

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005328

# 5G移动通信下无人机高速公路巡检防碰撞技术研究

董明明

(陕西交通职业技术学院 西安 710018)

**摘要:**为消除无人机在高速公路巡检中的安全隐患,避免由于碰撞而导致的坠地等风险,基于对无人机巡检防碰撞体系及其自主防碰撞执行过程的研究,采用三维动态碰撞预测与最优问题动态碰撞规避算法,提出一种适用于三维空间的无人机动态碰撞避让技术,并借助5G通信技术搭建空中与地面通信网络,保证无人机在遇到随机障碍物时可保持最小安全间距。经仿真,本文无人机防碰撞技术在算法运行效率、航路代价以及航路质量3方面均优于最优几何分析无人机防碰撞技术,避让策略行之有效。

**关键词:**5G移动通信;无人机;动态碰撞预测;动态碰撞规避

**中图分类号:**TN91 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**510.50

## Research on UAV expressway patrol anti-collision technology under 5G mobile communication

Dong Mingming

(Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** In order to eliminate UAV potential safety hazard in expressway patrol, and avoid the crash risk because of collision, the paper uses 3D dynamic collision prediction and optimal problem dynamic collision avoidance arithmetic to propose an UAV dynamic collision avoidance technology that is appropriate for three-dimensional space. And then, it uses 5G communication technology to construct communication network, when UAV meet random obstacle, it can make it maintain smallest safety clearance. Simulation results show that, paper's technology is better than the technology based on optimal geometric in algorithm efficiency, route cost and route quality 3 aspects, the collision avoidance strategy is useful.

**Keywords:** 5G mobile communication; UAV; dynamic collision prediction; dynamic collision avoidance

### 0 引言

无人机高速公路巡检属于新兴巡检方式<sup>[1]</sup>,可在不影响交通与驾驶员安全行车的前提下,快速采集路面信息并向巡检人员发送。在无人机技术迅速发展、我国低空领域对外开放的背景下,无人机巡检高速公路获得了技术与法规层面的保证。携带图像采集装置的无人机可沿直线进入高速公路高空,高效采集平均车速、车道占有率等高速公路交通信息,并对火灾、拥堵、交通事故等进行监测,为巡检人员提供重要参考依据<sup>[2]</sup>,提高高速公路巡检率。所以,应用无人机开展高速公路巡检工作受到交通领域的广泛关注<sup>[3]</sup>。然而,无人机在实际的高速公路巡检中有很多安全问题存在,如无人机由无线电控制,操控人员须具备足够的专业知识,如果没有接受专业的培训,容易出现误操作,致使无人机同其他物体发生碰撞。另外,受到作业要求与

工作环境等因素的影响,无人机飞行时可能会超出操作人员视野或无线电控制范围,这些安全隐患亦将无人机置于发生碰撞进而坠地的风险中。对此,实现无人机自主防碰撞意义重大。

一个典型的无人机系统包括无人机、地面控制装置及两者间的通信系统<sup>[4]</sup>。在其自主防碰撞领域,涉及到的理论与技术有很多,Khatib<sup>[5]</sup>基于人工势场提出首个防碰撞方法,存在无法保证相对距离比最小安全距离大的不足;Maclain<sup>[6]</sup>研究协同航迹规划方法对多机防碰撞问题的解决,但其适用面较窄,仅能应用于合作型飞机,不适用于未知、不可控的飞机。Shin等<sup>[7]</sup>基于几何分析法对碰撞冲突进行预测,测试只控制航向角的障碍物避让方法的实用性及稳定性,但其仅就二维情况进行了考虑。此外,部分学者通过对路径规划算法的采用与改进达到避免无人机与地面碰撞的目的,但与障碍物数量的增加相伴随,避障算法的复

收稿日期:2020-11-06

• 41 •

杂程度会随之而增加。Saboori 等<sup>[8]</sup>运用几何最优法,将障碍物视作圆点,对无人机速度与位置进行修正,当速度矢量与保护圆相交时,意味着有冲突发生,故通过将方向角改变的方式达到速度与圆相切的目的,以此实现对冲突的规避,然而该方法也仅适用于二维平面。另一方面,4 G 技术目前已经成熟,人工智能<sup>[9]</sup>、大数据<sup>[10]</sup>、云平台<sup>[11]</sup>亦得到迅速发展,人类社会正在迎接第 7 次信息革命——基于 5G 的智能互联网时代<sup>[12]</sup>。5G 具有低时延、高可靠、大宽带特点,可形成范在感知、泛在连接与范在智能<sup>[13]</sup>,为无人机高速公路巡检提供更立体与全面的覆盖及更优的传输性能。出于对以往学者研究不足以及 5G 通信技术优势的考虑,本文结合对无人机巡检防碰撞体系及其自主防碰撞执行过程的定性分析,研究并设计一种在三维空间中适用的无人机动态碰撞冲突预测及避让算法,在出现随机障碍物的情况下有效保持最小安全间距,同时,搭建 5G 空中/地面通信网,保证数据传输时效性与准确性,加强安全飞行的保障。

### 1 无人机巡检防碰撞体系及其自主防碰撞执行过程

就飞行器而言,防碰撞是一个永恒且与时俱进的问题<sup>[14]</sup>。当无人机进入高速公路上空的公共飞行空域后,其自主防碰撞系统便应与空域的飞行管制体系有效融合,同时,有效衔接空中交通管理系统,形成 5 层防碰撞体系:1) 空域结构,以全部空中飞行器为对象的交通安全,即利用高度与航路划分对飞行器的空中交通进行规划,避免无人机同其他飞行器迎面相遇进而发生碰撞;2) 空中交通管理系统,国家为保证整个空域交通安全而建立并运行的管控系统,通过系统对空域内全部飞行器进行监控与指挥,让其保持安全间隔,若有潜在冲突出现,则指挥机动规避;3) 无人机地面任务控制系统,监控空域内全部受控无人机,与空中交通管理系统建立通信,若有碰撞冲突出现,则由地面指控人员实施避让策略;4) 空中防撞告警系统(traffic collision avoidance system, TCAS)<sup>[15]</sup>,向有人机飞行员发出指示,让其主动规避与无人机的碰撞;5) 无人机自主防碰撞系统,让无人机对潜在碰撞进行自主的规避。显然,本文研究属于防碰撞体系的第 5 层。

由于无人机上无飞行员操控,无法安装只有告警功能的 TCAS,故其防碰撞必须保证全过程的自主性。获知碰撞威胁后,无人机需自主规避,给出规避机动指令,将其发送至机载飞行控制系统或小型自动驾驶仪,控制自身执行防碰撞规避。在与威胁脱离之后,无人机可按原航路继续前行。无人机巡检防碰撞执行过程如图 1 所示。

### 2 无人机巡检自主防碰撞技术

#### 2.1 三维动态碰撞预测

以 Bilimoria 等<sup>[16]</sup>的几何分析法为基础,此处对三维动

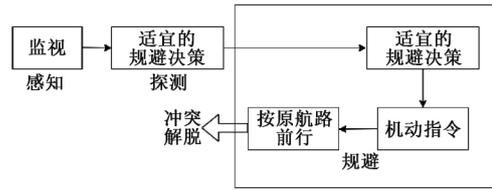


图 1 无人机巡检防碰撞执行过程

态碰撞预测方法进行研究。令  $U_{av}$  与  $B_{ar}$  分别表示无人机与障碍物(假设障碍物同样处于直线运动中),它们的位置与速度分别用  $s_{U_{av}}$  和  $s_{B_{ar}}, v_{U_{av}}$  和  $v_{B_{ar}}$  表示,由此,无人机相对于障碍物的位置与速度表示为  $s = s_{U_{av}} - s_{B_{ar}}, v = v_{U_{av}} - v_{B_{ar}}$ 。继而,无人机巡检自主防碰撞问题可转化为:障碍物相对静止,无人机以速度  $v$  运动。用  $\Lambda$  表示无人机与障碍物之间的最小间隔距离矢量,则有式(1):

$$\Lambda = \frac{s \cdot v}{\|v\|^2} v - s \tag{1}$$

相关研究指出,当质点  $O$  与半径为  $R$  的球体  $I$  分别以常速  $v_0$  与  $v_1$  运行于三维环境中时,若它们之间的最小间隔距离矢量  $\|\Lambda\| \leq R$  且相对距离  $s < 0$ ,二者会发生碰撞。虽然该观点对于常速的假设并不严格,但可将 Nyquist-Shannon 抽样定理作为依据以适宜的更新率  $1/T_s$  进行连续估计,对潜在碰撞作出预测。

#### 2.2 基于最优化问题的动态碰撞规避

在对高速公路进行巡检的过程中,本文提出的无人机对障碍物的规避属于非合作型冲突规避,对此,以下述最优化问题为基础制定无人机动态碰撞规避策略:无人机规避障碍物的保护区,同时,最小化无人机路径的改变。

假设无人机  $U_{av}$  与障碍物  $B_{ar}$  的路径分别表示为  $s_{U_{av}}(t) = [x_{U_{av}}(t), y_{U_{av}}(t), z_{U_{av}}(t)]^T$  与  $s_{B_{ar}}(t) = [x_{B_{ar}}(t), y_{B_{ar}}(t), z_{B_{ar}}(t)]^T$ ,若用速度  $v_{U_{av}}(t)$  表示  $s_{U_{av}}(t)$ ,则有:

$$s_{U_{av}}(t) = s_{U_{av}}(t_0) + \int_0^t v_{U_{av}}(\phi) d\phi \tag{2}$$

若用  $s_{U_{av}}^d(t)$  表示无人机的修改路径,该路径参照所需速度矢量  $v_{U_{av}}^d(t)$  计算得到,则其与原路径的偏离值表示为式(3):

$$s_{U_{av}}^d(t) - s_{U_{av}}(t) = \int_0^t [v_{U_{av}}^d(\phi) - v_{U_{av}}(\phi)] d\phi \tag{3}$$

求解无人机最小化路径的偏离值,即基于动力学约束,经以下线性规划求解最小化量值:

$$\text{s. t. } \begin{cases} \|s_{U_{av}}^d(t) - s_{B_{ar}}(t)\| \geq R, \forall t \geq t_0 \\ \exists t_a^{U_{av}} > 0 \\ \left\{ \begin{aligned} \|\Delta s_{U_{av}}(t)\| &= \left\| \int_0^t \Delta v_{U_{av}}(\phi) d\phi \right\| \\ \min \left\| \int_0^t \Delta v_{U_{av}}(\phi) d\phi \right\| \end{aligned} \right. \end{cases} \tag{4}$$

上式中,前一约束条件的目的在于确保不会侵入最小间隔距离  $R$ ;后一约束条件是动力学约束,由于  $v_{U_{av}}^d$  无法

瞬时达到,因而需要给一个  $t_a^{Uav}$  的时间过渡。

为了通过解析方法将以上防碰撞问题解决,提出 3 个假设条件:1)  $\Delta v_{Uav}(t)$  属于阶梯函数,只有在时间  $t_0$  处速度会发生变化;2)速度固定不变时,无人机沿直线飞行;3)无人机的飞行不受到动力学约束的束缚。基于此 3 个假设,式(4)可简化为:

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & \|s(t_0) + v^d(t - t_0)\| \geq R, \forall t \geq t_0 \\ & \|\Delta s_{Uav}(t)\| = \left\| \int_0^t \Delta v_{Uav}(\phi) d\phi \right\| = \\ & \|\Delta v_{Uav}(t_0)\| (t - t_0) \end{aligned} \quad (5)$$

由于在  $t = t^* \equiv s(t_0) + v^d / \|v^d\|^2, s(t_0) + v^d(t - t_0)$  取得最小值  $\|\Delta^d\|$ ,此时,通过令  $\|\Delta^d\| \equiv R$  满足式(5)中的约束条件,则可进一步将式(5)简化为:

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & \|\Delta^d\| = R \\ & \min_{v_{Uav}^d, Uav^d} \|\Delta v_{Uav}\| \end{aligned} \quad (6)$$

如此,可得到相应的解析解,确定无人机最小化路径偏离值,并进一步将其动态碰撞规避明确。

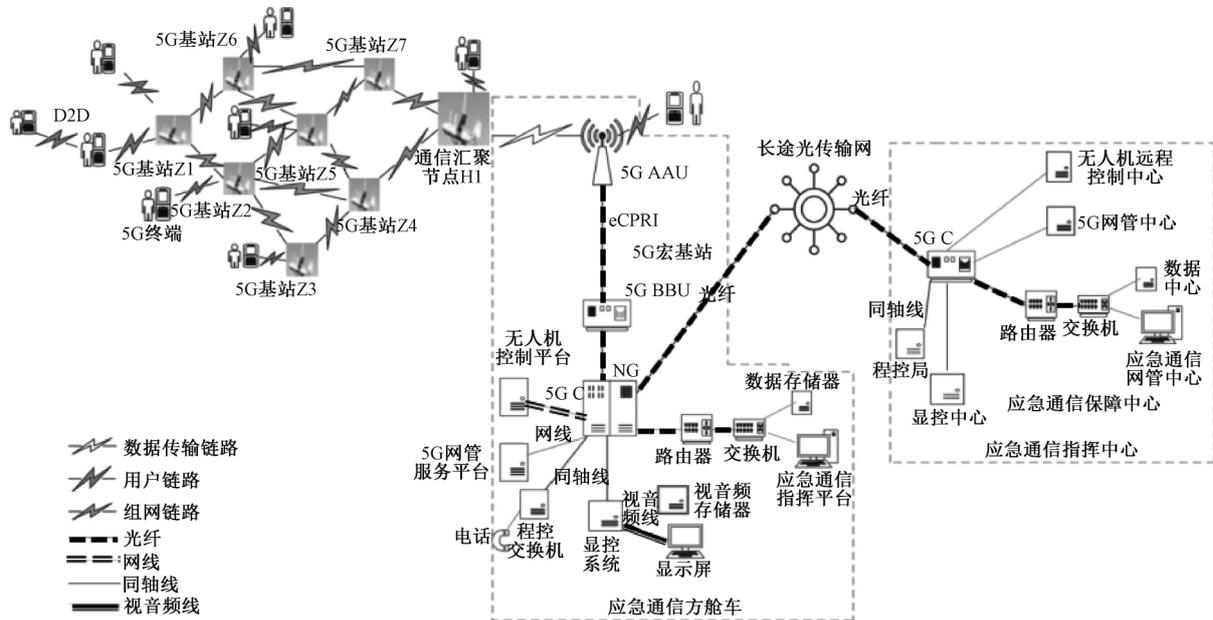


图 2 无人机巡检防碰撞 5G 通信链路

5G 无人机巡检通信链路中涉及 5G 空中通信网、地面通信方舱车以及通信指挥中心 3 个模块。其中,5G 空中通信网通过对任务载荷的搭载来实现,功能为进行 5G 通信。任务载荷包括 5G 通信、组网以及能量管理 3 个子模块,5G 通信子模块对全双工双向中继技术<sup>[19]</sup>以及定向天线覆盖技术<sup>[20]</sup>加以采用,从基础层次上覆盖 5G 信号;组网子模块对组网及无人机飞控功能进行集成,基于全向天线技术<sup>[21]</sup>进行组网链路以及智能组网的建立,并对无人机飞行进行智能控制;能量管理子模块则用于供电。地面通信方舱车进行 5G 宏基站、5G 核心网设备等的配置,前者的回程信

### 3 无人机巡检过程中的 5G 数据通信

#### 3.1 5G 应用性能目标

超高速体验,提高接入速率,为终端用户提供优质的瞬时连接与时延无感知业务体验,赋予其“一触即发”之感;超高速移动,为高度移动用户提供一致于低俗场景的体验,同时,针对速度超过 500 km/h 的用户,依旧做到对其视频类与文件下载类业务速率需求的满足;低时延高可靠连接,支持端到端 1 ms 的时延与近乎 100% 的可靠性;海量终端连接场景,主要应用于高速体验、超高速移动、低延时高可靠连接等场景以及海量终端连接中<sup>[17]</sup>,将为今后网络百亿设备连接能力提供保证,并降低终端成本,延长待机时长<sup>[18]</sup>。

#### 3.2 5G 在无人机巡检中的通信

5G 移动通信通过相应的链接完成无人机与障碍物、地面控制中心之间的通信链路,实现对远、近程的实时控制以及大量数据的传送。图 2 所示为无人机巡检防碰撞应用中的 5G 通信链路。

号经光纤接入后者,后者则由光缆引接席经光缆接入位置最近的通信台站,同通信指挥中心建立起连接。通信指挥中心包括无人机控制、5G 网关以及通信保障 3 个子模块,无人机控制子模块对无人机实施远程监督与控制;5G 网关子模块采用 B/S 架构,通过输入用户名与密码登录,负责无人机等相关数据的通信服务及调度;通信保障子模块则对指挥中心的通信保障负责。

#### 3.3 无人机 5G 通信技术指标

无人机 5G 通信网通过高低频协作组网方式构建,用以覆盖 5G 基础信号,同时规避频率干扰现象。通信链路

对 3.5G 频率予以采用,执行对 5G 信号的覆盖任务,组网链路则基于 5.8G 频率实现组网。无人机的 5G 通信节点所形成的空中 5G 通信网,可对全网节点信息进行共享。结合 5G 与无人机通信的基本需求,设定 5G 通信模块硬件如下:工作主频率 3.5 GHz,最小通信速率大于 20 Mb/s,电源为直流 5~12 V,天线发射总功率 500 mW。

#### 4 无人机巡检防碰撞仿真模拟验证

模拟验证前需先标定无人机与障碍物,通过运动跟踪软件 Motive 来实现,在完成对摄像头的标定工作之后,将反光贴贴于无人机上,为追踪提供便利。之后执行初始化处理操作,激活数据采集单元。采用 MATLAB 软件进行仿真,障碍物一共有 5 个,所处位置分别在(30,35),(65,60),(90,100),(75,20)与(40,105),半径 10 m。首先,采用文献[8]提出的几何最优法进行无人机自动避让防碰撞仿真,设定种群 200 个,最大迭代次数 300 代。将障碍物数据以及目标函数在仿真程序中设定好,采用一维编码方式,将 X 轴坐标点固定,通过仿真得到 Y 轴坐标点,图 3(a)所示为文献[8]提出的基于几何最优方法的无人机避让路线最优解变化曲线,其中,横坐标与纵坐标分别表示迭代次数与最优解。另外,根据仿真程序所得最优解航路点进行障碍图的绘制,得到如图 3(b)所示无人机最优解航路图。

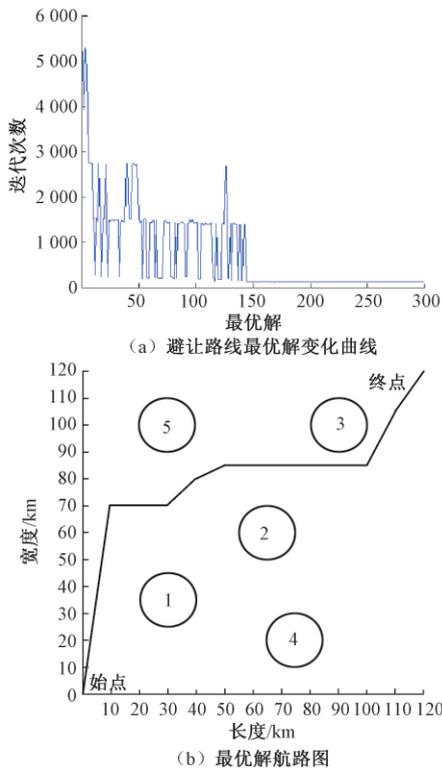


图 3 基于文献[8]几何最优法的无人机避让方案

根据图 3,几何最优法迭代速度比较慢,需经过约 150 迭代才可得到最优解,且基于该方法的无人机避让方案稳

定性不佳,避让航路不平滑,路线比较长,对于无人机平稳飞行是不利的。

进一步地,在相同环境下对本文设计的无人机避让方法进行仿真,得到避让路线最优解变化曲线与最优解航路图分别如图 4 所示。

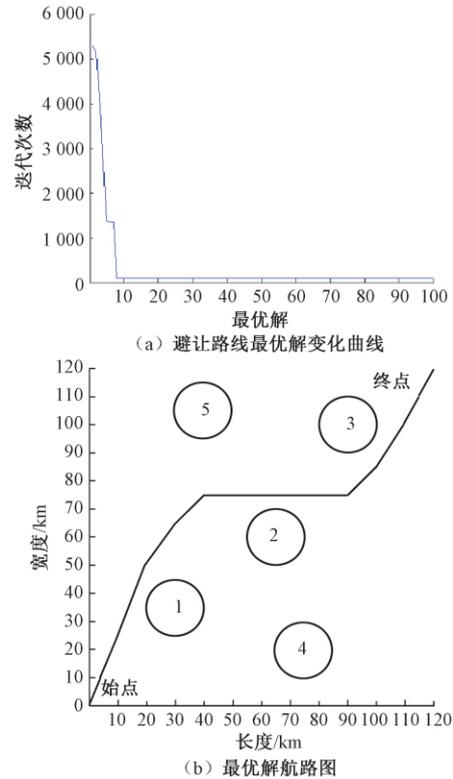


图 4 基于本文算法的无人机避让方案

根据图 4,本文算法迭代速度较快,在第 10 次左右便已得到最优解,且基于该方法的无人机避让方案有较好的稳定性,转弯角度比几何最优算法下的角度小,避让线路较平滑,路线较短,对于无人机的平稳飞行是有利的。

表 1 几何最优法与本文算法避让方案对比

避让方案	路线质量	航路代价	运行效率
文献[8]的几何最优法方案	大转角	102.000 3	大约 150 代
本文算法方案	小转角	94.000 5	大约 10 代

以图 3、4 生成的航路图为基础,通过表 1 对文献[8]提出的几何最优法无人机避让方案与本文算法下的避让方案作进一步的分析与比较,选取路线质量、航路代价以及算法的运行效率(取得最优解时需要的迭代次数)3 个要素对算法优劣情况进行评判。根据表 1,本文算法下的无人机避让方案在 3 个评判要素上均优于文献[8]几何最优法下的避让方案,且本文算法对路径的规划结果对于无人机飞行的适用性更强,可对障碍物进行有效的规避,且行驶

的线路比较短,在燃油的节省方面亦有优势,该方案行之有效。

## 5 结 论

在高速公路巡检过程中,无人机发生碰撞事故会造成经济损失,严重的还会对整个无人机作业产生影响,无法做到对高速公路的实时与高效巡检,制约后续处理等工作的进行。本文基于三维动态碰撞预测以及最优问题动态碰撞规避算法,设计一种在三维空间中适用的无人机动态碰撞冲突预测及避让技术,同时,借助 5G 通信技术进行空中/地面通信网络的搭建,基于对数据传输时效性及准确性的保证,使无人机在遇到随机障碍物的情况下有效保持最小安全间距。仿真对比实验显示,基于本文所提算法的无人机避让方案在算法运行效率、航路代价以及航路质量 3 方面均优于基于几何分析方法的无人机避让方案,最终规划出的避让飞行路径对于无人机更为使用,可实现对障碍物的有效规避,且航路比较短,属于一种行之有效的避让策略。但是,基于时间等因素的限制,本文尚有一些需要改进之处,例如,在自动避让方面,本文仅就单一无人机的避让进行仿真实验,对于多无人机协同避让问题未作讨论,这需在今后作进一步研究;另外,在无人机性能方面,本文只是以不考虑多性能限制因素的无人机为对象,未对存在性能限制的无人机自动避让问题作过多考虑,对于这一问题,亦须在后期进行进一步的研究。

## 参考文献

- [1] 曹原.面向高速公路巡检的无人机地面站 APP 设计与实现[D].西安:长安大学,2018.
- [2] 彭博,张有节,蔡晓宇,等.基于无人机的交通监控研究现状与展望[C].第十一届中国智能交通年会大会论文集,2016:120-126.
- [3] 彭仲仁,刘晓锋,张立业,等.无人飞机在交通信息采集中的研究进展和展望[J].交通运输工程学报,2012,12(6):119-126.
- [4] 牛明亮.基于 5G 网络的无人机通信方案研究[D].北京:北京邮电大学,2019.
- [5] KHATIB O B. A unified approach for motion and force of hot mainpulators [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation,1987,3(1):43-53.
- [6] MACLAIN T. Cooperative redezvous of multiple unmanned air vehicles[R]. AIAA GNC,2000.
- [7] SHIN H S, TSOURDOS A, WHITE B, et al. UAV conflict detection and resolution for static and dynamic obstacles [C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Hawaii,2008:1-21.
- [8] SABOORI I, SRIDHAR B. Automatic air collision avoidance system and the collision cone approach[J]. IEEE Transactions on Systems,2012,27(5):26-33.
- [9] 程健,毛忠峰.基于人工智能的实时交通流量预测[J].国外电子测量技术,2019,38(6):28-32.
- [10] 詹柳春,黄长江.云计算下物联网密集场景大数据挖掘技术[J].电子测量技术,2019,42(23):164-168.
- [11] 曲欣宇,赵德群,武历祺,等.基于云平台的植物工厂智能控制系统的设计与实现[J].国外电子测量技术,2020,39(7):115-120.
- [12] 韩将星.5G 时代无线电监测站无人机云平台建设方案研究[J].通信技术,2020,53(2):345-352.
- [13] 张云勇.5G 将全面使能工业互联网[J].电信科学,2019(1):1-8.
- [14] 魏瑞轩,许卓凡,张启瑞,等.无人机自主防碰撞控制技术新进展[J].科技导报,2017,35(7):64-68.
- [15] 李波,翟书颖,李茹,等.一种采用 ADS-B 技术的通用航空防撞系统[J].电讯技术,2019,59(1):19-26.
- [16] BILIMORIA K, CHATTERJI G. FACET: Future ATM concepts evaluation tool [C]. The 3<sup>rd</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Naples, Italy,2000:1-10.
- [17] 邱月怡.5G 超密集异构网络功率分配技术研究[D].成都:电子科技大学,2017.
- [18] 杨秀玉.基于 5G 移动通信的无人机与民用飞机防相撞技术研究[D].广汉:中国民用航空飞行学院,2019.
- [19] 钟智坚,崔海霞.全双工中继协作通信的关键技术研究综述[J].通信技术,2017(10):2137-2143.
- [20] 欧阳峰,刘强,郝琦,等.基于定向天线的移动自组网技术研究综述[J].电视技术,2017(4):148-153.
- [21] 张红梅.基于 MIMO 技术的宽带全向双极化吸顶天线的研究与设计[D].南昌:华东交通大学,2016.

## 作者简介

董明明,硕士研究生,讲师,主要研究方向为计算机技术领域工程。

E-mail:fangyu\_y@126.com