

面向低空安全的 C-V2X 协同避让技术： 需求、架构与展望*

习一凡^{1,2} 胡金玲^{1,2} 赵锐^{1,2} 房家奕^{1,2}

(1. 中信科智联科技有限公司,北京 100029;

(2. 移动通信及车联网国家工程研究中心,北京 100191)

摘要:随着低空经济快速发展,飞行器高密度运行对避让能力提出严苛要求。针对低空协同避让的通信需求,提出基于蜂窝车联网(Cellular Vehicle-to-Everything, C-V2X)邻近直连通信接口5(Proximity-services Communication 5, PC5)的体系架构,包含直连通信交互层、广域通信管理层和机载融合执行层;分析了典型低空场景与通信性能要求,阐述了核心使能技术及标准化协同避让交互流程;最后展望了三维波束管理、智能干扰协调和频谱政策等未来研究方向,为低空安全通信系统构建提供理论参考。

关键词:低空安全;协同避让;直连通信

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

引用格式: 习一凡,胡金玲,赵锐,等. 面向低空安全的 C-V2X 协同避让技术:需求、架构与展望[J]. 信息通信技术与政策, 2026, 52(4): 30-38.

DOI: 10.12267/j.issn.2096-5931.2026.04.004

0 引言

随着低空经济的蓬勃发展,城市空中交通、物流配送等场景加速落地,低空飞行正由隔离运行向融合运行演进,飞行冲突风险随密度陡增而显著上升。然而,现有避让方式多依赖机载传感器自主感知,在楼宇遮挡、气象恶劣等条件下易形成感知盲区,更缺乏对多类型飞行器意图的预判能力,难以应对复杂环境下的动态避让场景。

要解决这一难题,亟需将技术路径从独立感知转向协同感知,通过引入低时延、高可靠的通信技术,使每架飞行器成为空域协同感知网络中的实时节点。蜂窝车联网(Cellular-Vehicle-to-Everything, C-V2X)技术的成熟为此提供了关键支撑,其邻近直连通信接口5

(Proximity-services Communication 5, PC5)支持飞行器间不依赖基础设施的直接通信^[1]。基于 C-V2X 的协同避让技术,可实现飞行器之间关键状态与意图的安全实时交换,从而形成超越单机范围的协同感知能力,为下一代低空交通安全系统奠定基础。本文面向低空飞行场景,系统阐述协同避让的通信需求、体系架构与关键技术,为低空安全通信系统设计提供参考。

1 低空协同避让挑战与技术路径

1.1 低空安全挑战

低空经济在技术与政策驱动下快速发展,无人机、电动垂直起降飞行器等新型航空器应用日趋规模化^[2]。人工智能、先进通信与航空技术的融合,推动低空系统向智能化、网联化与协同化演进,并与地面交通

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62133002)

体系逐步融合,形成“空-地一体”的智慧交通新范式^[3]。这一演进催生出一套高密度、高频次、高动态且参与者高度异构的复杂空域系统,对传统的空域安全体系构成严峻挑战。飞行器在三维空间内频繁活动,静态与动态障碍物交织构成多维度威胁网络。随着飞行器密度提升,冲突风险显著增加。传统程序化管制方式难以满足高实时、高并发的协同需求,而缺乏有效协调的分布式运行又易引发系统性失稳。

面对上述挑战,低空安全的核心已从单机可靠性与程序符合性,升级为多飞行器在动态高密度环境下的协同安全。实现这一目标,重点在于构建全域态势感知能力与分布式协同决策机制。面对低空规模化运行带来的复杂性与风险,发展新一代协同避让技术,不仅是提升安全水平的必然路径,更是推动低空经济从愿景走向现实的关键支撑。

1.2 基于通信的协同避让技术

感知与避让技术,旨在赋予飞行器实时感知、智能决策与自主规避的能力,是保证其安全并可自主融入空域的关键。目前,低空飞行器主要依赖机载传感器实现单机自主感知,包括视觉传感器^[4]、雷达传感器^[5]及多传感器融合等方案。然而,单机感知方案存在固有局限:机载传感器的有效探测距离及分辨率受限,难以可靠应对高速接近目标或盲区威胁;获取的信息维度单一,通常仅限于目标的位置、速度等信息,制约了冲突预测与协同决策能力;现有系统多基于局部感知进行独立决策,在复杂动态空域中易引发决策冲突,降

低整体运行效率。

为突破单机感知的局限,基于通信和定位的协同避让技术成为实现低空系统从单机智能向网联化群体智能演进的重点,其核心在于通过实时、可靠的通信技术,实现飞行器之间的信息交互与协同决策,不仅延伸单机的感知边界,形成超视距、全态势的协同感知能力,更从系统层面进行冲突协调和轨迹优化,从而提升空域的整体运行效率与安全水平。

然而,低空通信环境因其复杂的电磁传播条件与高动态业务特征而面临多重挑战。飞行器在三维空间内高速运动,节点间相对位置与链路状态持续快速变化,并且低空中多样的业务类型对通信需求呈现明显差异:安全类业务对时延与可靠性要求严苛,协同控制类业务需支持低开销、高并发的信令交互,而数据回传等应用则更侧重传输带宽。因此,构建高可靠、低时延的通信体系,是协同避让技术落地的前提。

为满足上述差异化业务需求,构建多层融合、优势互补的协同避让通信网络架构成为必然选择。

1.3 现有飞行器通信避让技术对比

通信技术是实现飞行器协同避让的核心支撑,其传输时延、可靠性、交互能力与并发接入性能,直接决定了协同避让系统的安全边界与运行效率。当前在低空飞行器避让场景中,已形成多类通信技术的应用实践,不同技术在传输特性、场景适配性上存在显著差异,在高密度、高动态的低空协同避让场景中,也呈现出不同的适配能力与技术短板(见表1)。

表1 主要通信技术在低空场景中的应用对比

技术	关键特性	低空场景中的优势	低空场景中的局限性
广播式自动相关监视	广播式监视	技术成熟,在有人航空监视中广泛应用;可作为辅助监视信息来源	仅支持单向广播式监视信息传输;容量有限,在设备密集场景下易冲突
蓝牙	工作在ISM频段,低功耗	功耗低,适合设备间近距离配对与数据交换	通信距离短,难以满足编队、广域协同的通信需求;公共频段干扰多,可靠性不足
无线局域网	IEEE 802.11系列,高速率	数据速率高,生态成熟,易于部署	时延抖动大,确定性不足;移动性支持弱,在高速移动中易中断
飞行自组织网络	多跳中继,动态组网	网络覆盖可扩展,通过多跳中继延伸通信范围	多跳转发引入的时延累积与不确定性高,难以满足严格实时性要求

面向低空高动态、高密度飞行场景对高可靠、低时延协同通信的严苛需求,C-V2X 技术体系展现出显著的综合适配优势。该技术体系经过在车辆高速移动与密集交通环境中的验证,其去中心化、低时延、高可靠的通信内核,为低空三维动态环境提供了坚实的技术基础。第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project,3GPP)自版本 14 起逐步构建并完善了其技术标准体系,并在后续版本中针对低空场景将车联网技术扩展为空联网(Aircraft-to-Everything,A2X)技术^[6],通过不依赖固定基础设施的点对点直连通信,可实现超低的通信时延,满足碰撞预警等业务的实时性要求;并依托分布式资源调度与终端间协调机制,可自适应高密度场景下的快速拓扑变化。

飞行器之间、飞行器与地面系统之间可基于 C-V2X 的直连通信接口实现实时环境感知与协同决策,有效支持飞行任务协同与空中碰撞规避;同时,还可通过其蜂窝通信接口接收地面飞行服务系统提供的空域态势与辅助信息,进一步提升异常空情应对能力与整体飞行安全水平。并且,地面交通系统已确立以 C-V2X 为标准的车路云协同通信体系,低空采用与之同源的 A2X 体系,有利于实现技术协同与系统整合,为构建“空-地一体”的智慧交通体系奠定基础。

2 面向低空协同避让的通信场景与需求

2.1 典型协同避让模式与场景

结合 3GPP 对低空探测与避让(Detect and Avoid,DAA)机制和场景的研究^[6-8],本文选取两类具有代表性的低空运行场景,系统阐述协同避让的需求。

2.1.1 城市末端物流配送场景

在城市末端物流配送场景中,多架无人机需在楼宇间的狭小通道内穿梭运行,飞行路径交叉重叠度高,楼宇遮挡导致非视距场景频发,同时存在异构作业无人机、临时障碍物、飞鸟等多维度动态威胁,对避让的实时性、可靠性提出了严苛要求。一方面,传统单机感知方案存在固有“瓶颈”,机载传感器无法探测传感器盲区的高速接近目标,也无法获取异构飞行器的飞行意图,仅能实现被动应急避让,易引发碰撞事故;另一方面,城市低空物流通常由多主体、多运营商的无人机共同运行,传统程序化空域管制难以实现跨主体的实时协同来应对高密度场景下的动态冲突风险。

针对该场景,基于直连通信的分布式协同架构具备更优的场景适配性。集中式方案依赖蜂窝网络实现全量节点状态汇聚与集中冲突解算,其解算复杂度随空域内无人机数量增长,高密度场景下传输时延与算力开销急剧上升。在分布式协同架构下,飞行器可通过直连通信实时广播自身位置、航向、速度与飞行意图等重要信息,实现非视距条件下的超视距态势感知,提前完成冲突预判,并通过分布式协商机制完成避让决策;端到端时延更低,且仅需与邻域节点完成协同解算,具备更强的可扩展性;同时可实现跨厂商、运营主体的对等协同。

2.1.2 网络覆盖受限的编队飞行场景

在山区、荒漠等偏远地区,电力巡检、森林消防、应急救援等工作常采用无人机编队飞行以提高作业效率。此类区域通常蜂窝网络覆盖受限,飞行器无法接入地面基础设施,地形复杂、遮挡严重、气象条件多变;同时存在未知障碍物、跨主体作业航空器等动态威胁,全局空域态势信息支撑不足。在该场景下,协同避让是保障作业安全与任务连续性的核心前提:单机感知受地形遮挡、恶劣气象影响,探测范围与精度大幅衰减,易形成感知盲区;在无地面管控基础设施的情况下,单机无法获知周边非视距范围内的作业航空器状态与飞行意图,易发生空中碰撞;在应急救援等场景下,跨主体的异构航空器通常临时组网作业,需具备自主协同避让能力。

该场景中,分布式协同架构具备天然的适配性,不依赖地面基础设施,通过终端自主资源选择机制,可在无网络覆盖环境下实现节点发现、信息交互与避让协商,构建去中心化的对等协同网络;支持节点的动态接入与退出,可适配跨主体异构航空器的临时协同需求,同时通过多节点感知数据共享,突破单机的地形与气象探测局限,是广域无覆盖场景下保障运行安全的可行技术路径。

分布式直连协同机制在上述两类场景中均展现出不可替代的优势:既能满足实时性、跨主体协同需求,又能在网络覆盖受限区域保障编队飞行的安全。因此,构建以直连通信为核心的协同避让体系,是应对未来复杂低空运行环境挑战的优选技术路径。

2.2 通信需求分析

基于上述应用场景特征,低空协同避让对通信系

统的需求可从时延、可靠性、容量等多个维度进行分析,不同场景在不同维度上各有侧重。

在时延维度,低时延是实现动态冲突预判与紧急避让的核心前提,不同场景、不同业务类型的时延需求呈现明确分级。对于分布式直连协同模式,其端到端时延通常需控制在秒级以内;常规飞行状态的周期性广播消息,端到端时延需控制在 100 ms 以内^[8],以保障邻域节点持续构建一致的空域态势;针对紧急碰撞预警、避让协商信令,端到端时延边界需达到更低量级,以预留充足的避让决策与机动执行时间。

可靠性是低空安全通信的生命线,所有重要安全消息的传输需达到 99.9%^[8]甚至更高可靠性,避免因消息丢失引发碰撞事故,同时需具备非视距遮挡、高速移动场景下的链路鲁棒性,保障避让协商信令的双向交互完整闭环。

在容量维度,核心适配城市低空高密度运行场景的并发交互需求。分布式直连协同模式采用去中心化的资源调度机制,需支持单空域内数百级节点的并发接入与周期性消息广播,对系统的多用户资源调度效率、干扰协调能力提出更高要求。

综上所述,面向低空协同避让的通信系统架构应支持直连通信与广域网络的无缝集成与优势互补,实现全域连续的服务覆盖,为协同决策提供精确、可靠的网联支撑。

3 基于 C-V2X 的协同避让系统架构与重要技术

3.1 系统总体架构设计

为应对低空交通环境的多元性与复杂性,本文提出一种以 C-V2X PC5 直连通信为核心,能够灵活融合终端自主分布式协同与网络辅助协同能力的体系架构。该架构通过清晰的功能分层与模块化设计,旨在为各类低空运行场景下的协同避让问题提供统一、可扩展的解决方案框架。如图 1 所示,该架构分为直连通信交互层、广域通信管理层以及机载融合执行层。

3.1.1 直连通信交互层

本层是架构的核心实时协同层面,其核心作用在于通过高可靠、低时延的 C-V2X PC5 直连通信,将空间上分散的各类节点连接成一个统一的协同感知与决策网络,从而在通信层面直接承载关键的避让逻辑。

所有参与协同的节点均在此层进行对等或受控的交互,构成了系统实时安全能力的基石。

本层的参与节点主要包括空中协同节点和地面协同节点。空中协同节点是具备直连通信能力的各类飞行器,是协同网络中最主要的参与者;地面协同节点涵盖具备直连通信能力的智能车辆,以及部署在机场、航路枢纽等关键区域的智能路侧设施或区域管理器,既可作为信息交互的协同终端,也可在局部范围内承担协调与中继功能。这些节点通过 PC5 接口构成的分布式网络,主要支持两种协同通信模式,以适应不同场景的需求与约束。

分布式协同是实现自主、分布式避让的核心。节点间通过周期性的广播与事件触发的单播/组播,直接、自主地交换状态、意图及协商指令。每个节点基于自身与邻节点的信息,完成碰撞风险评估、解脱决策生成与协商,全过程不依赖于广域网络回传,实现了超低时延和高可靠的自主冲突化解。

网络辅助:节点在分布式协同的基础上,可通过 Uu 接口与蜂窝网络进行通信。在该模式下,飞行器可从邻近基站获取空域指令、气象数据等辅助信息,或向网络侧请求冲突解决、提交事件报告,从而融合网络侧的大算力与全局信息优势。同时,网络可通过基站对多飞行器的直连通信资源进行协调调度,提升频谱利用效率与协同可靠性。

3.1.2 广域通信管理层

本层旨在构建全域覆盖的通信与信息服务能力,依托卫星通信、蜂窝网络及专网数据链等多种广域通信接入技术^[9],将各类低空飞行器、地面节点及系统平台接入网络,构建覆盖全域的通信、感知、数据与计算一体化服务能力,为低空安全协同提供全局性的信息支撑。

在通信功能方面,本层通过多模接入与移动性管理,将各类飞行器、地面节点及管控平台纳入统一服务体系,实现“空天地一体化”网络覆盖。这不仅延伸了直连通信的传输边界,也在其受遮挡或超距时提供可靠的备用链路,保障协同信息在复杂环境下的连续可达性。

在全局信息融合与增强感知方面,该层可汇聚来自多源的定位数据、导航数据、高精度地图及动态空域等信息。通过广域分发机制,这些数据可与直连通信交换的实时状态相结合,为飞行器提供超越本机感知

的环境认知与态势预见能力,从而显著增强协同决策的信息基础。

在智能协同与计算方面,本层通过融合卫星遥感与广域监视等多源信息,构建对气象、地形及空域状态等宏观环境要素的动态感知能力,提升了系统对潜在风险的识别能力与协同航路的动态优化水平。进而,本层还可依托云端与边缘计算资源,运行大规模冲突预测、行为协调与智能调度等算法,形成全局优化的辅助决策建议,在系统层面提升整体运行效率与安全水平。

3.1.3 机载融合执行层

本层作为架构的分布式执行终端,部署于各飞行器平台,承载从环境感知到航迹控制的闭环安全功能,将通信协同信息转化为具体的避让行为,核心功能包括以下几方面。

多源协同感知融合:整合飞行器本体的视觉、雷达

等传感器数据,与通过 PC5 直连通信实时获取的外部协同信息,进行时空配准与信息融合,构建统一、可靠且超越单机感知范围的环境态势模型。

避让决策:对融合后的环境态势进行实时风险识别与冲突解算。一旦检测到碰撞威胁,即触发自主解脱算法或通过协同层发起分布式协商,形成安全可行的冲突化解策略。

控制指令生成:将决策输出的避让策略转化为具体的航迹修正或机动控制指令,经由标准接口驱动飞行控制系统执行,从而实现“感知—协同—决策—控制”的闭环安全链路。

低空通信协同避让体系架构以 C-V2X PC5 直连通信为核心纽带,通过其高可靠、低时延的传输特性,实现飞行器间实时状态广播、分布式避让协商等协同功能。同时,直连通信交互层向上接收广域管理层的规则与信息,向下支撑机载层的融合与决策,将分布式

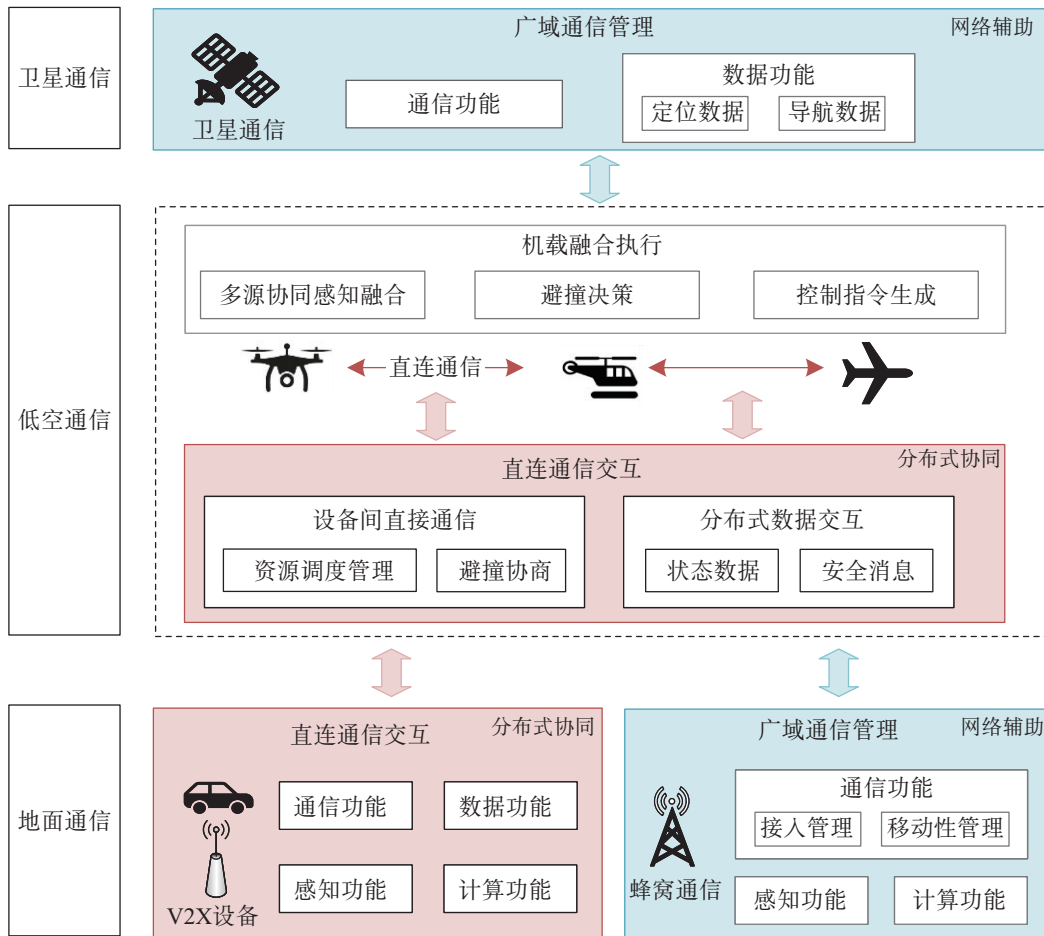


图 1 低空协同避让体系架构图

自主协同与网络辅助协同融合于统一框架之内,共同构建了一个完整的协同感知与避让能力体系,为应对未来高密度、高动态的低空交通场景提供了可靠的理论基础与可实现的工程框架。

3.2 以 PC5 为核心的技术体系

作为上述架构的核心使能技术,PC5 直连通信通过构建分布式通信平面,直接实现直连通信交互层的实时信息交换,并为机载融合执行层提供不可或缺的实时数据流。本节将深入剖析 PC5 通信技术,并阐述其协同避让业务流程。

3.2.1 C-V2X PC5 技术特性

PC5 工作在授权或可协调频谱上,支持广播、组播与单播多种通信模式,并在物理层设计、资源管理机制、服务质量保障等方面进行了系统性增强,为构建分布式、高可靠、低时延的低空协同感知网络提供了底层支撑^[1,10]。

(1) 面向高机动环境的物理层增强与可靠传输机制

PC5 接口的物理层设计虽然主要面向车联网的高动态道路环境,其为应对车辆高速相对运动、多径衰落所采用的技术,同样为低空场景中由飞行器高速移动引起的多普勒频移、快速信道变化及信号遮挡等问题提供了有效的通信解决方案,是实现“直连通信交互层”低时延高可靠通信与协商的基础。

灵活可配置的物理帧结构与参数集:PC5 支持多种子载波间隔和可扩展的时域符号参数集。在低空高速场景下,可采用更宽的子载波间隔以增强对多普勒频移的鲁棒性,以及更短的符号长度,有利于降低传输时延,适应快速变化的信道状态。

低时延的传输与混合自动重传(Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ)机制:PC5 支持基于时隙的快速调度与传输,结合 HARQ 反馈机制,可在接收失败后迅速发起重传,显著提升传输可靠性。

业务感知的优先级与可靠性区分:每个数据包可携带信道接入优先级标识,资源选择与调度过程中高优先级业务可获得更优资源与更低的接入时延。

(2) 适应高动态拓扑的分布式资源管理

低空节点分布快速变化,网络拓扑高度动态,PC5 的两种资源分配模式,可在不同覆盖条件下平衡可靠性、实时性与资源利用率,是支撑无中心分布式协同模式运行、适应拓扑高动态的核心机制。

终端自主资源选择:在无网络覆盖或信令延迟不可接受时,终端基于“感知-预约”机制自主选择资源。其通过持续监听信道,排除已被占用的资源,并采用随机退避与资源重评估策略避免碰撞。为进一步提升可靠性,PC5 在演进中引入终端间协调机制,允许终端交换资源占用信息或碰撞指示,协同避免隐藏节点与半双工冲突,显著增强分布式环境下的传输鲁棒性。

网络调度资源分配:在网络覆盖范围内,基站可为终端动态分配专属资源。该模式能有效避免资源冲突、优化系统资源利用率,适用于可预测或周期性业务,并为高优先级安全消息提供有保障的资源预留。

(3) 面向低空协同感知的通信与定位一体化增强

PC5 不仅支持数据传输,还在标准演进中深度融合直连通信定位与通信感知融合能力,为低空协同避让提供立体化支撑。

直连通信定位技术:在无卫星导航系统或蜂窝网络覆盖的区域,终端可通过交换定位参考信号实现相对或绝对定位,为实时轨迹追踪与冲突解算提供位置输入。

通信与感知融合:通过统一波形与信号设计,在通信过程中同步实现周边目标探测、速度估计与环境重构。在低空场景中,该能力可用于飞行器、飞鸟等动态障碍物的实时检测,为避让决策提供超越视觉与雷达的补充感知维度。

(4) 支持轻量化与节能的终端设计

针对低空中小型飞行器等平台,PC5 引入节电机制,如部分感知与非连续接收,允许终端在保证通信可靠性的前提下周期性休眠,大幅降低监听带来的能耗,适应长航时、轻量化的低空终端部署需求。

综上所述,PC5 直连通信技术凭借其高可靠、低时延、支持分布式资源协调、融合定位与感知能力等核心特性,在系统设计与低空协同避让场景的需求高度契合。其在物理层、资源调度层及服务保障层的持续演进,进一步强化了对高速动态拓扑、混合覆盖条件及多业务协同的支持能力,为构建全天候、全空间、可信任的低空安全通信体系提供了标准化、可扩展的无线传输基础。

3.2.2 基于 PC5 的协同避让交互流程

上述 PC5 直连通信的技术特性在协同避让体系中的具体应用体现为以下标准化的交互流程。基于

C-V2X 架构,3GPP^[8] 定义了一套在飞行器之间通过 PC5 接口直接执行的、自主协同的避让信令交互流程。该流程不依赖于网络基础设施的实时参与,构成了总体架构“直连通信交互层”中分布式协同模式的核心操作逻辑,确保了在严苛时延约束下避让动作的可执行性(见图 2)。

基于 PC5 直连通信的协同感知与避让的核心在于构建一个分布式、实时闭环的安全交互流程。

各飞行器通过 PC5 接口周期性广播自身状态,同时接收其他飞行器广播的位置、速度、航向等消息,在应用层对上述消息进行解算并与自身轨迹对比实时位置,从而实现碰撞风险监测。

一旦判定存在潜在冲突,用户设备 1 (User Equipment 1, UE1) 立即触发与冲突方(如 UE2)的避让程序,向 UE2 发送 DAA 请求消息,该消息包含冲突警报、双方的身份标识以及避让建议参数。UE 可选择直连通信模式:对于简单或一对多场景,可直接利用广播

信道;对于需多轮协商的复杂冲突,则可建立单播链路进行交互。UE2 收到避让请求消息后,将评估可行性,并向 UE1 回复 DAA 响应消息,其中包含建议反馈、更新后的自身预测轨迹及预期冲突解决状态。这一“请求—响应”交互构成了分布式协同决策的核心,使双方能够就解脱策略达成一致。此外,在此过程中,UE1 可选择将冲突事件上报网络侧用于态势监控。

待冲突威胁解除且系统稳定后,若此前建立了单播链路,则进行链路释放。此流程充分体现了基于 PC5 直连通信的分布式系统在低时延、高可靠方面的优势。

4 技术发展展望

随着低空经济的规模化发展,C-V2X 直连通信技术正从地面车辆协同向三维低空协同演进,成为支撑低空自主协同避让系统的核心通信载体。然而,现有技术体系在应对“高密度-高动态”耦合的复杂场景时,

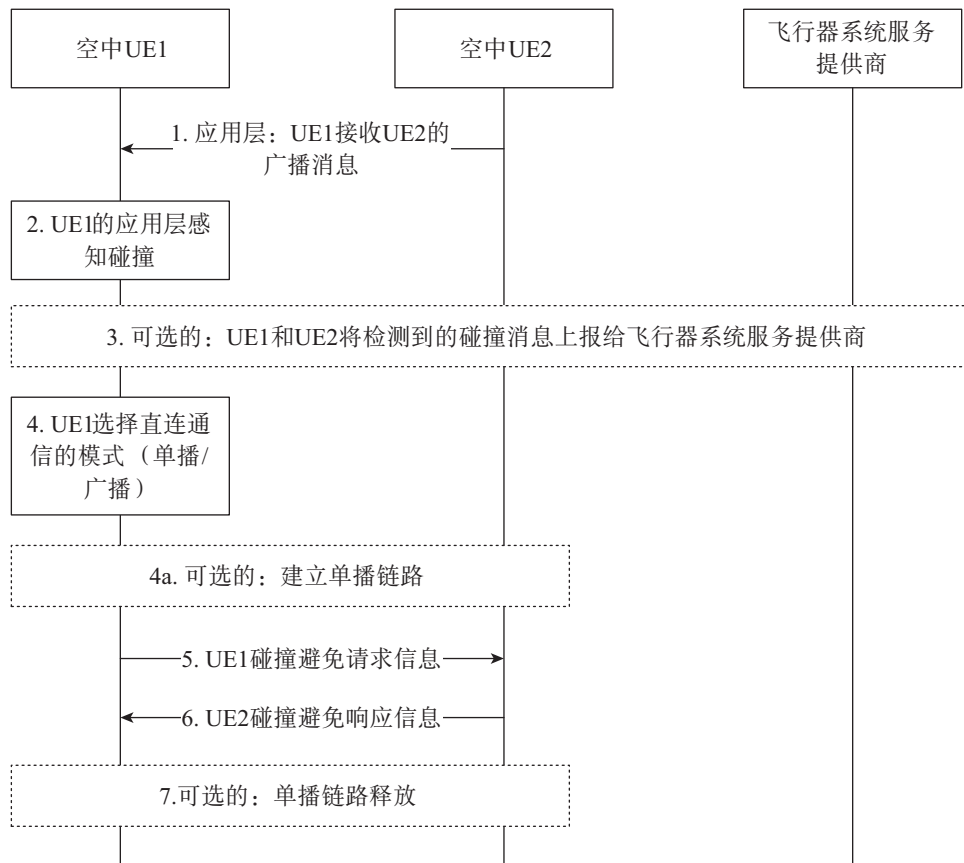


图 2 基于 PC5 的协同避让交互流程示意图^[9]

仍面临系统性挑战。面向未来低空安全通信的构建,业界需在以下维度实现突破。

4.1 三维空域覆盖与3D波束管理技术

不同于地面终端主要沿二维平面移动,低空飞行器在楼宇、峡谷、山区及不同高度层间穿梭,造成信号遮挡、多径衰落与覆盖盲区等问题。未来,业界需发展面向低空的三维线阵列与自适应波束赋形技术,通过垂直维度的波束扫描与动态指向调整,实现空对地、空对空的全域立体覆盖;特别是在毫米波频段,需完善高频段的波束管理流程,以克服高频信号在复杂城市地形中的阻塞效应,提升覆盖效率与链路可靠性。

4.2 高密度动态拓扑下的智能干扰管理与资源优化

低空通信环境呈现空地、空空、空网多维干扰耦合特征。现有基于“感知-预约”的分布式资源选择虽能在一定程度上缓解冲突,但在高密度场景下信令开销激增,且隐藏终端问题在三维空间中更为复杂。未来,业界需发展基于人工智能的动态干扰预测与资源分配算法,实时学习拓扑变化规律,实现干扰态势的主动感知与资源抢占的快速决策;同时,需结合跨层协同设计,将业务优先级、信道状态、拓扑变化等信息融合至资源决策中,提升系统在高密度、高动态环境下的频谱效率与服务质量。

4.3 标准化演进与频谱政策

技术标准与频谱资源是低空直连通信大规模部署的基石^[11]。3GPP已从版本14-15的LTE-V2X演进至版本16及以后的NR-V2X/A2X,逐步支持更高带宽、更低时延与更灵活的频谱使用。然而,当前低空的直连通信频谱划分尚不明确,面临专用频谱与共享频谱的选择困境。专用频谱(如特定毫米波频段)可保障安全关键业务的确定性服务质量,但频谱资源稀缺;共享频谱虽具灵活性,却面临与地面系统或其他低功耗设备的干扰协调难题。未来,业界需推动低空专用频段或共享频段的研究与标准化,制定兼顾航空安全与频谱效率的动态频谱接入与共存规则。

综上所述,当前低空通信技术正经历从单机自主到网联协同的范式转变,直连通信技术在低空协同避让系统中具有不可替代的作用,尽管3GPP标准体系与产业界已在信道建模、资源管理和传输技术等方面取得了初步进展,但其在高密度、高动态、三维立体环境下的可靠运行仍面临系统性挑战。未来,业界需在

三维天线与信道建模、智能干扰协调、标准化与频谱管理等方向进行持续研究,构建适应低空复杂场景的通信能力底座,为低空经济的安全、高效、规模化发展奠定坚实的技术基础。

5 结束语

本文系统阐述了面向低空安全的C-V2X直连通信协同避让技术的需求、架构与展望。低空运行环境的复杂性、飞行器的高动态性以及协同避让对实时性与可靠性的严苛要求,使得传统单机感知与独立决策模式难以适应未来高密度、高动态的空域生态。通过直连通信交互层实现分布式自主避让、广域通信管理层提供全局态势增强、机载融合执行层完成“感知—协同—决策—控制”闭环,为低空飞行器在空域中的安全协同运行提供了可行的技术路径。随着低空经济产业生态的持续完善,C-V2X直连通信技术作为打通低空协同感知、协同决策与协同控制的核心载体,将为低空经济的规模化、商业化、安全化运行提供底层技术支撑,助力构建安全、高效、全域协同的低空交通新体系。

参考文献

- [1] 陈山枝,胡金玲.蜂窝车联网(C-V2X)(第二版)[M].北京:人民邮电出版社,2025.
- [2] 张学军,李诚龙,张志远,等.低空航行系统实时风险管理能力构建:概念,挑战与技术[J].航空学报,2025,46(11):8-34.
- [3] 张新钰,荣松松,李骏,等.智能飞行汽车关键技术及发展趋势[J].中国科学:技术科学,2024,54(4):601-624.
- [4] KAPOOR P, HIGGINS I, KEETHA N, et al. Demonstrating ViSafe: vision-enabled safety for high-speed detect and avoid[J]. arXiv Preprint, arXiv:2505.03694v1, 2025.
- [5] NURIA G P, HEATH R W, RUSU C, et al. High-capacity millimeter wave UAV communications[J]. UAV Communications for 5G and Beyond, 2020:203-229.
- [6] 3GPP. Support of Uncrewed Aerial Systems (UAS) connectivity, identification and tracking (stage 2): 3GPP TS 23.256, V19.2.0[S], 2025.
- [7] 3GPP. Study on enhanced application architecture for UAS applications: 3GPP TR 23.700-55, V18.0.0[S], 2022.
- [8] 3GPP. Unmanned Aerial System (UAS) support in

- 3GPP: 3GPP TS 22.125, V19.2.0[S], 2024.
- [9] CHEN S Z, HE X X, ZHAO R, et al. Building mmWave on the evolving C-V2X: mmWave NR-V2X [J]. China Communications, 2024, 21(1):88-101.
- [10] CHEN S Z, GE Y M, SHI Y, et al. Technology development, application and prospect of cellular vehicle-to-everything (C-V2X) [J]. Telecommunications Science, 2022, 38(1): 1-12.
- [11] 陈勇, 杨健, 张余, 等. 面向低空经济的无人机通信频谱管理政策、标准与技术[J]. 数据采集与处理, 2025, 40(1):2-26.

作者简介:

习一凡 中信科智联科技有限公司、移动通信及车联

网国家工程研究中心标准研究工程师,主要研究方向为车联网无线通信技术等

胡金玲 通信作者。中信科智联科技有限公司、移动通信及车联网国家工程研究中心首席专家,教授级高级工程师,主要研究方向为车联网与下一代无线通信等

赵锐 中信科智联科技有限公司、移动通信及车联网国家工程研究中心高级标准专家,教授级高级工程师,主要研究方向为车联网无线通信技术等

房家奕 中信科智联科技有限公司、移动通信及车联网国家工程研究中心标准总监,教授级高级工程师,主要研究方向为车联网通信、车路协同技术及标准化

C-V2X collaborative collision avoidance technology for low-altitude safety: requirements, architecture and prospects

XI Yifan^{1,2}, HU Jinling^{1,2}, ZHAO Rui^{1,2}, FANG Jiayi^{1,2}

(1. CICT Connected and Intelligent Technologies Co., Ltd., Beijing 100029, China;

2. National Engineering Research Center of Mobile Communications and Vehicular Networks, Beijing 100191, China)

Abstract: With the rapid development of the low-altitude economy, the high-density operation of aircraft has imposed stringent requirements on collision avoidance capabilities. Aiming at the communication requirements for low-altitude collaborative collision avoidance, this paper proposes a system architecture based on Cellular-Vehicle-to-Everything (C-V2X) Proximity-services Communication 5 (PC5) sidelink communication, which consists of the sidelink communication interaction layer, the wide-area communication management layer, and the on-board fusion execution layer. Typical low-altitude scenarios and corresponding communication performance requirements are analyzed. The core enabling technologies and the standardized collaborative collision avoidance interaction process are elaborated. Finally, future research directions such as 3D beam management, intelligent interference coordination, and spectrum policy are discussed, providing a theoretical reference for the construction of low-altitude safety communication systems.

Keywords: low-altitude safety; collaborative collision avoidance; sidelink communication.

(收稿日期:2026-03-12)