

激光与光电子学进展

无线紫外光协作无人机编队邻居发现方法

赵太飞^{1,2*}, 刘昆¹, 姚佳彤¹, 王璐¹

¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

²陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710000

摘要 针对无人机编队在空中集结与组网的初期, 需要进行快速邻居发现。根据紫外光近直视通信特点设计球形紫外 LED 通信节点模型, 按照经纬线划分的方式改变每条纬线上经线的个数合理分布 LED。针对邻居发现过程中存在的信道冲突和邻居发现效率问题, 设计一种包含随机概率的握手交互信息帧, 引入随机概率减少信道冲突的产生, 提出了一种令牌衍生随机避让邻居发现算法, 通过令牌的动态衍生与融合实现编队内令牌节点时钟同步, 减少信道冲突的同时提高邻居发现效率。仿真实验表明, 该球形紫外 LED 通信节点模型在合理的节点分布下, 可以很好地完成三维空间的全覆盖; 该邻居发现算法对比传统单令牌算法在邻居发现效率上显著提高, 对比多令牌随机退避算法更好地减少了信道冲突, 节省了能量的消耗, 很好地平衡了信道冲突和邻居发现效率。

关键词 光通信; 紫外光通信; 无人机编队; 通信节点设计; 邻居发现协议; 邻居发现算法

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0106004

Neighbour Discovery Algorithm for Wireless Cooperative Unmanned Aerial Vehicle Formation

Zhao Taifei^{1,2*}, Liu Kun¹, Yao Jiatong¹, Wang Lu¹

¹Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

²Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an, Shaanxi 710000, China

Abstract At the initial stage of unmanned aerial vehicle formation assembly and networking in air, it is necessary to quickly discover neighbours. According to ultraviolet (UV) characteristics near direct vision communication, this study designs a spherical UV LED communication node model. The longitude at each latitude is changed to reasonably distributed UV LED based on the division of longitude and latitude. In addition, a handshake interaction information frame with random probability is designed to solve the problems of channel conflict and neighbour discovery efficiency in the neighbour discovery process. Random probability is introduced to reduce channel conflict generation, and a token-derived random avoidance neighbour discovery algorithm is proposed. Clock synchronisation information is realised through token dynamic derivation and fusion, reducing channel conflict and improving neighbour detection efficiency. The simulation results show that the spherical UV LED communication node model with a reasonable distribution of nodes can appropriately complete the full coverage of the three-

收稿日期: 2021-03-25; 修回日期: 2021-04-09; 录用日期: 2021-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(61971345)、陕西省教育厅科研计划项目(17-JF024)、陕西省重点产业链创新计划项目(2017ZDCXL-GY-05-03)、西安市碑林区科技计划项目(GX1921)、榆林市科技计划项目(2019-145)、西安市科学计划项目(CXY1835(4))、陕西省重点研发计划一般项目(2021GY-044)

通信作者: *zhaotaifei@163.com

dimensional space. Moreover, the neighbour discovery efficiency is significantly improved using the neighbour discovery algorithm compared with the traditional single token neighbour discovery algorithm. Compared with the multi-token random back off algorithm, the developed better reduces the channel conflict, reduces energy consumption, and achieves a good balance of the signal path conflict and neighbour discovery efficiency.

Key words optical communications; ultraviolet communication; unmanned aerial vehicle formation; communication node model; neighbor discovery protocol; neighbor discovery algorithm

1 引言

随着无人机作战技术日渐成熟,无人机编队执行任务的方式引起广泛研究,对于空中多无人机编队在执行任务时,首先需要进行空中组网,即无人机需要快速发现相邻无人机^[1-2]。使用一种稳定可靠的通信方式进行通信是无人机成功组网的前提。在实际环境中,往往会由于复杂大气环境,强电磁干扰等原因导致编队内通信效率低下^[3]。无线紫外光具有抗电磁干扰强、背景噪声小、低功耗、易于机载的优点,并且可实现全天候非直视^[4-5],它可以保障无人机在复杂环境下仍可正常工作,能够为无人机编队在邻居发现组网初期提供安全可靠的通信保障^[6]。

邻居发现的目的在于快速且高效地发现相邻无人机并建立稳定通信,目前邻居发现存在的主要问题为信道冲突和邻居发现效率低下^[7]。为解决信道冲突问题,文献[8]提出一种基于领导节点的邻居发现协议,保证邻居发现执行过程中同一时间只有一个被选中的节点进行邻居发现,大大减少了信道冲突的次数,但此方法由于同一时刻只有一个节点进行邻居发现,大大延长了邻居发现完成时间。文献[9-10]使用了一种概率性的随机退避算法,该算法是一种以时间同步为基础的邻居发现算法,将时间划分为若干个相同的时隙,每个节点在每个时隙以一定的概率选择信息的发送和接收。这种机制通过设置合适的信息发送概率,可以极大地减少信道冲突次数。

为解决邻居发现效率低下问题,文献[11]提出了一种基于多令牌的邻居发现协议,该协议基于区域探测算法来传输多个令牌实现区域邻居发现算法,并利用Cooja模拟器对协议的性能进行了评估。该方法引入多令牌方式大大缩短了邻居发现的时间,但文中并未探讨信道冲突的问题。文献[12]提出了一种双令牌的非同步邻居发现协议,仿真结果表明两令牌之间可通过协作关系提高邻居发现效率。文献[13]提出了一种多令牌随机退避

(MTRB)邻居发现算法,该算法在采用多令牌同时进行邻居发现的同时使用随机避让机制来提高邻居发现效率,仿真结果表明当令牌个数为网络总节点一半时,邻居发现效果最好,但此算法初始时令牌节点过多仍然会产生大量的信道冲突。

本文考虑到无人机在空中时所处三维空间,以及编队中邻居发现过程存在的上述问题,设计了一种新型的球形LED节点通信模型用于发送和接收信息,并研究一种信息交互的邻居发现协议。另外,为解决无人机飞行环境的复杂性导致难以实现时间同步的问题以及为了更好地平衡信道冲突和邻居发现效率的冲突,提出一种令牌衍生随机避让邻居发现算法来完成无人机编队邻居发现过程。

2 基本原理

2.1 机间紫外光通信链路模型

紫外光通信是以紫外光作为载体进行信息传递的一种通信方式,紫外光在大气传输过程中会产生散射现象,因此紫外光不仅可以实现直视通信也可实现非直视通信。在空中通信时,障碍物相对较少,主要依靠直视通信方式。但由于无人机空中进行通信时,收发信机很难完全对准,这里考虑一种收发信机不完全对准的近直视通信模型。图1为无线紫外光近直视通信链路模型。

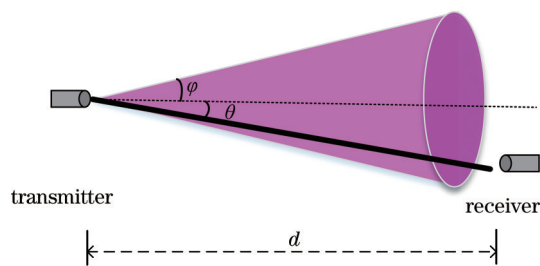


图1 无线紫外光近直视通信链路模型

Fig. 1 Link model of wireless ultraviolet near direct vision communication

图1中 Transmitter表示发信机,Receiver表示接收机。发信机在空中发出光束经大气信道传播到接收机。紫外光信号在大气中进行传输时,会因

为在大气信道中的散射和吸收,造成光强的减弱。图中发信机发射半角为 φ ,接收端与发射端的连线与水平方向的夹角为 θ ,通信距离为 d ,无线紫外光近直视链路在大气自由空间中的功率衰减呈指数衰减,根据紫外光近直视通信链路模型,可得检测到的光功率表达式为^[14-15]

$$P_r = P_t \exp \left[-k_c \frac{d}{\cos \theta} \right] \frac{A_r \cos \theta}{2\pi d^2 (1 - \cos \varphi)}, \quad (1)$$

式中: P_t 是发射端辐射出的紫外光功率; $\exp \left[-k_c \frac{d}{\cos \theta} \right]$ 为大气衰减; k_c 是大气信道衰减系数,其中 $k_c = k_a + k_s$, k_a 为大气吸收系数, k_s 为大气散射系数; A_r 为接收机接收孔径面积。所以根据接收端检测到的紫外光功率,可计算得出收发信机之间的通信距离。

2.2 通信节点模型设计

为保证无人机能有效发现邻居节点,无人机通信节点模型的紫外光发射光束必须实现空间全覆

盖。本文以球形结构为基础,为了简化说明将球形结构改为半球形,借鉴经纬线划分的思想,改进一种如图 2 所示的经纬均匀划分通信节点模型^[16],其中图 2(a)为该模型侧视图,图 2(b)为俯视图,该模型在其每条纬线和其经线交接处作为一个节点安装紫外光 LED 发射装置,分析此模型可发现其在纬线上分布相同的经线个数会导致靠近顶点处节点分布密度越来越大,极易产生多紫外光 LED 发射的光束重复覆盖问题,造成能量的浪费。

为解决此问题,将该节点模型进行改进,改进后侧视图与俯视图如图 3 所示,改进方式是在其每条纬线上分布不同的经线个数,越靠近顶点处的纬线上分布的经线越少,改进后节点模型如图 3 所示,其中图 3(a)为该模型侧视图,图 3(b)为俯视图。其中,紫外光发射装置采用紫外 LED,将其排列在半球形表面,每个紫外 LED 有独立编码且可独立发送信号,半球形结构顶部处安装一个全向信号接收机。

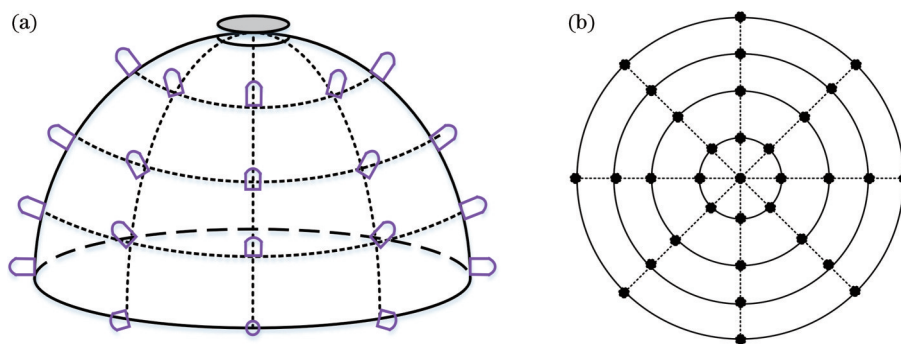


图 2 经纬均匀分布节点模型。(a)侧视图;(b)俯视图

Fig. 2 Node model with uniform distribution of longitude and latitude. (a) Side view; (b) top view

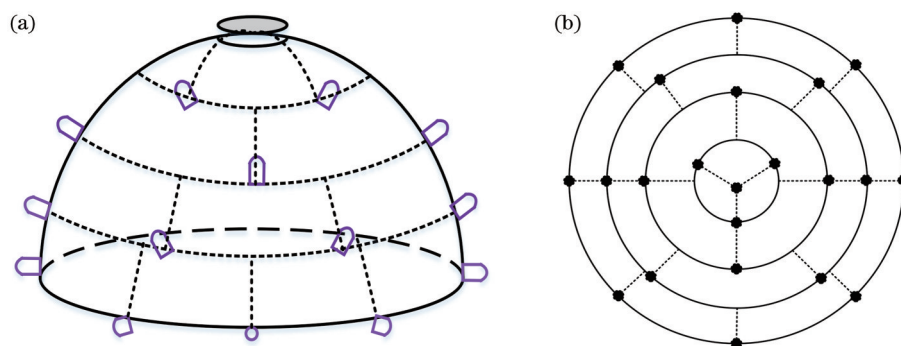


图 3 经纬非均匀分布节点模型。(a)侧视图;(b)俯视图

Fig. 3 Node model of non-uniform distribution of longitude and latitude. (a) Side view; (b) top view

2.3 邻居发现信道冲突问题

考虑到无人机在空中首次进行邻居发现时,无人机处于静止状态,使用无线紫外光进行邻居发现时,若每个无人机节点自由发起邻居发现,则必然

会产生大量信道冲突问题,导致邻居发现效率低下和能量的浪费,信道冲突示意图如图 4 所示。

当节点 4 与节点 6 同时与节点 1 进行通信时,节点 1 在进行数据处理时便会因为接收到两种不

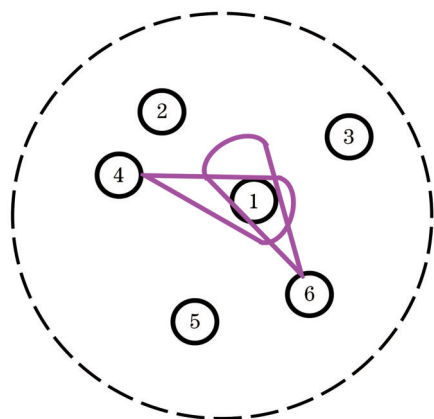


图 4 信道冲突示意图

Fig. 4 Schematic of channel conflict

同的数据信息导致接收失败,从而产生一次信道冲突。

2.4 邻居发现交互协议

无人机编队在空中进行邻居发现过程中,需要确定一种邻居交互协议。本文采用经典的三次握手交互协议来实现邻居之间的邻居发现。具体三次握手交互协议包括三种信息帧,分别为请求信息帧、应答信息帧和确认信息帧。其中,请求信息帧由邻居发现发起节点发出,用于向周围邻居节点发送请求建立链路的信息;应答信息帧为邻居节点收到请求信息帧后向发起节点发出的信息;确认信息帧为发起节点收到邻居节点的应答信息帧后所发出的确认信息帧,用于确认双方通信链路的确定。

对于信息帧的组成结构,需要设计一种简单方便的信息帧结构,根据上文分析可知节点发生信道冲突在三种信息帧发送过程中均有可能发生。所以需要考虑将避让机制写入三种信息帧中,用来决定某时刻是否发送信息帧。本文规定三种信息帧报文大小相同,共用一种信息帧结构,具体信息帧结构示意图如图 5 所示。

信息帧形式以分组排列的形式组成,具有起始

| | |
|---------------------------|-----------------------------|
| random avoidance value | |
| frame type | |
| current node ID | current node LED number |
| communication information | |
| destination node ID | destination node LED number |
| end bit | |

图 5 信息帧结构示意图

Fig. 5 Schematic of information frame structure

位、数据位和结束位。本信息帧中,第一组为随机避让数值分组,该分组担任“起始位”的作用,在这一组中,随机避让数值的计算方式为从预设好的 1-D 个整数中任取一个作为该组内容,本协议规定,当该取值为整数 1 时,起始位起作用,可以发送信息帧,否则,节点不发送信息帧;第二组为帧类型,帧类型共分为请求信息帧、应答信息帧、确认信息帧三种;第三组由发送消息的无人机节点 ID 及无人机搭载紫外多输入多输出(MIMO)模型发送信息的 LED 编号组成;第四组由发起节点向目的节点发送的通信信息组成,此信息可以是两节点通信时的附加消息等;第五组由消息接收方的无人机节点 ID 组成及无人机搭载紫外 MIMO 模型发送信息的 LED 编号组成。第二组到第五组担任“数据位”作用,用来实现两节点间的信息交互;第六组为结束位,即当这一组信息传输完成之后,此条信息发送完毕。

2.5 令牌衍生随机避让邻居发现算法

为了更好地平衡信道冲突和邻居发现效率,本文提出一种令牌衍生随机避让邻居发现算法(TDRB),该算法更好地将令牌机制和随机避让机制进行了结合,使得令牌个数在网络中做到了动态的衍生与融合,在做到了时间同步的基础上也更好地平衡了信道冲突次数和邻居发现效率。算法描述如下:

- 1) 以固定时间间隔为一个时隙,将时间划分为若干个时隙。初始化编队中任一节点持有令牌,在第一个时隙进行发送请求信息帧。
- 2) 令牌发送请求信息帧后,开启随机避让机制,该机制保证每个时隙有一定概率决定是否发送信息,令牌持有节点在该机制作用下共发送 n 次请求信息,最后一次发送完成后,开启定时器功能。当定时时间到,转到步骤 5。
- 3) 节点收到请求信息帧后,在随机避让机制的作用下决定在某个时隙发送应答信息帧。
- 4) 令牌节点接收到应答信息帧后,在随机避让机制的作用下决定在某个时隙发送确认信息帧。
- 5) 当令牌节点等待定时器结束后,开始分发令牌,分发令牌的方式为按照深度优先搜索准则随机选取自身两个邻居节点进行传递令牌,若不足两个邻居节点时,则分两种情况,当只有一个邻居节点时,进行令牌的融合,传递一个令牌;当没有邻居节点时,不传递令牌。
- 6) 当网络中全部节点均担任一次令牌节点,且

令牌节点邻居发现过程均已完成,则邻居发现过程结束。

3 分析与讨论

3.1 通信节点模型仿真

对文中所用到的球形通信节点结构进行仿真分析,仿真分析的性能指标为邻居发现成功概率。首先仿真每条纬线上分布相同经线个数的通信节点模型,具体场景如下:在 $400\text{ m} \times 400\text{ m} \times 400\text{ m}$ 的三维空间中随机分布 16 个无人机节点,假设最大通信半径设为 150 m ;对 16 个节点依次发起邻居发现过程,进行多次实验,求取邻居发现成功概率的平均值。图 6 为邻居发现成功概率与发现半角的关系曲线。图中 M 表示纬线个数, N 表示经线个数。

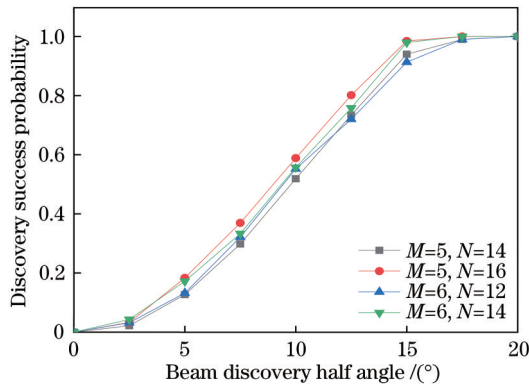


图 6 邻居发现成功概率与发现半角的关系曲线
Fig. 6 Relationship between neighbor discovery success probability and discovery half angle

从图 6 中可以看出,随着 LED 发散半角的增大,邻居发现效率不断提高,且随着经线和纬线个数的增加,邻居发现概率不断增大,这是因为随着经纬线个数的增加,LED 的个数也在增加,LED 发出的紫外光束三维覆盖面积越大,光束三维覆盖盲区也越少,所以邻居发现成功概率不断上升。根据图中经纬线个数分布可以看出在 $M=5, N=16$ 的情况下,LED 发散半角为 15° 时,邻居发现成功概率接近于 1,此时的邻居发现效率最高。

在此基础上,为改善节点分布,仿真分析每条纬线上分布不同经线个数的新通信节点模型,设置 LED 发散半角为 15° ,仿真环境与仿真性能同上,具体实施方式为对 5 条纬线从上到下进行 1~5 编号,以变量 \bar{M} 表示纬线编号,以单一变量法的原则,分别依次改变纬线编号 1~5 上的经线个数,进行仿真分析,由于球形结构对称性,第 4 条纬线对应第 2 条

纬线。第 5 条纬线对应 1 条纬线,所以只需仿真第 1~3 条纬线即可,新模型邻居发现成功概率与纬线上经线的个数关系曲线如图 7 所示,可以看出,当第 1 条纬线上经线个数为 10,第 2 条纬线上经线个数为 14,第 3 条纬线上经线个数为 16 时,邻居发现效率接近于 1,邻居发现效率最高。并计算可得,此方式节点数共为 66 个,较改进前节点个数少了近 20%。

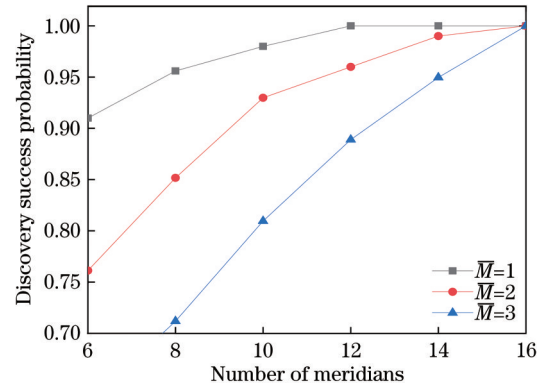


图 7 邻居发现成功概率与纬线上经线的个数关系曲线
Fig. 7 Relationship between neighbor discovery success probability and number of longitudes on latitude

以上实验均是在保证单一变量的基础上进行的实验验证,所以有必要对验证出的整体通信节点模型进行实验分析,仿真改进后的经纬非均匀节点模型与原经纬均匀分布模型进行比较,仿真结果如图 8 所示,仿真实验表明,随着发散角度的增大,旧模型的发现概率与新模型的发现概率之间的差距在逐渐缩小,这是因为随着发散角度的增大,新模型的三维覆盖面积逐渐变大,在发散半角为 15° 时,新模型的发现概率基本达到了 1,与旧模型相同,达到了相同的效果。

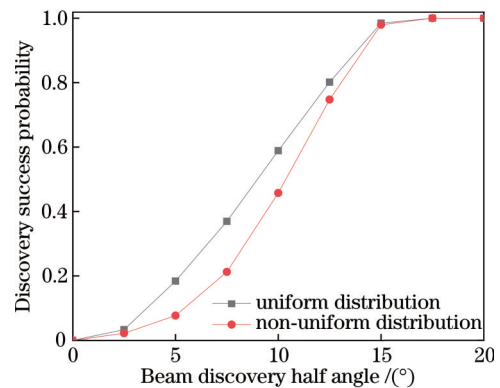


图 8 邻居发现成功概率与发现半角的关系曲线
Fig. 8 Relationship between neighbor discovery success probability and discovery half angle

3.2 邻居发现算法仿真分析

确定了无人机节点之间的通信模型与邻居交互协议之后,需要对邻居发现方法进行仿真分析。本文使用三个性能指标来衡量本文算法的优劣,即信道冲突次数,信息帧负载数,邻居发现成功率。

信道冲突次数表示每个节点接收端同一时隙接收到两个及以上的信息帧到来时,即接收端接收信息失败,信道冲突次数加 1;信息帧负载数表示数据传输中发送的信息帧开销数,即节点通信模型上每个紫外光发射端发送一次消息帧,负载数加 1。邻居发现成功率定义为

$$P_{NDP} = \frac{F}{A}, \quad (2)$$

式中: F 表示网络中已发现真实邻居个数; A 表示网络中全部邻居个数; P_{NDP} 表示此时刻全部已发现的真实邻居个数占网络中全部邻居个数的比例。

在进行算法性能分析之前,首先确定一个大致的时隙避让范围,来减少信道冲突的产生。因为时隙数按照整数形式划分,所以时隙避让概率相当于时隙信息发送概率,即信息发送概率为避让时隙范围的倒数。

接下来,仿真分析随机避让概率取值,仿真环境为 $400\text{ m} \times 400\text{ m} \times 400\text{ m}$ 空间随机抛洒 16 个节点,设置节点间最大通信距离为 150 m,假设所有节点在同一时隙全部发起邻居发现过程。图 9 为邻居发现成功率与不同信息发送概率对比曲线,结果表明随着时隙的增大,邻居发现成功率不断上升。而且在第 200 个时隙之后,邻居发现成功率趋于稳定,对比分析不同信息发送率曲线可看出,随着信息发送率的增大,邻居发现成功率逐渐减小,这是因为随着信息发送率的增大,避让时隙必然越来越小,节点发送信息便有可能在同一个时隙内接收多条

信息,导致信道冲突的产生,进而影响到邻居发现成功率。由图 9 可知,当信息发送概率为 0.125 和 0.170 时,在第 200 个时隙可以很好地完成邻居发现,根据信息发送概率为避让时隙倒数的关系可知,信息发送概率为 0.170 时,对应的时隙数为 6,信息发送概率为 0.125 时,对应的时隙数为 8,所以本文选取时隙数为 6 的情况下信息发送率为 0.17 时为相对最优情况,进行以下实验分析。

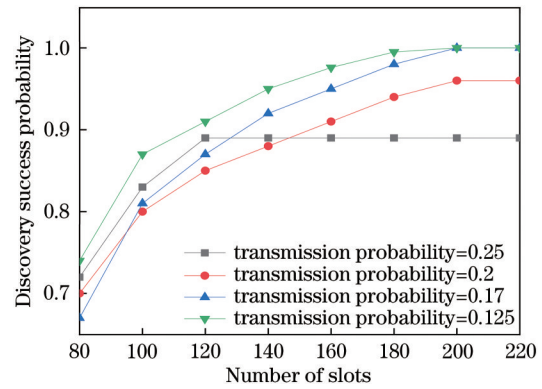


图 9 邻居发现成功率与不同信息发送概率对比曲线
Fig. 9 Comparison curves between neighbor discovery success probability and different information transmission probabilities

确定随机避让概率之后,进行 TDRB 算法、单令牌算法和 MTRB 算法性能分析比较,其中 MTRB 算法中的令牌个数选取为总节点个数的一半。仿真环境为 $400\text{ m} \times 400\text{ m} \times 400\text{ m}$ 空间随机抛洒 16 个节点,设置节点间最大通信距离为 150 m,随机避让概率为 0.17。仿真结果如图 10 所示,图 10(a)和(b)结果表明,TDRB 算法和 MTRB 算法邻居发现完成时间最短,基本在 180 个时隙达到 100%;单令牌算法在第 500 个时隙才趋于稳定状态,完成全部邻居发现,这是因为 TDRB 算法虽然

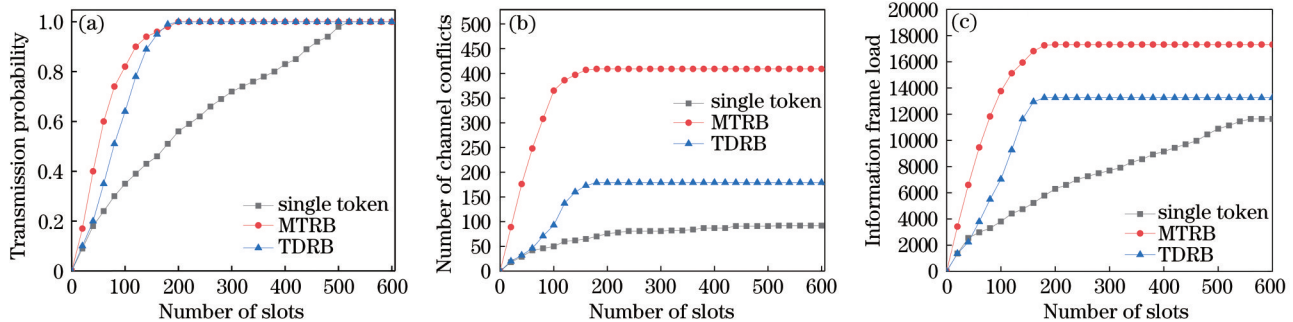


图 10 各邻居发现方法性能对比分析。(a)发现成功概率;(b)信道冲突次数;(c)信息帧负载数
Fig. 10 Performance comparison of neighbor discovery methods. (a) Discovery success probability; (b) number of channel conflicts; (c) information frame load

刚开始只有一个令牌节点进行邻居发现过程,但是随着时隙的延长,令牌个数逐渐增多,邻居发现效率也随之提高;MTRB算法初始时多令牌节点进行邻居发现使得邻居发现效率变快,但是由于初始时令牌节点个数太多,信道冲突也越大,导致其邻居发现效率变低。对比信道冲突次数发现令牌衍生算法明显少于MTRB算法。说明TDRB算法相比于单令牌算法和MTRB算法而言更好地平衡了冲突次数和发现概率。

图10(c)仿真结果表明:刚开始随着时隙的延长,三种算法的信息帧负载数均在不断上升,但是对比发现在第180个时隙之前,MTRB算法信息帧负载数增速最快,单令牌算法增速最慢。这是因为MTRB算法初始时便有多令牌持有者同时进行邻居发现,所以信息帧的发送数量也是最多的,单令牌因为同一时刻只有一个令牌发起邻居发现,所以此算法的增速是最慢的。其次,对比

三种算法可知在第550个时隙处,三个算法信息帧负载数均趋于平缓,这表明此刻三种算法均完成全部邻居发现且不再发送交互信息帧。在此刻对比三种算法信息帧负载数可知MTRB算法负载数最多,单令牌负载数最少,TDRB算法介于两者之间。

邻居发现方法的性能与网络节点密度密切相关,所以对于TDRB算法有必要仿真分析节点密度变化对本文算法的影响。对于每一种节点密度的网络,随机避让范围的取值是非常重要的,所以在仿真实验前需要事先确认其随机避让范围,本文通过上文所述方法仿真分析出8节点、16节点、32节点的最佳随机避让概率值为0.33、0.17、0.10,其他仿真条件同上,仿真性能主要分析邻居发现完成时间以及节点冲突次数。仿真结果如图11所示,结果表明:随着节点密度的增加,邻居发现完成时间变长,节点冲突次数增大。符合预期结果。

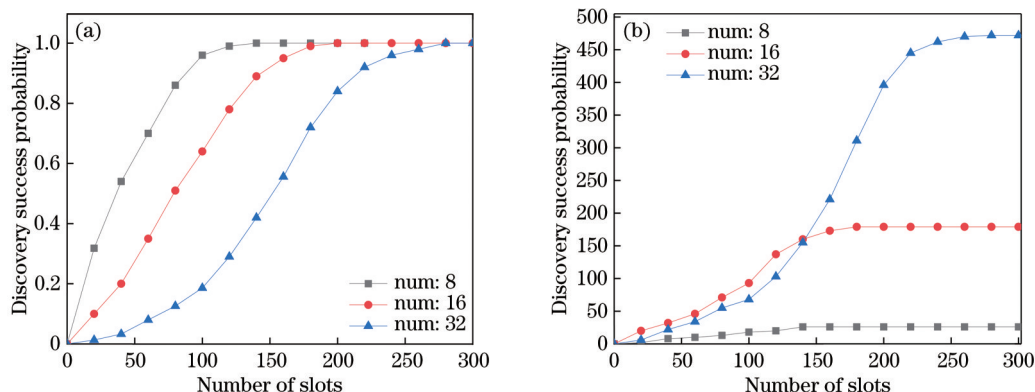


图11 TDRA邻居发现方法性能与节点密度的关系。(a)发现成功概率;(b)信道冲突次数

Fig. 11 Relationship between performance of TDRA neighbor discovery method and node density. (a) Discovery success probability; (b) number of channel conflicts

4 结 论

本文借鉴了经纬线划分球形的思想,改进了一种经纬非均匀分布的节点通信模型,使用单一变量法原则通过仿真分析求解每条纬线上最佳经线的分布个数,来实现满足三维空间全覆盖的最佳经纬分布方式,最后与改进前的经纬均匀分布模型进行了对比分析,仿真表明,当改进前模型在实现最高邻居发现效率的同时改进后的节点模型也达到了相同的效果。且改进后模型在总LED节点个数上较改进前模型减少了近20%。

另外,本文分析了邻居发现信道冲突的原因,设计了一种包含随机避让数值的信息帧结构,并通

过仿真分析得出节点密度确定情况下的随机避让概率;然后将提出的TDRB邻居发现算法与单令牌算法与MTRB算法进行了性能比较,仿真结果表明,本文的TDRB算法在邻居发现效率上远高于单令牌算法,在信道冲突上明显少于MTRB算法;最后仿真分析了TDRB算法本身性能与节点密度的关系,结果显示随着节点密度的增大,邻居发现时间延长,信道冲突变大,符合预期结果。

参 考 文 献

- [1] Wu C Y, Wang M Z, Zhang X D, et al. UAV cluster networking communication technology [J]. Information & Communications, 2019, 32(7): 128-130. 吴超宇, 王明珠, 张旭东, 等. 浅谈无人机集群组网

- 通信技术[J]. 信息通信, 2019, 32(7): 128-130.
- [2] Ma Q, Zhu B, Zhang H W, et al. Low-altitude UAV detection and recognition method based on optimized YOLOv3[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(20): 201006.
马旗, 朱斌, 张宏伟, 等. 基于优化 YOLOv3 的低空无人机检测识别方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(20): 201006.
- [3] Shalaby M, Saad W, Shokair M, et al. Evaluation of electromagnetic interference in wireless broadband systems[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 96(2): 2223-2237.
- [4] Yuan R Z, Ma J S. Review of ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. China Communications, 2016, 13(6): 63-75.
- [5] Song P, Liu C, Zhu L, et al. Analysis of single-scatter path loss in wireless ultraviolet communication in mobile scene[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0406001.
宋鹏, 刘春, 朱磊, 等. 移动场景下无线紫外光通信单次散射路径损耗分析[J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0406001.
- [6] Song P, Zhou X L, Zhao T F, et al. Node design and analysis of communication performance between nodes in ultraviolet mobile ad hoc networks[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0306004.
宋鹏, 周显礼, 赵太飞, 等. 紫外光移动自组网节点设计及通信性能分析[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0306004.
- [7] Liang J B, Zhou X, Ma F Q, et al. Low-latency neighbor discovery algorithm based on multi-beacon message in mobile low-duty-cycle sensor network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(8): 178-188.
梁俊斌, 周翔, 马方强, 等. 移动低占空比传感网中基于多信标消息的低时延邻居发现算法[J]. 通信学报, 2019, 40(8): 178-188.
- [8] Zhao Y B, Zuo Y, Qin H, et al. A neighbor discovery protocol in ultraviolet wireless networks [C]//Asia Communications and Photonics Conference 2014, November 11-14, 2014, Shanghai, China. Washington, D.C.: OSA, 2014: AW3G.5.
- [9] Bakht M, Kravets R. SearchLight: asynchronous neighbor discovery using systematic probing[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2011, 14(4): 31-33.
- [10] Pang L P, Yin F. A neighbor discovery algorithm based on time slot optimization[J]. Modern Computer, 2017(5): 11-13.
庞利平, 殷峰. 一种基于时隙优化的邻居发现算法研究[J]. 现代计算机(专业版), 2017(5): 11-13.
- [11] Nagaraju S, Gudino L J, Sood N, et al. Multiple token-based neighbor discovery for directional sensor networks[J]. ETRI Journal, 2020, 42(3): 351-365.
- [12] Zhang H, Li B, Yan Z J, et al. An asynchronous neighbor discovery protocol based on double tokens in directional ad hoc networks[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(1): 62-70.
张航, 李波, 闫中江, 等. 定向自组织网络中一种基于双令牌的非同步邻居发现协议[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(1): 62-70.
- [13] Zhao T F, Wang J, Wang S Q, et al. Underwater wireless optical communication multi-tokens random backoff neighbor discovery method[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2019, 36(9): 1475-1482.
- [14] Arnon S, Kedar D. Non-line-of-sight underwater optical wireless communication network[J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 2009, 26(3): 530-539.
- [15] Zhao T F, Guo J W, Li H C, et al. Ultraviolet detection and location of power line corona in UAV track[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(2): 309-315.
赵太飞, 郭嘉文, 李晗辰, 等. 无人机航迹中电力线电晕紫外探测与定位[J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 309-315.
- [16] Zhao T F, Wang J, Zhang J, et al. Neighbor discovery method for frogmen cooperation in underwater wireless optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1206002.
赵太飞, 王晶, 张杰, 等. 蛙人协作中的水下无线光通信邻居发现方法[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1206002.