

基于 MATLAB-GUI 的定向多波束自组网仿真平台设计与实现

王 瑜¹ 李永康¹ 黄子轩² 张 靖²
WANG Yu LI Yongkang HUANG Zixuan ZHANG Jing

摘 要

利用数学仿真软件 MATLAB 实现定向多波束网络环境的模拟,设计并实现了基于项目研发的定向多波束自组网交互式仿真平台。采用分层模块化结构设计思想,利用底层数据存储模块实现数据存储及调用;利用中层 TDMA 进程模块实现 TDMA 体系结构通信,包括邻居发现时段中邻居发现和资源预分配进程,以及业务传输时段中数据通信和资源动态分配进程;利用上层 GUI 交互模块实现人机交互。仿真实验证明所设计的平台可以模拟多种定向自组网络环境,不同环境下对时隙资源和频率资源申请和分配均有所影响,可为定向多波束自组网数据链路层资源分配的研究开发工作提供参考。

关键词

定向多波束; 自组网; 仿真平台; MATLAB; 资源分配

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.09.032

0 引言

定向多波束自组网是使用多波束定向天线的自组织网络,网络中的每个节点地位对等,具备发送、接收和转发的能力。该网络具有节点功能不同、时间空间频率等资源受限、无中心基站和自组织性、支持多跳路由、网络拓扑动态变化等特点,这些特点使得网络性能与拓扑结构密切相关^[1-3]。与传统全向天线相比,定向天线能够增加网络容量,增大传播距离,减小功耗,增加信号的抗干扰和抗截获能力,不易摧毁,在战术 Ad Hoc 网络上意义重大^[4]。然而由于定向多波束自组网受无中心基站、资源有限等条件的限制,为了有效提高网络性能,增加网络容量和资源利用率,需要提供高效的组网协议。该网络研究涉及资源种类的定义、资源申请和分配流程的设计、资源分配算法的设计、Qos 机制的设计等,为了验证数据链路层资源分配整体架构和关键算法的有效性,需进行系统的仿真实验。定向多波束自组网受定向多波束天线等硬件资源的限制,使系统的分析、设计、仿真变得复杂。因此,设计和实现定向自组网仿真平台是非常有必要的。

目前国内外有部分学者已通过多种仿真软件对定向自组网进行仿真研究。基于 Opnet 的仿真平台^[5-7]是一种网络性能仿真软件,可对网络性能进行预测管理和仿真研究,可以准确分析复杂网络的性能和行为,但其使用较为复杂,学习门槛较高,且开源资料较少,使用不方便。

基于 OMNET++ 的仿真平台^[8-9]是专门为大型网络提供开源的、基于组件的、模块化的开放网络仿真软件,适合应

用在无线传感器网络仿真中,但其对于拓扑异变、高机动的网络环境效果较差。基于 NS2 的仿真平台^[10-11]是一种面向对象的、离散事件驱动的模拟器,采用 C++ 和 OTCL 两种面向对象的编程语言开发,但其学习门槛较高,且没有定向天线模块,目前已停止更新,较为过时。

为了克服已有平台的不足,更加贴合项目实际仿真需求,本文设计并实现了基于 MATLAB-GUI 的定向多波束仿真平台。MATLAB 是美国 MathWorks 公司出品的商业数学仿真软件,可用于数据分析、无线通信、信号处理等通信领域。此平台基于 MATLAB-GUI 进行设计,是为了依托 MATLAB 环境提供的高性能数值计算和可视化页面,大大缩短开发周期。此平台主要优点具体体现在以下三方面。

(1) 运算处理高效:依托 MATLAB 高性能数值计算能力,可方便进行各种向量矩阵运算,便于对节点多种资源进行分配调整及存储查看。

(2) 人机交互简便:利用 MATLAB-GUI 工具,可方便设计人机交互页面,便于用户在各种仿真参数下实验。

(3) 采用分层模块化结构设计思想,具有良好的可扩展性,易于维护。

本仿真平台在 TDMA 协议下运行,仿真进程分为邻居发现时段和业务通信时段,从工程实现的角度验证分析了项目方案下节点状态序列号和功率等资源的分配以及后期动态调整的影响,并对节点入网情况、网络容量、时隙利用率等数据参数进行仿真及可视化分析,为系统的设计提供数据支撑。在此基础上,搭建 GUI 人机交互页面,实现多种网络环境下的仿真。

1. 合肥工业大学计算机与信息学院 安徽合肥 230000

2. 天地信息网络研究院 安徽合肥 230000

1 仿真平台结构及其实现

基于 MATLAB-GUI 的定向多波束自组网仿真平台采用层次模块化的设计思路,其总体架构如图 1 所示。该平台主要分为三个层次,分别是:上层 GUI 人机交互模块、中间层 TDMA 进程模块、下层数据存储模块。

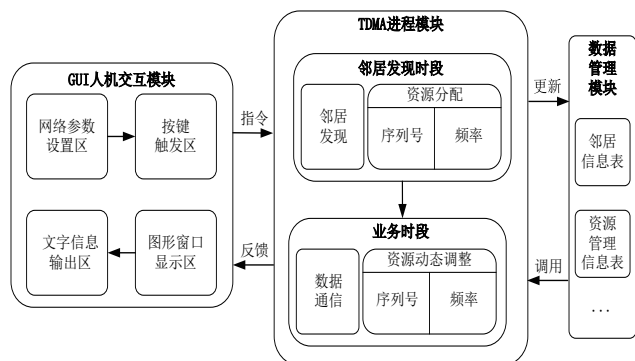


图 1 仿真平台总体架构

上层 GUI 人机交互模块主要提供人机交互平台,其中包括网络参数设置区、按钮触发区、图形窗口显示区和文字信息输出区。用户可根据该平台自行设置拓扑范围、触发条件等参数,对不同的网络环境进行仿真,并将结果以图形、文字等方式进行显示。

中间层 TDMA 进程模块实现整个仿真中所有节点按照时隙进程推进。该进程分为邻居发现时段和业务通信时段,实现邻居发现、数据通信、资源分配及调整等功能。

底层为数据存储模块,主要存储邻居节点信息表、资源管理信息表等数据,为上层模块服务。

三层模块彼此之间相辅相成,其中上层 GUI 人机交互模块设置指令,触发中间层 TDMA 进程模块展开具体仿真;TDMA 进程模块接受上层指令并调用底层数据存储模块,计算并更新相关数据;底层数据存储模块接收中间层数据更新,并将具体结果反馈给上层人机交互模块进行显示。

1.1 数据存储模块

MATLAB 是专业数学仿真软件,故有必要利用其强大的数据管理能力。数据存储模块主要存储节点的邻居信息表、资源管理信息表和系统信息等数据,为上层模块调用服务,具体内容如图 2 所示。其中,邻居节点信息表主要包含邻居节点的编号、节点状态序列号、位置、优先级、通信频次等信息,可代表多波束的使用情况;资源管理信息表主要包含各个节点的时间、频率等资源信息。节点信息较为复杂,故模块主要采用结构体等变量进行数据存储。结构体变量可将同一节点的多个数据类型存储在一起,在后期进行函数计算与调用时较为便利。数据存储模块可为后期模拟定向多波束仿真场景以及邻居发现等仿真进程做铺垫。

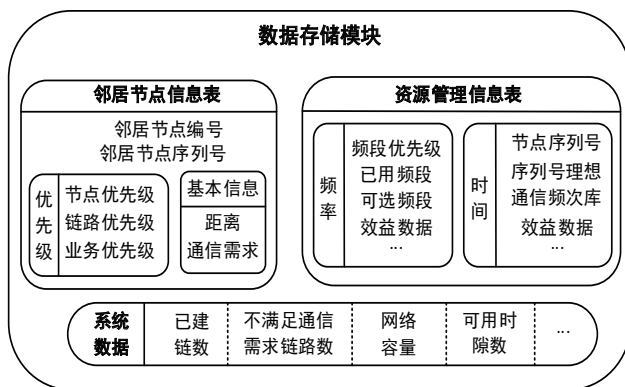


图 2 数据存储模块示意图

网络受定向多波束条件的限制,故需设置波束变量来模拟多波束场景,而已建链的邻居数恰好可反映波束使用情况,故可直接通过邻居信息表来代表具体波束使用情况。如某波束已建链,则在相应的邻居信息表的位置更新该条波束的具体信息,包括使用频段、优先级等;若某波束未使用,则相应的邻居信息表信息设置为空,该波束可根据具体使用情况后期被调用。

由于仿真中多处涉及随机数生成,每次仿真运行结果不同,不便具体复现仿真结果。为解决此问题,采取设置随机数种子的方式,一旦随机数种子确定,每次仿真运行结果相同,就便于后期复现调试分析。

1.2 TDMA 进程模块

1.2.1 TDMA 仿真进程设计

由于本项目采用 TDMA 协议通信,协议将时间单元划分为若干个时帧;每个时帧划分为两个时段,分别为邻居发现时段和业务时段;每个时段划分为若干个时隙。由于 MATLAB 程序为顺序执行,而各个节点是并行运行的,为了从系统上较好地模拟整个进程,采用 TDMA 进程模块,按照先遍历时帧,再遍历时隙,最后遍历节点的顺序执行,具体实现伪代码如下:

步骤 1 时帧开始前参数准备

步骤 2 TDMA 进程仿真

for 时帧 = 1:N

for 时隙 = 邻居发现时段 (1:P): 业务时段 (1:Q)

if 邻居发现时段

for 节点 = 1:n

if 新入网节点

发现并建立邻居;

被分配序列号资源;

被分配频段资源;

else if 已入网节点

更新邻居信息表和资源管理信息表;

end if

```

end for
elseif 业务时段
    数据通信;
    调整序列号资源;
    调整频率资源;
end if
end for
end for

```

如图3所示,首先对第1时帧进行仿真,按节点编号顺序依次执行邻居发现时段第1时隙中的进程,执行完毕后,按照节点编号顺序再依次执行第2时隙中的进程。以此类推,直到执行完第1时帧中邻居发现时段和业务时段的所有时隙后,再对第2时帧进行仿真。以此类推,直到执行完N个时帧,仿真结束。

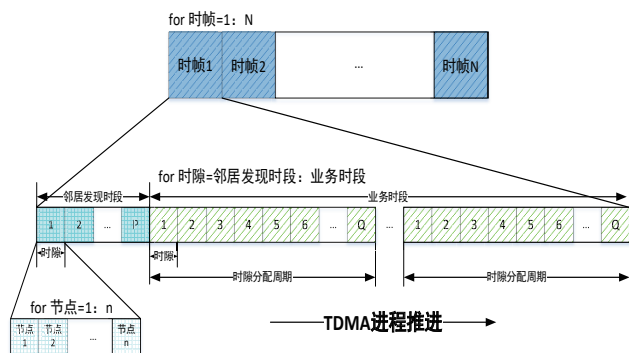


图3 TDMA 进程模型

1.2.2 邻居发现时段与业务时段

按照 TDMA 模块框架,依次进行邻居发现时段和业务时段的仿真,具体流程如图4。

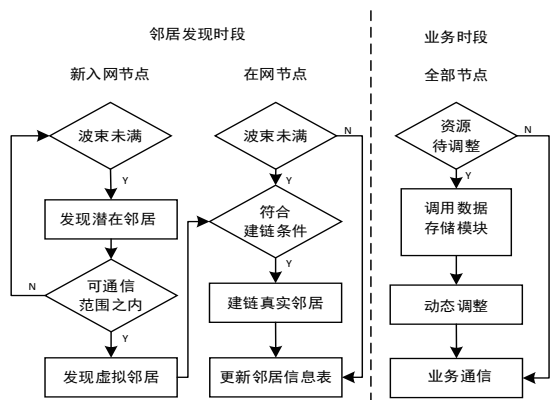


图4 TDMA 具体时段进程图

其中,邻居发现时段,在全部节点入网前需分别考虑新入网节点和在网节点的不同进程。新入网节点要经历分配时间及频率资源、发现邻居、建立邻居信息表等进程,在网节点要经历更新自身邻居信息表等进程。业务时段,全网节点需进行时间及频率资源调整,以获取较佳的系统性能,然后进行业务数据通信。下面具体分析在定向多波束场景下各时

段进程的具体仿真方法。

对于邻居发现时段中新入网节点的邻居发现过程,仿真采用先确定潜在邻居,再发现虚拟邻居,最后以建链真实邻居的方式来模拟真实场景。其中,潜在邻居指在通信范围内的所有节点集合;虚拟邻居指在潜在邻居集合中随机抽取若干次的节点集合(数量可大于可用波束数量);真实邻居指在虚拟邻居中优先级最高的若干节点集合(数量小于等于可用波束数量);各类邻居设置相应的邻居表以供调用。通过多次随机数抽取邻居表集合元素的方式来确定具体邻居,以模拟波束扫描过程。其中,邻居表可含零元素,若随机抽取的元素为零元素,则代表未发现邻居,以模拟波束未探测到邻居的场景,邻居发现概率可由零元素数量和抽取次数决定。对于业务时段资源动态调整过程,采用调用数据存储模块取符合条件数据的交集的方式进行,这样直接调用而未实时计算,可大大提高程序运行效率。

1.3 GUI 人机交互页面

本平台基于图形用户开发环境(graphical user interface development environment, GUIDE)设计了定向多波束自组网仿真平台,用户可通过 GUI 页面嵌入仿真程序、设置仿真参数,又可将仿真数据以图形文字化形式进行显示,实现人机交互的目的。

1.3.1 整体页面设计

本定向多波束自组网 GUI 仿真平台整体界面设计如图5所示。该平台分为网络参数设置区、按键触发区、图形窗口显示区和文字信息输出区。下面具体介绍各个区域的作用。

1.3.2 网络参数设置及触发区

为了模拟不同网络环境下的系统性能,更好地进行人机交互,设计网络参数设置区以达到灵活仿真的目的。用户可设置多种网络参数,如网络拓扑范围、链路优先级权重、仿真时帧数、每一时帧入网节点数、频率夹角触发参数等。其中,频率夹角触发参数指相同频率波束夹角在参数范围内,频率资源需动态调整。

按键触发区的主要目的是用户设置相应仿真参数后,通过按键动作触发回调函数进行相应仿真。如用户可预先输入节点编号,通过相应按键触发,可查询节点状态序列号、节点邻居信息表等信息。

1.3.3 图形文字窗口显示区

图形窗口显示区可方便用户从时帧、系统整体等角度评估系统性能。其主要可显示网络拓扑图、每一时帧节点入网统计图、每一时帧链路数量统计图、各频段资源使用情况统计图等信息。其中,每一时帧节点入网数量统计图可显示每一时帧新节点入网数量以及该时帧下已入网节点数量;每一时帧链路数量统计图可显示该时帧下网络已建链数以及通信频次不满足通信需求的链路数;各频段使用情况统计图可显示 F1、F2、F3、F4 四个波束频段在每一时帧的使用情况,以及四个波束整体使用情况数量统计。

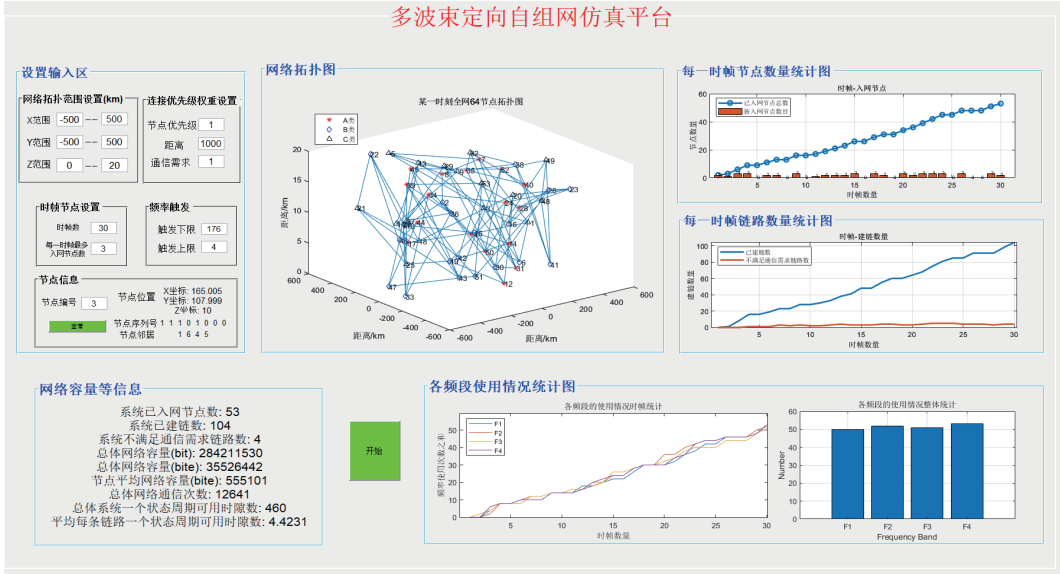


图 5 GUI 仿真平台整体界面设计

文字信息输出区可查看系统网络容量等信息，包括总体网络容量、总体通信频次、平均每条链路在一个状态周期内可用时隙数等信息，方便用户进行数据统计。

2 仿真平台验证

2.1 仿真参数设置

仿真平台软硬件详细参数如表 1 所示。

表 1 仿真实验软硬件详细参数

参数名称	参数配置
仿真实验操作系统	Microsoft Windows 10 专业版（x64 位）
运行内存	8.00 GB
处理器及型号	Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU @ 3.60 GHz
MATLAB 版本	MATLAB R2018a

具体网络参数配置如表 2 所示。

表 2 具体网络参数配置

名称	参数
网络拓扑范围	500 km×500 km×20 km （三维密集）
网络拓扑范围	2000 km×2000 km×20 km（三维稀疏）
最大通信半径	500 km
组网节点最大规模	64
节点类型	A、B、C 三类
每一节点可用波束	4 条
仿真时帧数	70
每一时帧时隙数	4+16（邻居发现+业务）
每一时帧节点入网数	0~3 随机
频率触发范围	下限 176° 上限 4°
节点优先级范围	节点优先级 1~8
时隙状态序列号	时隙分配周期为 8
通信需求档位	高中低档 1:1:1
随机数种子参数	512

2.2 具体仿真结果

在上述仿真场景下，具体网络拓扑图见图 6。其中，网络拓扑分为稀疏拓扑和密集拓扑，仿真空间设置为三维，通过拓扑图可查看每一节点的具体位置、类别、已建链邻居等具体细节。

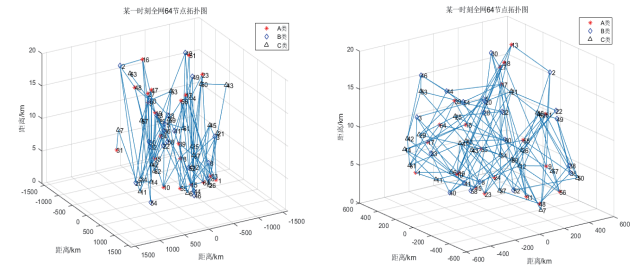


图 6 网络拓扑图（左稀疏右密集）

按照每一时帧节点入网数目随机进行，每一时帧可入网 0~3 个节点，图 7 展示每一时帧入网情况，可见在第 49 时帧节点全部入网。

针对资源动态分配的问题，图 8 展示了在密集拓扑下每一时帧全网已建链数以及加入动态调整与不加动态调整操作时全网通信频次不满足通信需求的链路数对比，可见在第 50 时帧后节点全部入网，全网已建链数稳定在 120 条左右，链路负载接近饱和。不加动态调整操作时，随时帧推进，全网不满足通信需求的链路数逐渐增加，直至趋于平稳，最大可达 22 条，占比近 20%；加入动态调整操作后，随时帧推进，全网不满足通信需求的链路数上下波动，但最终维持在 3 条，占比约 2.5%，说明动态调整操作能够较好地改善系统性能，并且调整能够达到收敛。

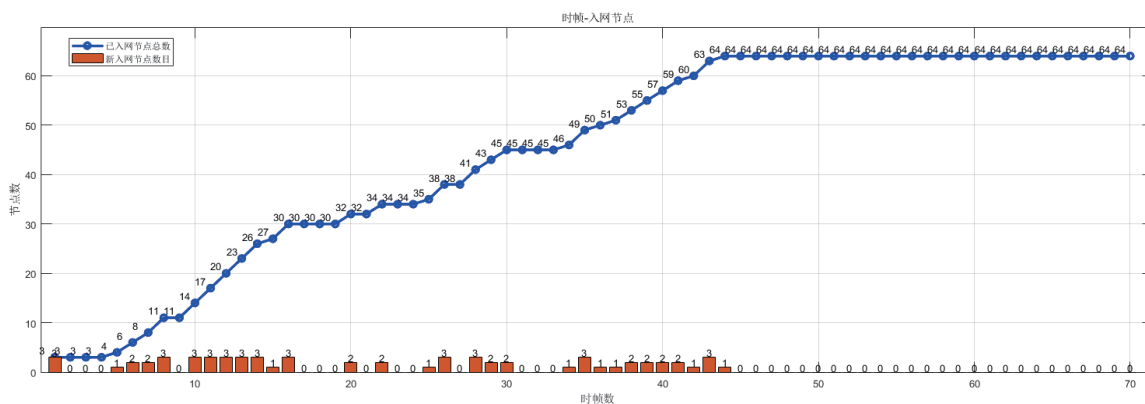


图7 每时帧节点入网情况

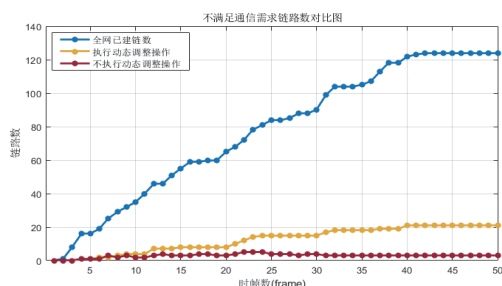


图8 不满足通信需求链路数对比图

图9展示了各个波束频段使用情况, 全网使用频段数量相对平均。这说明在项目波束动态选择频段的简化方案下, 将频带划分为4个频段并引入频率复用技术, 节点能够使用共同频段, 64个节点全部入网后, 4个频段能够在全网得到平均分配。

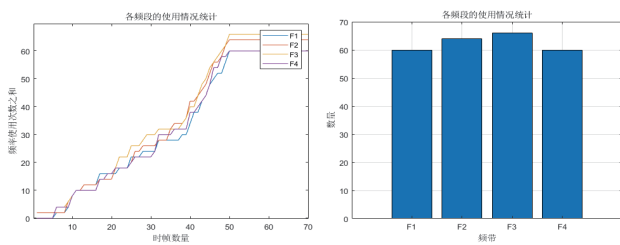


图9 各个频段波束使用情况

3 结论

本文介绍了基于 MATLAB-GUI 的定向多波束自组网仿真平台的结构及其实现, 阐述了不同层的主要功能, 并对时隙资源、频率资源分配及调整状况进行分析。通过仿真结果表明, 本平台可有效地分析项目提出的资源分配算法, 可完成定向多波束不同网络环境下的仿真验证工作, 且具有良好的人机交互性。

参考文献:

[1] 刘军, 孙茜, 李少华, 等. 基于定向天线的无线自组网拓

扑控制算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(9): 1257-1260.

[2] PAOLO S. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks[J]. ACM computing surveys, 2005, 37(2): 164-194.

[3] ZHANG T, YANG K, CHEN H. Topology control for service oriented wireless mesh networks[J]. IEEE wireless communications, 2009, 16(4): 64-71.

[4] 鲁璐. 基于定向天线 Ad Hoc 网络的 MAC 协议研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

[5] 蒋秀波, 宋早迪, 张日飞. HLA 和 OPNET 的战术通信网半实物仿真[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(10): 150-152+156.

[6] 王文博, 张金文. OPNET Modeler 与网络仿真[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.

[7] OPNET[EB/OL]. [2024-03-23]. <http://www.opnet.com.tw>.

[8] 石为人, 黄河, 鲜晓东, 等. OMNET++ 与 NS2 在无线传感器网络仿真中的比较研究[J]. 计算机科学, 2008(10): 53-57.

[9] OMNET++[EB/OL]. [2024-03-23]. <http://www.omnetpp.org>.

[10] 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS 与网络模拟[M]. 1版. 北京: 人民邮电出版社, 2003.

[11] ISSARIYAKUL T, HOSSAIN E. Introduction to network simulator 2 (NS2)[M]. New York: Springer US, 2012.

【作者简介】

王瑜(2000—), 男, 山东威海人, 硕士研究生, 研究方向: 定向自组网、无线感知。

李永康(1999—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 研究方向: 无人机自组网、资源分配。

黄子轩(1994—), 女, 安徽淮南人, 博士研究生, 研究方向: 无线通信物理层算法、无线通信网络协议。

张靖(1983—), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 研究方向: 无线网络架构与协议、无线通信系统设计。

(收稿日期: 2024-05-29)