 \sin \theta_T \left(1 - \cos \frac{\phi_T}{2}\right)} \\ z = \frac{K_e (\sin \theta_T + \sin \theta_R)}{\sin(\theta_T + \theta_R)} \end{cases} \quad (5)$$

把式(5)带入式(3)后, 将其转换为 $f(w) = w \cdot \exp(w)$ 的形式得

$$z r e^{zr} = \frac{az}{P_r} \quad (6)$$

根据 lambertw 函数可得紫外光 NLOS 通信链路中收发端间距为

$$r = \frac{\text{lambertw} \left(\frac{P_t A_r K_s P_s \phi_R \phi_T^2 K_e (\sin \theta_T + \sin \theta_R)}{P_{r, \text{NLOS}} 32\pi^3 \sin \theta_T \left(1 - \cos \frac{\phi_T}{2}\right)} \right)}{\frac{K_e (\sin \theta_T + \sin \theta_R)}{\sin(\theta_T + \theta_R)}} \quad (7)$$

对于紫外光 NLOS(c)类通信模型, 无线紫外光通信网络中节点覆盖范围的近似计算公式为^[20]

$$R = \sqrt{(r \cos \theta_T)^2 + \left(r \sin \theta_T + \frac{r \cos \theta_T \cos(\phi_R/2)}{\cos(\theta_T + \phi_R/2)} \right)^2} \quad \phi_R \geq \phi_T \quad (8)$$

$$R = \left| \sin \frac{\phi_R}{2} \left| \frac{r \cos \theta_T \cos(\phi_R/2)}{\cos(\theta_T + \phi_R/2)} + \frac{r \sin \theta_T \cos \theta_R}{\sin(\theta_T + \theta_R)} \right| \right| \quad \phi_R < \phi_T \quad (9)$$

根据几何定理, 可以推算出无人机的飞行高度为

$$h = \sqrt{r^2 - R^2} \quad (10)$$

为了保证地面用户的通信服务质量, 要求地面用户的接收功率要大于阈值 P_{th} , 当发射功率一定时, 也就是要求地面用户与无人机通信时的路径损耗必须小于最大可接受路径损耗 L_{th} 才能保证通信, 对于最大可接受路径损耗 L_{th} , 对应一个最大的覆盖半径 R , 此时无人机的覆盖区域是一个半径为 R 的圆形区域, 在该半径区域内所有地面用户与无人机通信的路径损耗都小于阈值 L_{th} 。

1.2 无人机覆盖模型

假设在部署初期有 m 架无人机随机的分布在目标区域的上空, 目标区域中存在 n 个用户, 每架无人机的覆盖半径为 R , 感知半径为 R_s , 单架无人机的覆盖模型如图 3 所示, 当目标区域中第 j 个用户的位置 $S_j(x_j, y_j)$ 与第 i 架无人机在地面上的投影点 $V_i(x_i, y_i)$ 之间的欧式距离 $d(V_i, S_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ 小于覆盖半径 R 时, 则认为该用户被覆盖的概率为 1。假设无人机的通信负载能力足够大, 以无人机在地面的投影点为中心, 以半径为 R 的圆形区域内的所有用户都可以被该无人机覆盖, 否则认为该节点未被覆盖。因此, 地面用户的覆盖概率 $P(V_i, S_j)$ 可以表示为

$$P(V_i, S_j) = \begin{cases} 1 & d(V_i, S_j) \leq R \\ 0 & d(V_i, S_j) > R \end{cases} \quad (11)$$

实际上, 一个用户同时有可能被多架无人机覆盖, 因此使用 $C(U, S_j)$ 作为用户 S_j 的覆盖指标, 当 $C(U, S_j) = 1$ 表示用户已被任意无人机覆盖, 它满足

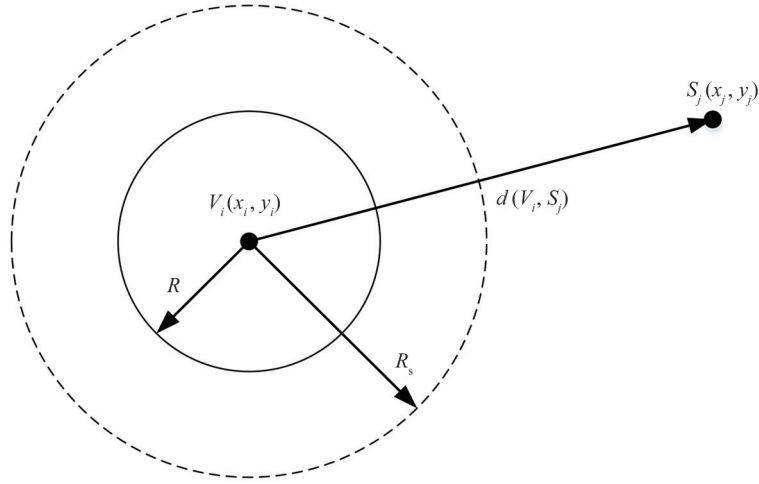


图3 单架无人机覆盖模型
Fig.3 Coverage model of single UAV

$$C(U, S_j) = \bigcup_{b \in U} P(b, S_j) \quad (12)$$

式中, U 是 m 架无人机位置的一个子集, b 表示 U 中的每架无人机。

汇总所有地面用户的覆盖指标, 最终的覆盖率定义为

$$C_{\text{cov}}(U) = \frac{\sum_{j=1}^n C(U, S_j)}{n} \quad (13)$$

综上, 无人机的覆盖部署问题可以表示为

$$\begin{aligned} & \max C_{\text{cov}} \\ & \text{s.t. } U \in \{V_i | i = 1, 2, \dots, m\} \\ & L \leq L_{\text{th}} \end{aligned} \quad (14)$$

为了方便后续研究, 提出以下假设:

- 1) 无人机需要覆盖的目标区域信息是已知的。
- 2) 地面用户选择与其路径损耗最小的无人机进行连通。
- 3) 无人机可以与通信半径 R_c 内的无人机通信, 并获取对方的位置信息; 无人机可以与覆盖半径 R 内的地面用户建立紫外光通信链路, 并能感知到半径 R_s 范围内的用户存在, 其中 $R_c = R_s = 2R$ 。

2 基于相对距离的虚拟力覆盖算法

物理学知识表明, 两个原子之间的距离决定了它们之间的作用力是正作用力还是负作用力。本文利用这一思想, 引入虚拟力的概念, 讨论了无人机部署位置优化问题。在本文的部署算法中, 每架无人机的运动将受到三种相对距离的影响: 无人机之间的相对距离、无人机与地面用户间的相对距离、无人机与障碍物间的相对距离, 因此, UAV_i 所受到三种相对虚拟力的合力为

$$F_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m F_{ij} + \sum_{s=1}^n F_{is} + F_{ib} \quad (15)$$

式中, m 表示目标区域中无人机的数量, n 表示目标区域中用户的数量, F_{ij} 表示 UAV_i 和 UAV_j 间的相对虚拟力, F_{is} 表示 UAV_i 与地面用户间的相对虚拟力, F_{ib} 表示 UAV_i 与障碍物间的相对虚拟力。

1) 无人机之间的相对虚拟力

图4给出了两种无人机覆盖的最佳距离示意图, 其中图4(a)是无重叠覆盖, 无人机间的最佳部署距离 $d_{\text{od}} = 2R$, 适合无人机数量较小时的情况; 图4(b)是无盲区覆盖, 无人机间的最佳部署距离 $d_{\text{od}} = \sqrt{3}R$, 适合无人机数量较多时的情况。

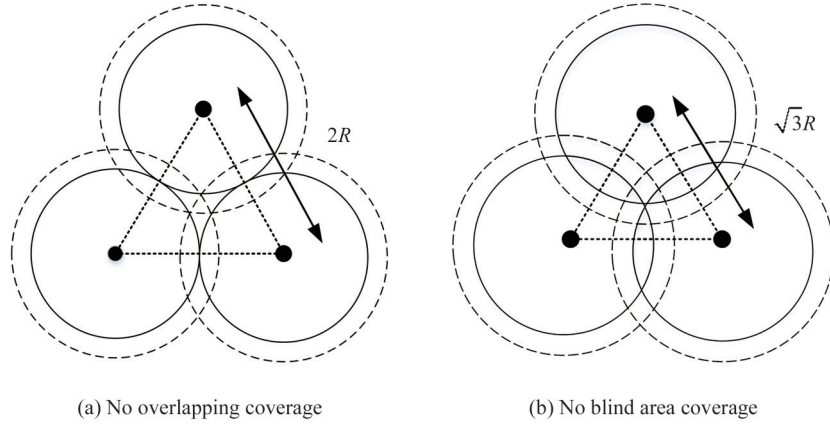


图4 无人机间的最佳距离
Fig.4 Optimal distance between UAVs

假设每架无人机之间的作用力为 F_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, m$), 当无人机之间的距离 d_{ij} 小于最佳部署距离 d_{od} 时产生相对斥力 F_{ijN} ($i, j = 1, 2, \dots, m$), 当无人机之间的距离大于最佳部署距离 d_{od} 且小于无人机通信半径 R_c 时产生相对引力 F_{ijP} ($i, j = 1, 2, \dots, m$), 具体表示为

$$F_{ij} = \begin{cases} 0 & d_{ij} > R_c \\ F_{ijP} = (\lambda(d_{ij} - d_{od}), \theta_{ij}) & d_{od} < d_{ij} \leq R_c \\ 0 & d_{ij} = d_{od} \\ F_{ijN} = (\delta(d_{od} - d_{ij}), \omega_{ij}) & d_{ij} < d_{od} \end{cases} \quad (16)$$

式中, θ_{ij} 和 ω_{ij} 是 UAV_i 到 UAV_j 之间的方向角, $\theta_{ij} = \pi + \omega_{ij}$, λ 是引力参数, δ 是斥力参数, 具体表示为^[21]

$$\lambda = d_{od} - d_{ij} \quad (17)$$

$$\delta = m \sqrt{a^2 + b^2} \quad (18)$$

式中, a, b 分别表示目标区域的长和宽。

2) 无人机与未被覆盖用户间的相对虚拟力

当地面用户 S_j 与无人机 UAV_i 在地面投影点的距离 d_{is} 大于无人机的覆盖半径 R 且小于无人机的感知半径 R_s , 此时无人机能感应到地面用户的存在, 但彼此建立不了通信, 此时无人机受到地面用户的相对引力 F_{is} ($i = 1, 2, \dots, m, s = 1, 2, \dots, n$), 具体表示为

$$F_{is} = \begin{cases} (\lambda(d_{is} - R), \alpha_{is}) & R < d_{is} < R_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

式中, α_{is} 表示 UAV_i 到 S_j 之间的方向角。

3) 无人机与障碍物间的相对虚拟力

在实际的工作任务中, 目标区域往往存在障碍物, 为了避免无人机产生无效覆盖, 目标区域往往被限制在固定的范围中, 一旦无人机接近障碍物或位置超出边界范围, 则产生第三种相对虚拟力 F_{ib} ($i = 1, 2, \dots, m$), 当无人机与障碍物或目标区域边界的距离 $d_{ib} \geq d_{od}/2$, 虚拟力 F_{ib} 对无人机没有影响, 当无人机与障碍物或目标区域边界的距离 $d_{ib} < d_{od}/2$, 虚拟力 F_{ib} 将推动无人机远离障碍物或目标区域的边界, 具体表达式为

$$F_{ib} = \begin{cases} \left(\delta \left(\frac{d_{od}}{2} - d_{ib}, \alpha_{ib} + \pi \right) \right) & d_{ib} < \frac{d_{od}}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

式中, α_{ib} 是 UAV_i 到障碍物之间的方向角。

4) 无人机位置更新

对于任意无人机 UAV_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 根据式 (15) 可以计算得到经过 k 轮运动后所受的合力

$F_{ik} (k \geq 1)$, 当无人机受到合力的绝对值小于等于给定的最小正数 τ , 即 $\max[\|F_{1k}\|, \|F_{2k}\|, \dots, \|F_{mk}\|] \leq \tau$, 表明目标区域中的无人机都移动到了合适的位置, 可以终止无人机移动, 完成无人机的覆盖部署任务, 否则无人机 UAV_{*i*} 将从原位置 $(x_i^{\text{old}}, y_i^{\text{old}})$ 移动到新位置 $(x_i^{\text{new}}, y_i^{\text{new}})$, 位置更新为

$$\begin{cases} x_i^{\text{new}} = x_i^{\text{old}} + \frac{F_{ix}}{F_i} \times \text{maxdis} \times e^{(-1/F_i)} \\ y_i^{\text{new}} = y_i^{\text{old}} + \frac{F_{iy}}{F_i} \times \text{maxdis} \times e^{(-1/F_i)} \end{cases} \quad (21)$$

式中, F_{ix} 和 F_{iy} 分别代表合力在 x 轴和 y 轴的分量, maxdis 为预定义无人机的最大移动步长。

综上, 基于相对距离的改进虚拟力区域覆盖算法的具体步骤为:

步骤 1: 初始化: $k=0$; 设置目标区域大小 $a \times b$ 、用户数量 n 、无人机数量 m 、路径损耗阈值 L_{th} 、无人机覆盖半径 R 、感知半径 R_s 与通信半径 R_c 、无人机间最佳部署距离 d_{od} 、无人机最大移动步长 maxdis、算法最大迭代次数 k_{max} 等参数;

步骤 2: 无人机和地面用户随机部署在目标区域, 根据随机部署的位置计算无人机间的相对距离、无人机与未被覆盖用户间的相对距离、无人机与障碍物或区域边界间的相对距离;

步骤 3: 通过式(16)~(20)分别计算无人机间的相对虚拟力, 无人机与未被覆盖地面用户间的相对虚拟力, 无人机与障碍物或目标区域边界间的相对虚拟力; 根据式(15)计算 m 架无人机的合力: $F_{1k}, F_{2k}, \dots, F_{mk}$;

步骤 4: 当 $\max[\|F_{1k}\|, \|F_{2k}\|, \dots, \|F_{mk}\|] \leq \tau$ 无人机停止移动, 转步骤 7; 否则, 转步骤 5;

步骤 5: 根据式(21)更新无人机位置;

步骤 6: $k < k_{\text{max}}$ 时, $k = k + 1$, 再次计算无人机间的相对距离、无人机与未被覆盖地面用户间的相对距离、无人机与障碍物或区域边界间的相对距离, 转步骤 3; 否则, 转步骤 7;

步骤 7: 无人机覆盖部署任务完成。

3 仿真结果分析

为了证实所提算法的正确性, 在 $1000 \times 1000 \text{ m}^2$ 的目标区域中随机部署了 100 个地面用户, 无人机的覆盖范围由各项参数确定, 主要参数如表 1 所示, 其中 λ 表示无线紫外光波长。本文主要针对有无障碍物两种场景对所提算法进行验证。

表 1 部分仿真参数
Table 1 Part of simulation parameters

Parameter	Value
λ/nm	260
L_{th}/db	108
h/m	75
R/m	110
R_s/m	220
R_c/m	220
d_{od}/m	190
maxdis	7.5
k_{max}	100

3.1 仿真结果

场景 1: 目标区域不存在任何障碍

当目标区域不存在障碍物时, 图 5 描述了 25 架无人机对地面用户进行通信覆盖的过程, 图 5(a) 是 25 架无人机随机部署的初始覆盖结果, 其中红色圆点表示无人机的部署位置, 红色圆圈代表无人机的覆盖范围, 蓝色菱形表示地面用户位置, 初始覆盖率仅为 55%, 可以看出初始覆盖中无人机的覆盖重叠率较高且覆盖盲区较大; 图 5(b) 给出了无人机的运动轨迹, 其中红色圆点代表无人机的初始位置, 线条代表无人机的运动轨迹, 可以看出在三种相对虚拟力的影响下, 无人机拉开了彼此间的距离并朝着覆盖盲区方向移动; 图 5(c)

给出了所提算法在迭代100次后的最终覆盖结果,覆盖率达到了99%,对目标区域几乎达到了全覆盖,可以看出无人机的分布比较均匀,而且避免了无效覆盖。

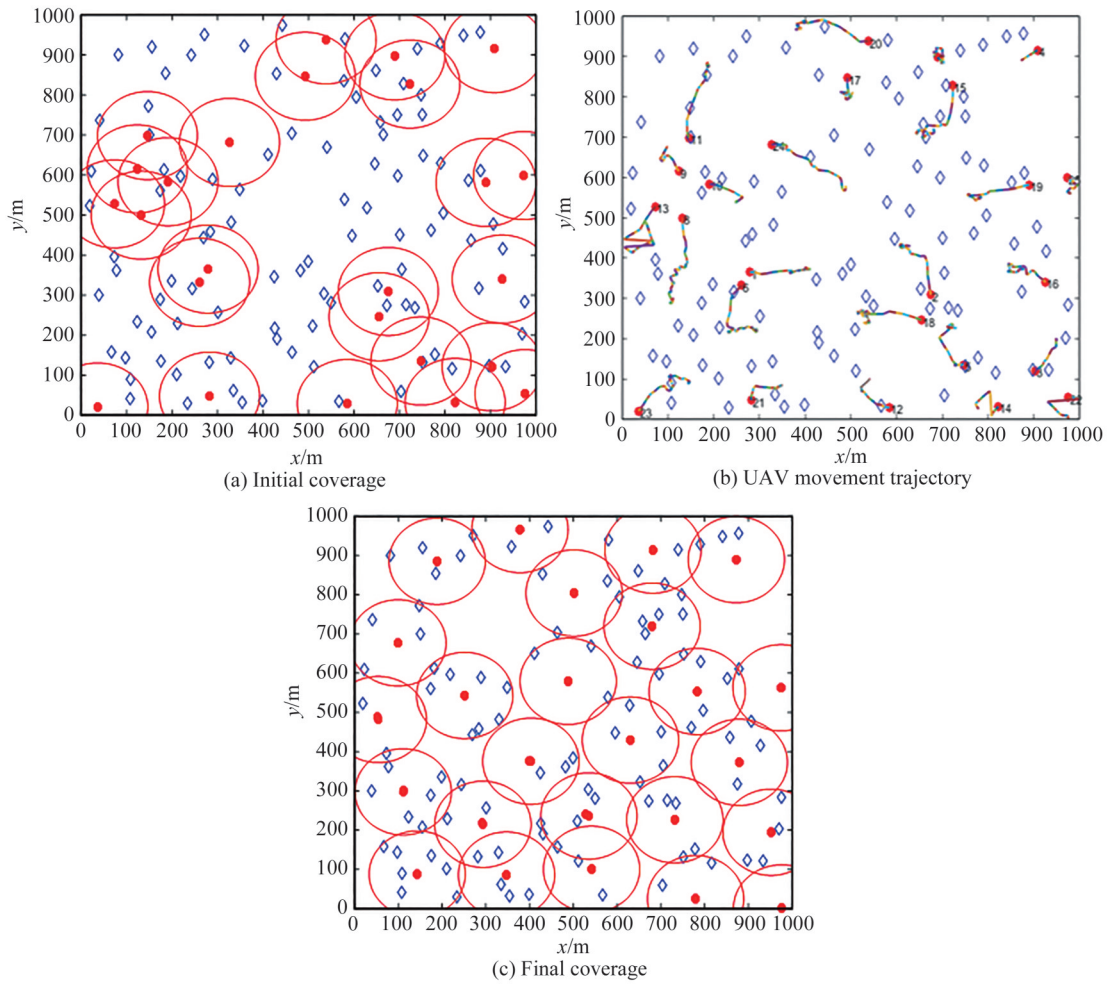
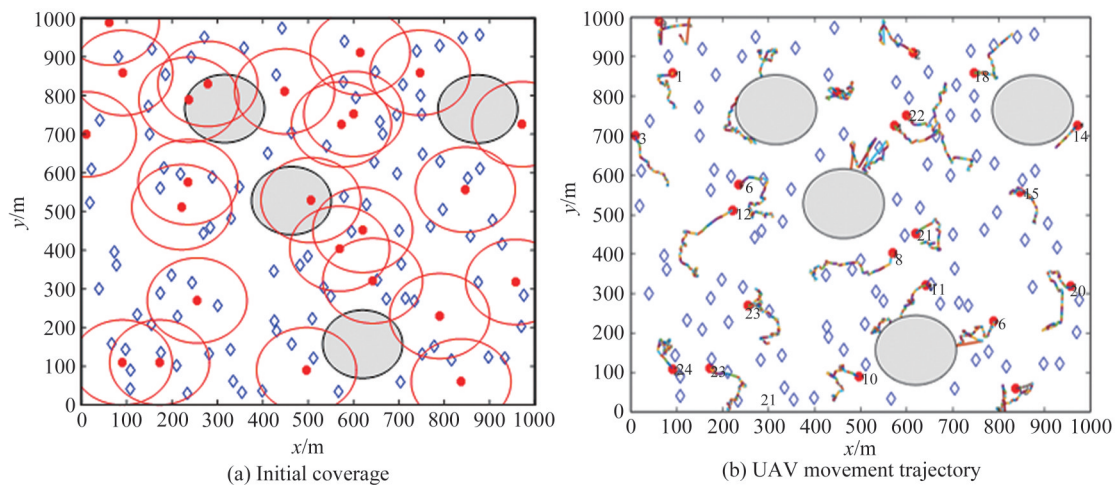


图5 无障碍时无人机覆盖过程

Fig.5 UAV coverage process without obstacles

场景2:目标区域存在障碍物

要求己方无人机在执行任务时尽可能避免飞往电子围栏上空。图6模拟了存在电子围栏时25架无人机进行通信覆盖的场景,图6(a)给出了随机部署的初始覆盖结果,其中灰色区域代表电子围栏,可以看出无



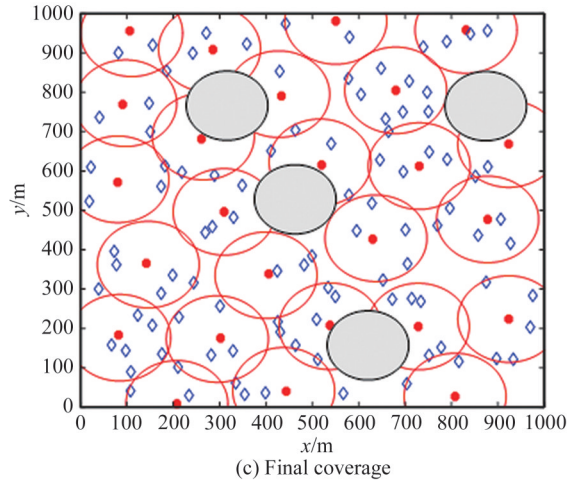


图6 存在电子围栏时无人机覆盖过程

Fig.6 UAV coverage process with electronic fence

人机覆盖时没有避开电子围栏,而且覆盖重叠率较高,覆盖率仅为69%;图6(b)给出了无人机的运动轨迹,可以看出无人机向着远离电子围栏的方向运动;图6(c)给出了无人机的最终覆盖结果,可以看出无人机成功避开了电子围栏,而且减小了覆盖重叠率,覆盖率达到了96%。

3.2 无线紫外光参数对算法的影响

当固定发散角 $\phi_T = 10^\circ$,接收视场角 $\phi_R = 30^\circ$,发射仰角 $\theta_T = 20^\circ$,无人机的高度由10 m变化到100 m时,图7可观察到覆盖率及路径损耗与无人机高度和接收仰角的关系。图7(a)中覆盖率随着接收仰角的增大而增大,且接收仰角越大,无人机覆盖率增长的速度越快;图7(b)中当接收仰角 θ_R 由 20° 变化到 70° 时,路径损耗呈上升趋势,在相同无人机高度下,路径损耗平均增加了近23 dB,这是因为随着无人机的高度和接收仰角的增加,无人机的覆盖半径增大。由此可知覆盖率和路径损耗与接收仰角呈正相关,且路径损耗随接收仰角的变化非常大,因此在满足路径损耗阈值的前提下,选择较大的接收仰角可以使覆盖率最大化。

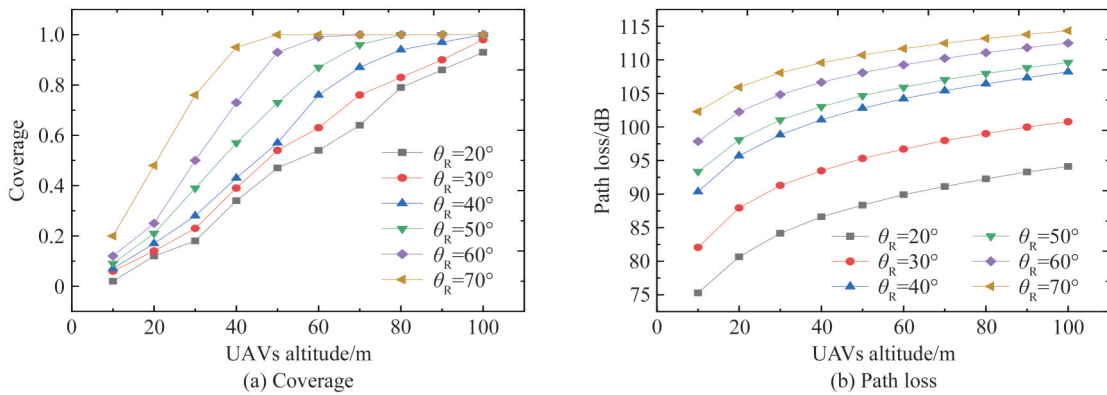


图7 覆盖率及路径损耗与无人机高度和接收仰角的关系

Fig.7 Relationship between coverage and path loss and UAV height and receiving elevation

固定发散角 $\phi_T = 10^\circ$,接收视场角 $\phi_R = 30^\circ$,接收仰角 $\theta_R = 20^\circ$,无人机的高度由10 m变化到100 m时,图8描述了无人机高度及发射仰角对无人机覆盖率和路径损耗的影响。图8(a)中无人机高度一定时, θ_T 由 20° 变化到 70° 的过程中,无人机覆盖率在 θ_T 小于 50° 时呈上升趋势,在 θ_T 大于 50° 时呈下降趋势,在发射仰角为 50° 时达到最大值,这是因为随着无人机高度的增加,无人机覆盖半径增大,在 θ_T 等于 50° 时接收端接收到的信号增益达到了上限;图8(b)中路径损耗随着发射仰角的增加而增大, θ_T 从 20° 增加到 70° 时,路径损耗平均增加了约13 dB,这是因为随着发射仰角的增大,无线紫外光收发端间距增大,由此可知路径损耗与发射仰角呈正相关,在满足路径损耗的前提下,发射仰角应尽量靠近 50° 。

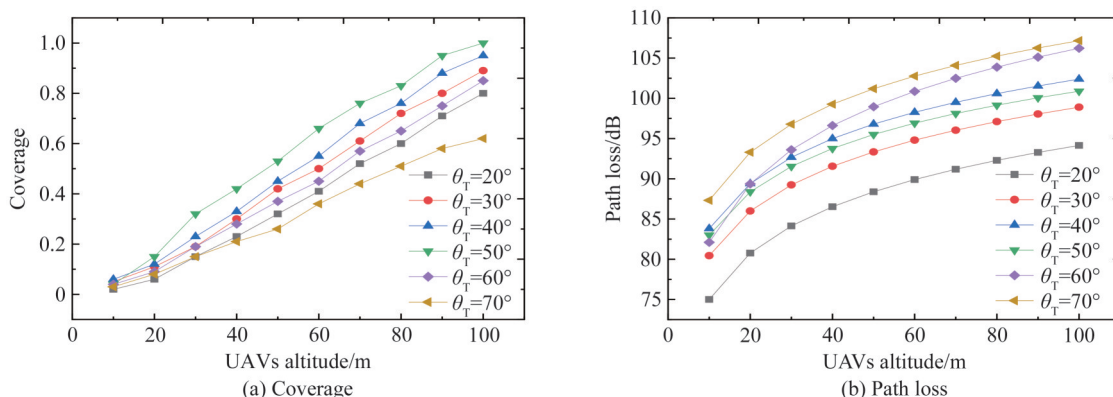


图8 覆盖率及路径损耗与无人机高度及发射仰角的关系

Fig.8 Relationship between coverage and path loss and UAV altitude and launch elevation

无人机高度及发散角对覆盖率和路径损耗的影响如图9所示,其中 $\theta_T = 20^\circ$, $\theta_R = 20^\circ$, $\phi_R = 30^\circ$ 。图9(a)中,无人机覆盖率随着发散角 ϕ_T 的增加而增大,但增加的幅度相对较小;由于式(4)中发散角 ϕ_T 和接收视场角 ϕ_R 为固定值,因此利用式(3)分析发散角对路径损耗的影响,由于式(3)仅适用于收发仰角较小的情况,因此固定 θ_R 和 θ_T 为 20° ,如图9(b)所示,路径损耗随着无人机高度的增加而增大,无人机高度不变时,路径损耗随着发散角的增大而减小,但是变化非常细微。因此增大发散角不会对无人机的覆盖率产生显著影响。

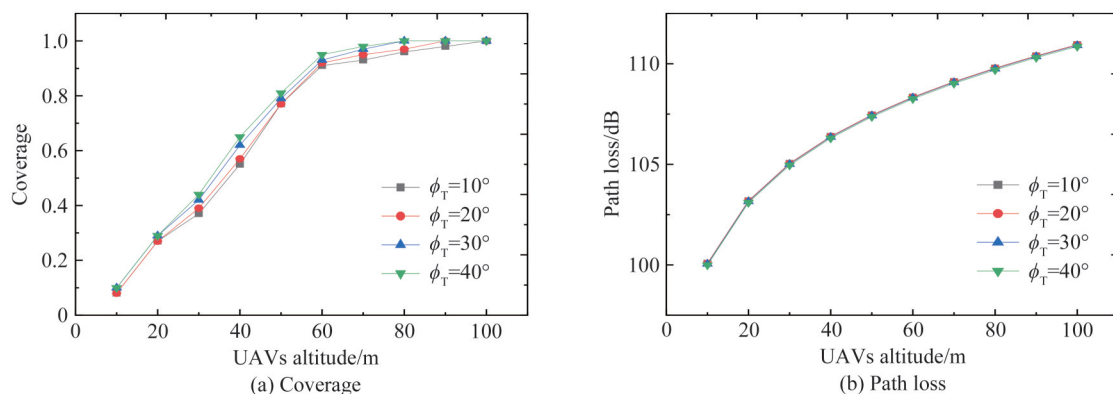


图9 覆盖率及路径损耗与无人机高度及发散角的关系

Fig.9 Relationship between coverage and path loss and UAV height and divergence angle

无人机高度及接收视场角对覆盖率和路径损耗的影响如图10所示,其中 $\theta_T = 20^\circ$, $\theta_R = 20^\circ$, $\phi_T = 10^\circ$ 。图10(a)中随着接收视场角的增大,无人机覆盖率在 20° 以前增加,在 20° 以后减小,当接收视场角较小时,无

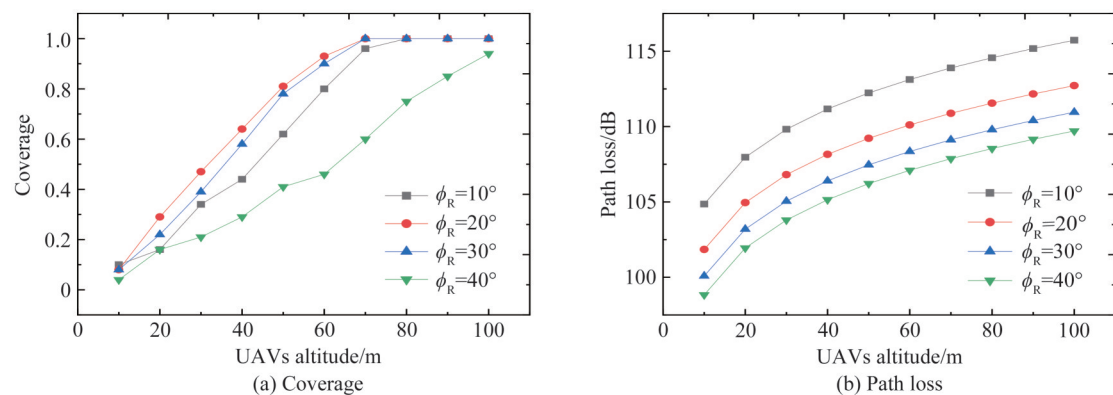


图10 覆盖率及路径损耗与无人机高度及接收视场角的关系

Fig.10 Relationship between coverage and path loss and UAV height and receiving field angle

无人机覆盖半径与接收视场角正相关。路径损耗随着接收视场角的增大而减小,如图10(b)所示,无人机高度不变时,接收视场角从 10° 增加到 40° 时,路径损耗降低了约10 dB左右,通过增加接收视场角的大小可以减小无人机与地面用户通信时的路径损耗,但同时也会降低无人机的覆盖率,因此在满足路径损耗前提下,应尽量选择较小的接收视场角以提高覆盖率。

3.3 算法性能

图11描述了无人机数量和覆盖率的关系。仿真中无人机的统一高度 $h=50$ m,无人机的数量分别为 $N=10$ 、 $N=20$ 、 $N=30$ 、 $N=40$ 时,所提算法趋于稳定时不同数量无人机的覆盖率分别是40%、84%、100%、100%,趋于稳定覆盖率时所需的迭代次数分别是163次、144次、118次、102次。由图中可以看出随着无人机数量的增加,无人机的覆盖率增大,而且无人机趋于稳定覆盖率时所需要的迭代次数会减少,这是由于无人机的数量越多,无人机的初始覆盖率会增大,则未被覆盖的用户数量会减少,从而达到稳定覆盖率时所需达到迭代次数将减少。

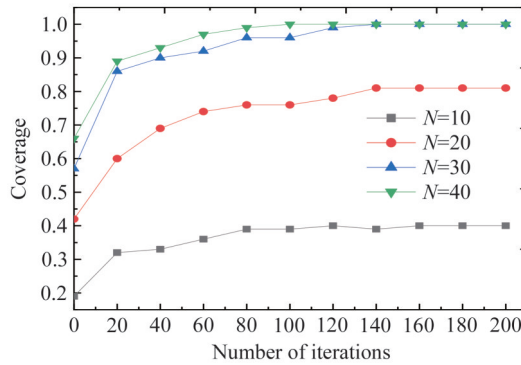


图11 无人机数量与覆盖率的关系

Fig.11 Relationship between UAV number and coverage

为了评估所提算法的区域覆盖性能,分别与贪婪虚拟力部署算法(Improved Virtual Force with Greedy Deployment Algorithm, IVFG)^[22]和单兴趣点覆盖移动部署算法(Single Point of Interest Coverage Mobile Deployment Algorithm, SPICM)^[23]的性能进行比较。设定无人机与地面用户通信时的路径损耗阈值为108 dB,接收仰角为 50° ,接收视场角为 30° ,无人机的飞行高度为50 m,图12给出了不同算法的对比结果。

利用40架无人机对 1 km^2 的正方形区域中的100个地面用户进行覆盖,3种不同算法下的网络覆盖率受迭代次数的影响如图12(a)所示,IVFG算法首先需要随机部署三倍数量的无人机,再通过虚拟力算法调整120个无人机位置,最后利用贪婪算法选择40架覆盖率高的无人机位置作为最终的部署结果,因此算法的收敛速度较慢;SPICM算法通过计算无人机所受的虚拟力控制无人机向目标点移动,算法的收敛速度很快,但是该算法为了保证连通性造成了很大的覆盖重叠率,因此导致覆盖率不高;本文算法为了覆盖更多的地面用户,需要遍历感知半径内所有地面用户以及相邻无人机位置,所以收敛速度适中,但是在算法趋于稳定时的覆盖率可达最高,相比SPICM算法和IVFG算法的覆盖率提高了4.3%和2.17%。图12(b)给出了不同算法在不同无人机数量下的覆盖率结果,从图中可以看出除IVFG算法外其他三种算法的覆盖率都随无人机数量的增加而稳步上升,这是因为当所需无人机数量较多时,IVFG算法很容易陷入局部最优,从而导致覆盖率下降,其中本文算法的覆盖率最高,相比随机部署(Random Deployment algorithm, RD),IVFG算法和SPICM算法的覆盖率平均提高了18.33%,3.15%和1.83%。图12(c)给出了40架无人机的平均移动距离和迭代次数的关系,可以看出,三种不同算法下无人机的平均移动距离均随着迭代次数的增加而减小,说明随着算法的迭代,越来越多的无人机找到了最佳部署位置,本文算法下无人机的平均移动距离最小,说明本文算法相较于其他两种算法更加节省无人机能量的消耗,因此可延长无人机的服务时长。

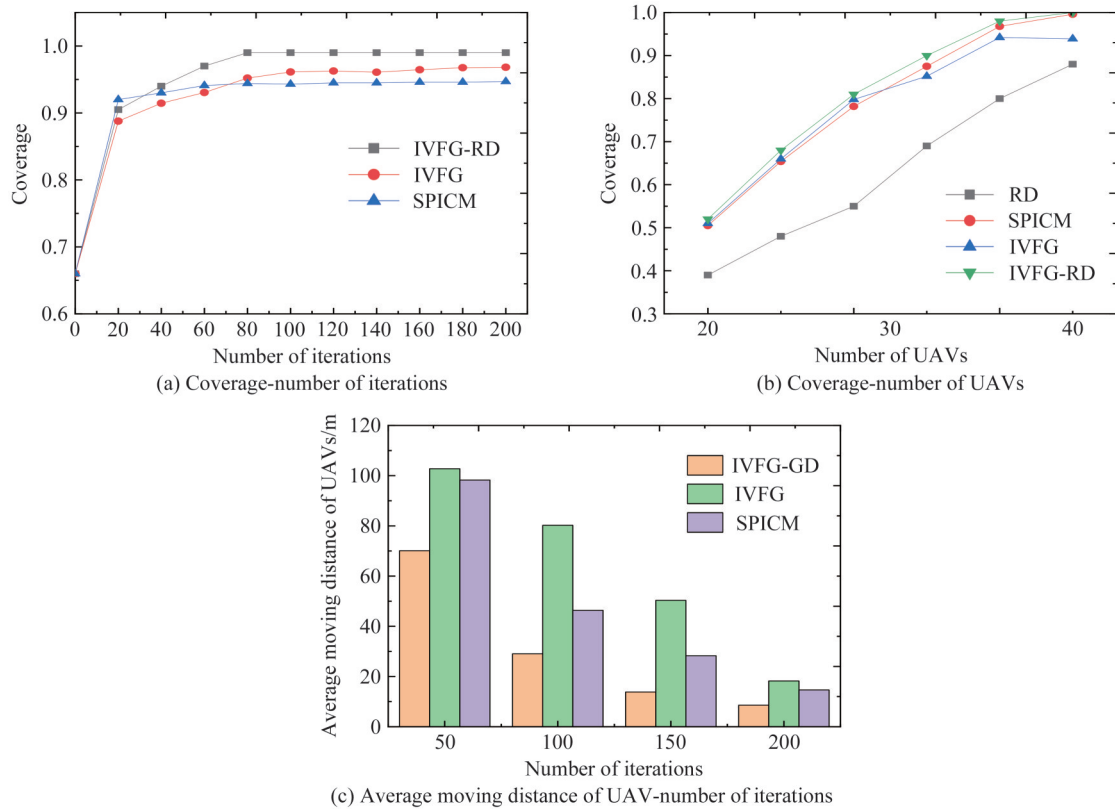


图 12 算法比较

Fig. 12 Algorithm comparison

4 结论

本文基于无线紫外光传输技术仿真了无人机对地面用户的隐秘通信覆盖情况,并针对无人机部署位置优化问题,提出了一种基于相对距离的改进虚拟力算法。面对复杂的电磁环境,利用无人机作为空中基站构建的应急通信网络,只需要计算三种相对虚拟力就能控制无人机自主运动到最优位置。本文利用仿真实验验证了所提算法在不同场景中的有效性,分析了不同通信角度对覆盖率和路径损耗的影响,最后和同类算法进行对比得出结论。结果表明,选择合适的通信角度可以在满足通信服务质量的前提下,有效提升无人机的覆盖率;同时,在有无障碍物的场景中,所提算法均能有效的减小无效覆盖和重叠覆盖区域;所提算法相比同类算法在提高覆盖率的基础上降低了无人机的飞行能耗并延长了服务时间。在后续的工作中,将考虑研究无人机在三维空间的优化部署问题,通过自适应调整飞行高度,降低无人机和地面用户间的路径损耗,并减小无人机的能量消耗,以更满足实际场景的需求。

参考文献

- [1] ZHANG C, ZHANG L, ZHU L, et al. 3D deployment of multiple UAV-mounted base stations for UAV communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(4): 2473-2488.
- [2] LIN N, LIU Y, ZHAO L, et al. An adaptive uav deployment scheme for emergency networking[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 21(4): 2383-2398.
- [3] LIU X, WANG X, JIA J, et al. Distributed deployment in UAV-assisted networks for a long-lasting communication coverage[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 16(3): 4130-4138.
- [4] NOH S C, JEON H B, CHAE C B. Energy-efficient deployment of multiple UAVs using ellipse clustering to establish base stations[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(8): 1155-1159.
- [5] QU H, ZHANG W, ZHAO J, et al. Rapid deployment of UAVs based on bandwidth resources in emergency scenarios [C]. 2020 Information Communication Technologies Conference (ICTC), IEEE, 2020: 86-90.
- [6] ARAFAT M Y, MOH S. Localization and clustering based on swarm intelligence in UAV networks for emergency communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 8958-8976.

- [7] WEN X, RUAN Y, LI Y, et al. Improved genetic algorithm based 3-D deployment of UAVs [J]. Journal of Communications and Networks, 2022, 24(2): 223-231.
- [8] CHEN Jiamei, LI Shiang, LI Yufeng, et al. Improved particle swarm optimization algorithm for UAV Aided Network Deployment Based on beetle search [J/OL]. Journal of Electronics and Information, https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DZYX20220606006&uniplatform=NZKPT&v=OBbwn4s_s_AI0mE4g101i3Jn2VR5BoDaKd45uV42l8Q9nReRr-ZptURLJ8pRIR_U.
陈佳美,李世昂,李玉峰,等.基于甲虫搜索的改进粒子群无人机辅助网络部署优化算法[J/OL].电子与信息学报, https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DZYX20220606006&uniplatform=NZKPT&v=OBbwn4s_s_AI0mE4g101i3Jn2VR5BoDaKd45uV42l8Q9nReRr-ZptURLJ8pRIR_U.
- [9] DAI H, ZHANG H, WANG B, et al. The multi-objective deployment optimization of UAV-mounted cache-enabled base stations[J]. Physical Communication, 2019, 34: 114-120.
- [10] LIU X, LIU Y, CHEN Y. Reinforcement learning in multiple-UAV networks: deployment and movement design[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 8036-8049.
- [11] WANG L, ZHANG H, GUO S, et al. 3D UAV deployment in multi-UAV networks with statistical user position information[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(6): 1363-1367.
- [12] ZHOU Fei, GUO Haotian, YANG Yi. An improved virtual force relocation coverage enhancement algorithm [J]. Journal of Electronics and Information, 2020, 42(9): 2194-2200.
周非,郭浩田,杨伊.一种改进的虚拟力重定位覆盖增强算法[J].电子与信息学报, 2020, 42(9): 2194-2200.
- [13] MUHEIDAT F, DAJANI K, LO'AI A T. Security concerns for 5G/6G mobile network technology and quantum communication[J]. Procedia Computer Science, 2022, 203: 32-40.
- [14] WANG Xiaofeng, CHEN Taiqian, LIU Yuan. Research on dynamic simulation technology for satellite internet [J/OL]. Journal of System Simulation, https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=XTFZ20220825001&uniplatform=NZKPT&v=SnE8c-rNG4ZFdFVuE1_RX-ldMTKfV_uitXSKYrnvKUx8bhI7xuFbpXbWXeSHj7o6.
王晓锋, 谌泰乾, 刘渊. 面向卫星互联网的动态仿真技术研究[J/OL]. 系统仿真学报, https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=XTFZ20220825001&uniplatform=NZKPT&v=SnE8c-rNG4ZFdFVuE1_RX-ldMTKfV_uitXSKYrnvKUx8bhI7xuFbpXbWXeSHj7o6.
- [15] FENG Ketao, LI Xiaoyi, WU Lehua, et al. Path loss of undulating terrain based on digital elevation model for ultraviolet indirect vision communication [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 151-164.
冯克涛, 李晓毅, 吴乐华, 等. 基于数字高程模型的起伏地形对紫外光非直视通信的路径损耗[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 151-164.
- [16] ZHAO T, YAO J, GONG C, et al. Wireless ultraviolet light MIMO assisted UAV direction perception and collision avoidance method[J]. Physical Communication, 2022, 54: 101815.
- [17] LV Zhaoshun, WU Hanping, LIANG Baowen, et al. Research on key technologies of direct and non direct vision ultraviolet communication system near the ground [J]. Infrared technology, 2014, 36(9): 688-694+699.
吕照顺, 吴晗平, 梁宝雯, 等. 近地层直视与非直视紫外光通信系统关键技术研究[J]. 红外技术, 2014, 36(9): 688-694+699.
- [18] ZHAO Taifei, MA Qianwen, ZHAO Yi. Research on interference link performance of wireless ultraviolet communication [J/OL]. Progress in laser and Optoelectronics, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=JGDJ202207130B2&uniplatform=NZKPT&v=cDi37wmKJEoQOjh01MYduT2cGdeLUIPBr7S6YyL-HdVkBmvgVZqtBizht0ql8xw>.
赵太飞, 马倩文, 赵毅. 无线紫外光通信干扰链路性能研究[J/OL]. 激光与光电子学进展, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=JGDJ202207130B2&uniplatform=NZKPT&v=cDi37wmKJEoQOjh01MYduT2cGdeLUIPBr7S6YyL-HdVkBmvgVZqtBizht0ql8xw>.
- [19] CHEN G, XU Z, DING H, et al. Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications[J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3929-3940.
- [20] ZHAO Taifei, FENG Yanling, KE Xizheng, et al. Research on node coverage in "sun-blind" ultraviolet optical communication network [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2229-2235.
赵太飞, 冯艳玲, 柯熙政, 等. "日盲"紫外光通信网络中节点覆盖范围研究[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2229-2235.
- [21] XIE J, WEI D, HUANG S, et al. A sensor deployment approach using improved virtual force algorithm based on area intensity for multisensor networks[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019: 1-9.

- [22] KIANI V. A greedy virtual force algorithm for target coverage in distributed sensor networks[C]. 2020 10th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE), IEEE, 2020: 317-322.
- [23] YUAN Wangteng, LI Yage. Design of mobile deployment algorithm for UAV network [J] Computer Knowledge and Technology, 2017,13 (3): 56-59.
袁万腾,李亚各.无人机网络移动部署算法设计[J].电脑知识与技术,2017,13(3):56-59.

A Wireless UV-assisted Secret Communication Coverage Method for UAV

ZHAO Taifei, YAO Jiatong, LIU Yang, ZHENG Borui

(*Institute of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

Abstract: Due to the complex and ever-changing battlefield environment, fixed communication equipment is often damaged in combat zones, resulting in a massive breakdown of communication and thus affecting combat effectiveness. Using the advantages of the UAV's strong survivability and wide coverage, it is possible to carry communication equipment as an UAV aerial base station to provide communication services to ground users. The single UAV base station has disadvantages such as weak resistance to destruction and limited coverage and power, so the choice is made for multiple UAV base stations to work together to provide communication services to a large area and multiple users. In complex military environments such as strong electromagnetic interference and "electromagnetic silence", traditional wireless communication methods have poor confidentiality and are susceptible to interference and eavesdropping by the enemy, while wired communication requires cables to be laid in advance and is not easily used in complex, dynamic and changing military environments. Wireless ultraviolet communication, based on its all-round and terrain adaptable working characteristics, overcomes the shortcomings of wired communication requiring cable laying, as well as the strong absorption of ultraviolet light by the atmosphere, making ultraviolet communication with a low location detection rate performance, compared to wireless communication methods such as radio frequency communication and infrared light communication has better area covert transmission. It can be used as an independent network unit to access the modern communication network architecture, and can also be interconnected with wireless and wired communication networks to achieve resource information sharing. By establishing an airborne wireless UV non-direct vision communication model with the UAV coverage model, the coverage of the UAV is maximized while satisfying the premise of path loss. In order to ensure the quality of communication services for ground users, the received power of ground users is required to be greater than a certain threshold value, when the transmit power is certain, that is, the path loss when ground users communicate with the UAV must be less than the maximum acceptable path loss to ensure communication, the maximum acceptable path loss corresponds to a maximum coverage radius, and the path loss of all ground users communicating with the UAV in the radius area All of the ground users within this radius have a path loss less than this threshold. At the initial stage of deployment, the UAVs are randomly segmented over the target area, with the UAV projection on the ground as the centre and the coverage area as the radius, and users within its radius are considered to be covered and vice versa. By randomly deploying drones, a broad coverage blind spot, as well as coverage overlap, is created, resulting in a waste of resources for drones. Therefore how to provide communication coverage for ground users by optimizing the location of UAVs to meet requirements such as path loss and maximum coverage is an important problem faced when using UAVs as aerial base stations to build wireless communication networks. In solving the UAV deployment location optimization problem, this paper proposes a virtual force algorithm based on the relative distance to determine the positive and negative forces acting on the UAV based on the relative distance. The algorithm introduces

three relative virtual forces, namely the relative virtual force between UAVs, the relative virtual force between UAVs and uncovered users, and the relative virtual force between UAVs and obstacles, and controls the UAV through the action of virtual forces UAV movement to the optimal position. This paper simulates the covert communication coverage of the UAV to ground users based on wireless ultraviolet light transmission technology, and analyses the performance of the algorithm under different scenarios as well as the effect of the ultraviolet light communication angle on the coverage of the algorithm. The simulation results show that the proposed algorithm effectively reduces the invalid coverage and overlapping coverage, and improves the coverage rate by 18.33%, 3.15% and 1.83% compared with the random deployment algorithm, greedy virtual force algorithm and mobile deployment algorithm, respectively, and the average distance travelled by the UAV in the proposed algorithm is the smallest, which indicates that the algorithm in this paper is more energy-saving compared with other algorithms. By choosing the appropriate reception elevation angle, transmission elevation angle, divergence angle and reception field of view angle, the coverage of the UAV can be effectively improved, and the service time can be extended by reducing energy consumption to meet the communication needs of the UAV and the user in a complex electromagnetic environment.

Key words: Unmanned aerial vehicle; Wireless ultraviolet communication; Area coverage; Virtual force; Secret communication

OCIS Codes: 350.4600; 260.7190; 060.4510; 060.4785; 040.7190