

基于毫米波通信的新型机间数据链系统

徐鹏政¹, 于启月¹, 林泓池¹, 刘海宁²

(1. 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110031)

摘要: 针对现有有机间数据链存在的通信速率低、信号易被窃听和干扰、组网性能不佳等问题, 提出了一种基于毫米波通信的机间数据链系统。该系统在机间数据链中引入毫米波通信技术, 并与智能反射面、正交时频空间调制、通信感知一体化、无线自组网等技术相结合。分析和仿真结果表明, 所提系统在传输带宽、抗截获和抗干扰性能及硬件结构和成本上优于现有的机间数据链系统。同时, 所提系统面临实时波束跟踪等技术挑战, 有待进一步研究解决。

关键词: C4ISR; 机间数据链; 毫米波; 抗干扰; 抗截获

中图分类号: TN919

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2023057

Novel air-to-air data link system based on millimeter wave communication

XU Pengzheng¹, YU Qiyue¹, LIN Hongchi¹, LIU Haining²

1. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2. Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110031, China

Abstract: In order to solve the problems of insufficient communication rate between networked fighters, signals being easily eavesdropped and interfered, and unsatisfactory networking performance in the existing air-to-air inter-aircraft data links, a millimeter wave communication air-to-air data link system was proposed. The millimeter wave communication technology was introduced into the data link system, and reconfigurable intelligent surface, orthogonal time frequency space modulation, integrated sensing and communication, and wireless ad hoc network technology were integrated. The analysis and simulation results show that the proposed system is superior to existing systems in terms of transmission bandwidth, anti-interception and anti-interference performance and hardware complexity and cost. At the same time, the proposed system faces technical challenges such as real-time beam tracking, which need further research to solve.

Keywords: C4ISR, air-to-air data link, millimeter wave, anti-interference, anti-interception

0 引言

随着信息技术的不断发展, 战场环境和形态发生了巨大的变革, 并朝着信息化、网络化、自动化的方向不断演进。要有效发挥信息化优势, 离不开

C4ISR (command、control、communication、computer、intelligence、surveillance、reconnaissance) 系统的支持。C4ISR 是指以计算机网络为核心, 具有侦察预警、指挥控制、通信、安全保密、信息对抗等功能的网络。先进的 C4ISR 能力通过态势感

收稿日期: 2022-10-24; **修回日期:** 2023-01-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62071148); 黑龙江省优秀青年基金资助项目 (No.YQ2019F009); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.HIT.OCEF.2021012)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62071148), Outstanding Youth Fund of Heilongjiang Province (No.YQ2019F009), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.HIT.OCEF.2021012)

知、信息侦查以及缩短感知和响应之间的时间来提供优势^[1]。在 C4ISR 系统的支撑下,各个单元不再是独立的个体,而是从属于整体战术体系,在战术决策和执行任务时,各单元之间实时、高速地协同,发挥最大的优势。例如,当探测和打击敌方空中目标时,在 C4ISR 系统的支持下,具有远距离探测优势的预警机通过与各单元共享敌机位置信息及向攻击单元实时传输指令的方式取得先发优势。

数据链技术承载着 C4ISR 系统的通信功能,是取得信息优势的关键。机间数据链技术作为飞机编队间实时通信的手段,支撑着飞机间的信息共享、任务协同功能,在制空权的争夺甚至空中力量对地面敌方单位的侦查、打击和压制等方面都有着不可或缺的作用。在制空权成为主导战役进程和结局的决定性因素的今天,机间数据链技术的研究更具有重要的实际意义。在当前侦查探测技术多样化以及干扰窃听技术层出不穷的情况下,机间数据链需要同时满足高通信速率、安全性(抗截获)和抗干扰这 3 个方面的需求^[2]。

机间数据链需要高通信速率才能满足多种探测方式以及丰富的终端海量数据实时传输需求。首先,现代探测手段的多样化使获取的信息更加丰富。传统的探测方式单一,以仅可获取目标位置、速度信息的雷达和声呐系统为主。而现代探测手段包括合成孔径雷达、卫星高光谱和红外热成像等新探测方式,使获取的目标信息数据量急剧增加。其次,随着传感器技术的发展,传感器能够挂载在不同尺度的平台上,这导致总的传感器数量呈爆发式增长。此外,这些海量数据需要在短时间内完成传输以满足快速响应的需求。这 3 个方面都对机间数据链系统的通信速率提出了更高的要求。

机间数据链作为无线数据链,其收发机的开放性和移动性对数据链路的安全性提出了更高的要求。对于有线通信如光纤通信,敌方要对其进行窃听十分困难;而对于无线通信,由于承载信息的电磁波在空间中自由传播,敌方通过在天线波束角度或经反射后电磁波覆盖范围内布置接收机即可进行数据截获和监听。尽管针对窃听问题已经有跳频通信、星座置乱等技术提高系统的抗截获能力^[3],但针对这些技术的盲接收技术也在不断发展^[4-5]。此外,随着隐身和反隐身技术的迅速发展,信号易被

截获,也会带来隐身性能上的极大劣势。

复杂的电子对抗环境对数据链的抗干扰性能提出了更高的要求^[6-7]。随着电磁频谱的争夺日益受到重视,电磁干扰装备日新月异,从简单的压制性干扰到欺骗式干扰,现有的电子干扰技术覆盖频段广,手段丰富,搭载平台多样,使战场的电子干扰环境日益复杂。这就要求数据链必须具有强大的抗干扰性能。

经过数十年的发展,机间数据链系统虽然完成了一系列的迭代与技术更新,但仍无法满足上述的高通信速率、抗截获、抗干扰性能的要求,这就需要引入新的技术以满足需要,为此本文提出了一种基于毫米波通信的机间数据链系统来解决这一问题。首先,本文对机间数据链系统的发展历史与研究现状进行了总结,在此基础上,针对现有系统的问题,提出了基于毫米波通信的机间数据链系统,阐述了其整体架构及其在通信速率、抗截获、抗干扰和硬件集成上的优势;最后,给出了毫米波机间数据链系统在实现过程中的技术挑战以及可能的研究方向。

1 机间数据链发展历史及毫米波数据链系统

1.1 机间数据链发展历史与研究现状

如图 1 所示,在 C4ISR 系统中,飞机与外界进行通信的方式可以分为 3 种:机地通信、机星通信以及机间直接通信。在多架飞机协作进行作战任务时,与通过地面或卫星转发相比,机间直接通信显然具有更低的时延,在实时协作上也具有更大的优势。

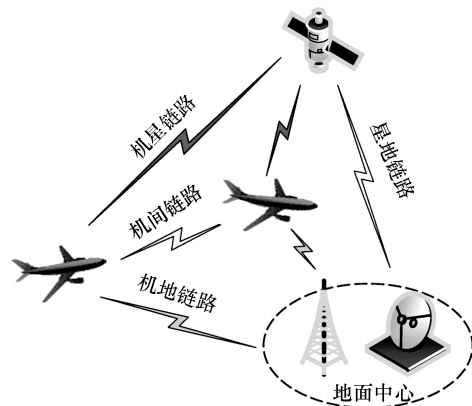


图 1 C4ISR 系统中飞机与外界通信的方式

从 20 世纪 50 年代中期半自动地面防空系统(SAGE, semi-automatic ground environment)投入使用开始,美军的数据链经过升级迭代,已经存在多

种不同功能和架构的数据链，主要分为战术数据链和宽带数据链。战术数据链信息传输速率为 kbit/s 量级，以态势信息、平台信息和指挥引导信息为主；而宽带数据链传输速率较高，一般在 10 Mbit/s 左右，用于满足图像等宽带传输需求，以通用数据链（CDL, common data link）为主^[8]。其中 CDL 用于陆基平台与空中平台或卫星平台间，不涉及机间直接通信，故在此只对战术数据链进行讨论。

美军数据链不断更新迭代的过程，也是其频段不断升高的过程，其频段从 HF 频段（1.8~30 MHz）演进到了如今的毫米波频段（26.5~300 GHz），美军主要数据链系统特性介绍如表 1 所示。20 世纪 60 年代中期，第一代战术数据链系统（即 Link-1）出现了，用于雷达站和控制中心间的空中监视信息传输。Link-1 是一种点对点、双工、非加密的数字通信链路，采用 HF 频段和 UHF 频段（300 MHz~1 GHz），速率可选为 0.6 kbit/s、1.2 kbit/s、2.4 kbit/s。随后，Link-4 系统投入使用，该数据链支持单向视线线路范围的信息传输，采用 UHF 频段，速率为 5 kbit/s。

20 世纪七八十年代，支持机间通信的空空数据链 Link-4A 和 Link-4C 出现了，其中 Link-4C 首次引入了跳频通信等抗干扰技术。与此同时，用于海军战斗群分队间数据传输的 Link-11 装备服役，Link-11 中首次引入保密机模块进行信息加密，可提高保密能力。1994 年，Link-16 投入使用，该系统支持飞机、舰船和地面部队之间近乎实时的交换战术画面，采用 L 频段（1~2 GHz），最大速率为

238 kbit/s，美军现役飞机大多装备这种数据链^[8-11]。而后，Link-11 的改进型 Link-22 投入使用，Link-22 在研发时结合了 Link-16 的技术优势，弥补了 Link-11 在抗干扰性能上的缺陷并提升了组网能力。在第五代隐形战机 F-22 上，为了解决 Link-16 全向天线的隐蔽性缺点，工作在 36~46 GHz 毫米波频段的编队内飞行数据链（IFDL, intra-flight data link）系统应用窄波束实时锁定接收战机以降低截获概率，该系统最高速率为 500 kbit/s，难以满足大数据量的数据传输需求。虽然 IFDL 支持编队内的小规模组网，但其组网时的动态自组织能力弱，且战机间仅能进行“一对一”数据交换，不是真正意义上的网络化系统。美军在 Link-16 基础上开发的战术瞄准网络技术（TTNT, tactical targeting network technology）及在 IFDL 基础上开发的多功能先进数据链（MADL, multifunction advanced data link）系统进一步增加了通信速率。TTNT 工作于 L 波段，具有自组网能力，系统速率达到 10 Mbit/s。MADL 系统工作于 Ku 波段（12~18 GHz），使用 6 副天线组成的天线阵列，传输窄波束信号，具有较强的隐身能力，可装备多种隐身战机，然而与 IFDL 一样，其只能进行“一对一”的数据交换，组网规模较小^[12]。

由表 1 可以看出，即使是数据链技术走在世界前列的美国，其最新的机间数据链系统依然存在特定的缺陷。其中，TTNT 存在全向天线无法抗截获的缺陷，MADL 及 IFDL 存在组网规模小、动态自组织能力弱的缺陷。一方面，为了克服现有系统抗截获能力弱、组网性能不佳的缺陷，有必要研制一种功

表 1 美军主要数据链系统特性介绍

数据链	应用时间	应用场景	频段	最大速率	优点	缺点
Link-1	20 世纪 60 年代	地-地	HF/UHF	2.4 kbit/s	第一代数据链标准	功能单一、无保密能力
Link-4	20 世纪 60 年代	海-空	UHF	5 kbit/s	实现舰载机的数字化控制	单向通信、无抗干扰和保密能力
Link-4A	20 世纪 70 年代	海-空、空-空	UHF	5 kbit/s	海空双向通信能力	无抗干扰和保密能力
Link-11	20 世纪 70 年代	地-地、地-空	HF/UHF	2.25 kbit/s	信息加密提高保密能力	无抗干扰能力
Link-4C	20 世纪 80 年代	空-空	UHF	5 kbit/s	跳频技术增强抗干扰能力	无保密能力
Link-16	20 世纪 90 年代	海-空-地	L	238 kbit/s	软扩频提升抗干扰能力	隐蔽性差、抗截获能力弱、速率不足
Link-22	21 世纪	海-空-地	HF/UHF	12.6 kbit/s	自组网性能提升	速率较低
IFDL	21 世纪	海-空-地	毫米波	500 kbit/s	窄波束降低截获概率	速率不足、组网规模小
TTNT	21 世纪	海-空-地	L	10 Mbit/s	速率提升、时延低	隐蔽性差、抗截获能力弱
MADL	21 世纪	空-空	Ku	未公开	低截获概率、支持多种战机	组网规模小

能完备的新型毫米波机间数据链系统；另一方面，将近年来新兴的正交时频空间（OTFS, orthogonal time frequency space）调制技术、智能反射面（RIS, reconfigurable intelligent surface）新型硬件技术、通信感知一体化技术等应用到毫米波机间数据链系统中将带来传输速率、硬件成本等方面的优势，为此，本文提出了一种基于毫米波通信的新型机间数据链系统。

1.2 毫米波机间数据链优势

本文提出的毫米波机间数据链系统结构如图 2 所示，一个发射机可以通过多波束同时与多个接收机进行通信，一个接收机也可以同时接收多个发射机的数据流并进行检测分离。该系统支持移动自组网技术，从而保证非视距路径的两架飞机之间也能够通过多次转发实现通信。

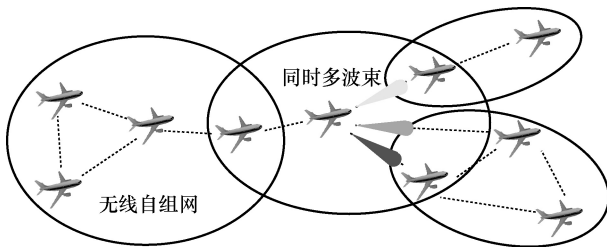


图 2 毫米波机间数据链系统结构

相比于现有的数据链，该系统主要有以下几个方面的优势。

1) 安全性和抗干扰性好。毫米波的波长短，故在相同的口径下，天线阵列能够容纳更多的天线单元。以天线距离为 $\frac{\lambda}{2}$ 时的波束宽度公式为例，天线阵列的波束主瓣宽度 W 为

$$W = 2 \arcsin\left(\frac{2}{N}\right) = 2 \arcsin\left(\frac{\lambda}{d}\right) \approx 2 \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

其中， N 为天线的数量， d 为天线的口径， λ 为波长。从式(1)可以看出，口径内能排列的天线数量越多，波束越窄。当天线总口径相同时，波束的宽度与波长近似成正比，对于口径为 1 m 的天线阵列，26.5 GHz 的毫米波波束宽度约为 1.3° 。相比于 UHF 等低频段的机间通信系统，毫米波的波束窄，这就压缩了电磁波信号在空间的分布角度，极大地降低了其被截获的风险。此外，该系统采用天线阵列的结构，当信号截获设备的方位已知时，还可以通过正交化方法进行预编码，使波束在截获设备处形成零陷，进一步降低

被截获的可能。应对敌方的干扰机时，接收机同样可以利用窄波束宽度和接收波束的零陷特性，使接收到的干扰信号功率显著下降，增强抗干扰性能。

2) 通信速率高。采用毫米波能够显著提高机间数据链系统的通信速率。一方面，对于微波器件，其带宽与中心频率的比值在小范围内浮动。在硬件实现上，所采用通信频段的中心频率越高，物理上能实现的系统带宽就越大。另一方面，中心频率越高，能排列的天线数越多，多入多出（MIMO, multiple input multiple output）系统的可达空分复用数越大。虽然机间通信为视线线路信道，每对收发机之间无法进行信道复用，但可通过多用户 MIMO 的形式进行空分复用，带来系统速率的成倍提升。现有的毫米波机间数据链如 MADL 的速率虽未公开，但同样采用毫米波的 5G 无线通信系统可以提供高达 800 MHz 带宽、10 Gbit/s 的系统峰值速率，从中可见毫米波具有巨大的提升机间数据链通信速率的潜能。

3) 硬件集成性好。毫米波的机间数据链系统有望在硬件集成上形成进一步的优势。一是机内外通信的一体化，二是通信感知一体化，三是采用智能反射面替代混合预编码结构。

毫米波不仅能用于机间数据链路，在机内通信上也有相关应用案例。文献[13]利用 57~64 GHz 的毫米波，搭建了机内高速无线局域网。此外，也有利用毫米波无线通信系统替代传统的飞机传感器有线网络的相关研究。在这种情况下，毫米波机间数据链系统的硬件可直接与机内的毫米波通信整合，采用一套硬件系统能同时实现机内外的通信功能，从而降低硬件部署和信号处理的复杂度。

毫米波雷达具有体积小、重量轻、精度高、穿透烟雾灰尘能力较红外线强等特点，因而多用于机载导弹上与红外或其他方式形成复合寻的制导系统^[14]。对于采用毫米波机间数据链系统的战机，其机载导弹可以利用现有的毫米波雷达系统，通过通信感知一体化技术在不需要额外硬件的情况下与战机直接建立通信链路。类似地，多枚导弹之间也可以采用这一方式进行组网通信。由于导弹具有严格的空重限制，这一通感一体化的硬件系统对其具有重要的意义。

随着智能反射面技术的发展，毫米波频段有望用智能反射面硬件替代现有的混合预编码硬件结

构，从而进一步降低硬件复杂度。目前，研究人员已经实现了毫米波频段的 RIS 设计^[15-16]，也开发了一系列以 RIS 作为发射机系统的设计。例如，图 3 所示的发射机系统通过 RIS 上的馈点馈入发射信号，并通过调整各辐射单元的幅度或相位参数形成发射波束，从而完成传统发射机的功能。这种 RIS 系统相比传统的发射机具有硬件结构简单、造价成本低的优点，能够带来成本、功耗、重量上的优势。

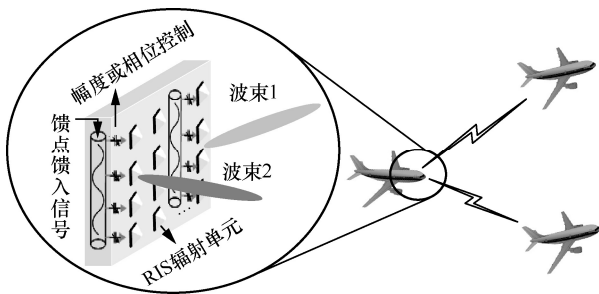


图 3 直接馈电式 RIS 发射机系统

在具有以上优势的同时，基于毫米波的机间数据链系统还存在如图 4 所示的众多技术难点和研究方向，下面对这些技术挑战进行详细介绍。

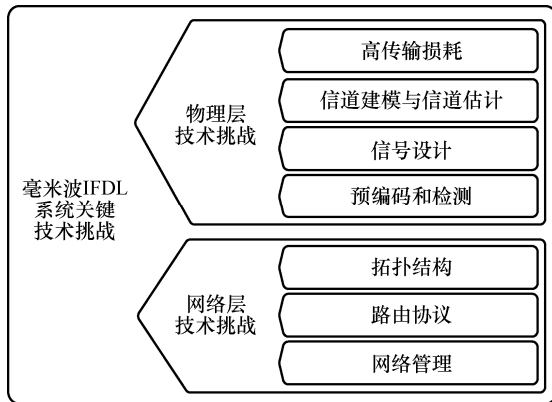


图 4 毫米波机间数据链系统关键技术挑战

2 毫米波机间数据链物理层关键技术挑战

毫米波本身的电磁波特性给毫米波机间数据链系统引入了窄波束特性等特定的优势，然而，同时也带来了诸如高传输损耗等问题。此外，现代战机的运动速度极快，从超音速向高超音速的方向不断发展。战机平台的高速移动也给系统的设计带来了一些额外的挑战。

2.1 高传输损耗

在飞机的设计过程中，预留给天线的空间是固

定的，可以认为无论采用什么频段的电磁波，其天线的孔径都相同。在这一前提下，接收机接收到的信号能量则主要由发射天线的增益及传输过程中的大气吸收损耗决定。根据 ITU 发布的不同频段的电磁波的传输衰减系数，对于 300 MHz 的电磁波（UHF 波段），在空气干燥情况下，其大气吸收损耗在 0.005 dB/km 以下；对于 26.5 GHz 的毫米波，其大气吸收损耗约为 0.017 dB/km。设数据链需支持的最远通信距离为 200 km，在该极限距离下，2 种电磁波的损耗值相差不超过 3 dB。由于在相同孔径下，频率越高，发射天线阵列的增益越大，故额外的大气吸收损耗可以通过发射天线的阵列增益来弥补。相比于 UHF 频段采用的全向天线，假设天线单元间距为半波长，则尺寸为 0.5 m×0.5 m 的天线阵可放置 26.5 GHz 毫米波（波长为 11.1 mm）天线 90×90 个，根据方向图乘法定理，在理想条件下，天线阵的最大增益为

$$G = G_0 + 10 \lg n \quad (2)$$

其中， G_0 为天线阵单元的增益， n 为天线阵单元的个数。即使天线阵单元为全向天线，此时天线阵增益也达 $10 \lg(90 \times 90) = 39.08$ dB，由阵列带来的发射天线增益完全能够抵消损耗系数的影响。然而，对于恶劣的强降雨天气，在毫米波频段，由于雨水带来的额外衰减将超过 200 dB，因而无法通过阵列增益来弥补。在这种情况下，只能通过高功率的毫米波器件来增加发射功率，否则在恶劣的强降雨天气下就会出现通信中断的问题^[17]。

2.2 高速运动系统的信道建模、信道估计和信号设计

机间通信场景具有距离远（最高可达数百千米）、收发机高速运动、存在敌方干扰和窃听的特点，这些特点给信道建模、信道估计及信号设计带来了额外的挑战。

在信道建模上，虽然毫米波反射、绕射能力弱，信道在多径上表现为简单的视线线路传输。然而现代战机的超音速、高超音速给信道建模带来了额外挑战。以第五代战机歼-20 为例，其最大速度约为 2 马赫，在比较极端的场景下，两架飞机之间相向飞行时的相对速度将远超 2 马赫。根据通信多普勒频率表达式 $f_d = \frac{v f_c}{c}$ ，其中， c 表示光速。相对速度 v 和通信频率 f_c 都很高，会造成极大的多普勒频偏。此

外, 这也会造成信道极快的时变特性, 如何准确、有效地对此极快时变、极大多普勒频偏的信道进行建模是一个尚待解决的问题。

在信道估计上, 如何在收发机高速移动下建立连接以及建立连接后如何高效地更新信道状态都是巨大的挑战。由于毫米波波束窄且依赖于视线线路传输, 收发机首先必须先搜索到对方的方位才能建立连接; 其次, 在通信过程中信道状态也在高速地变换, 如果依赖频繁的信道估计来更新信道状态, 无疑会占用过多的系统资源, 必须引入有效的信道预测方法实现波束跟踪来降低信道估计的复杂度。

在信号设计上, 传统的调制方式如 OFDM 调制等无法应用在极大多普勒频偏的场景下。OTFS 调制技术是解决这一问题的可能方案^[18]。一方面, OTFS 在时延多普勒域对信道进行建模, 其时延和多普勒变化相较于时频域显著缓慢, 从而有利于信道估计, 便于跟踪信道状态; 另一方面, OTFS 通过调控二维的信号变化, 将信号映射到时频域上, 在结合有效的检测技术基础上, 可使其获得时频域上的全分集增益。

2.3 预编码和检测技术

对于采用的发射和接收多天线, 传统的预编码方案包括全数字预编码方案和全模拟预编码方案。如图 5(a)所示, 全数字预编码方案即在基带上控制处理信号的相位和幅度, 其每根天线必须连接一个专用射频链路 (包括数模转换器、放大器、混频器等)。该系统采用毫米波频段, 天线数量多, 这将导致系统所需的射频链数目剧增, 以至于系统能耗和硬件成本过高。如图 5(b)所示, 全模拟预编码方案的所有天线通过移相器仅需与一个射频链路相连接, 即可大幅降低全数字预编码的系统硬件成本, 然而由于移相器本身的限制, 全模拟预编码在一个时刻只能形成一个独立波束, 无法满足同时多波束的要求。综合考虑硬件成本和多波束的要求, 本文系统采用如图 5(c)所示的混合预编码结构设计。混合预编码分为数字预编码和模拟预编码 2 个部分, 射频链路数介于 1 与天线数之间, 能够兼顾同时多波束和降低射频链路数的要求。混合预编码可以分为全连接结构和部分连接结构, 当每个射频链路与所有的天线相连时为全连接结构, 当每个射频链路只与部分天线相连时为部分连接结构, 部分连接结构能够进一步提高系统的能效。

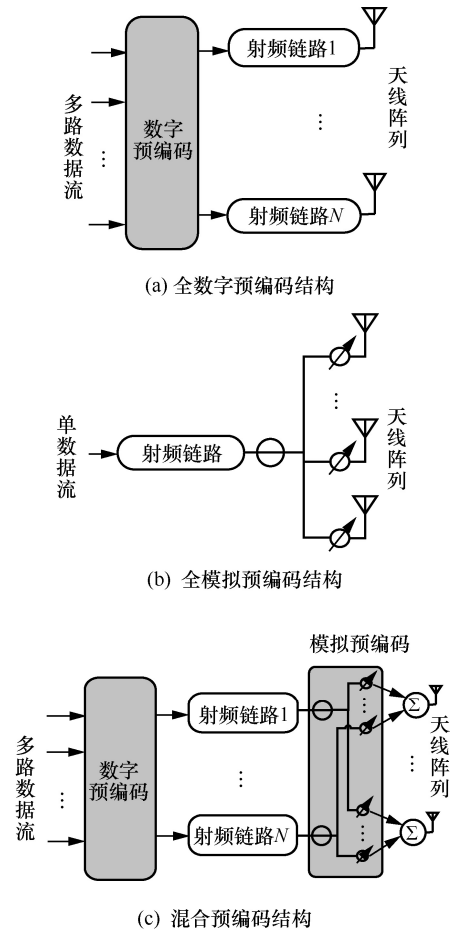


图 5 不同预编码硬件结构

在混合预编码的硬件基础上, 如图 6 所示, 与普通场景下的移动通信相比, 机间通信场景由于收发机高速移动以及干扰和截获的问题, 预编码和检测问题变得更复杂, 而毫米波频段的窄波束特性也给波束跟踪带来了一定的困难, 主要体现在以下几个方面。

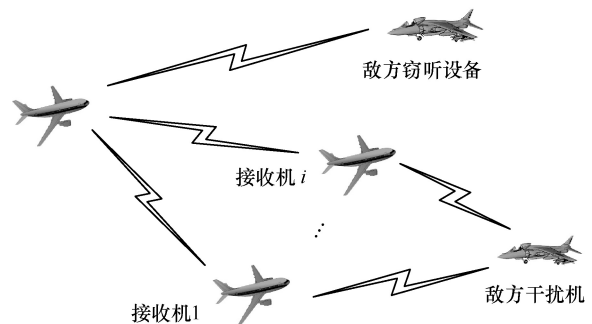


图 6 机间通信场景示意

1) 收发机的高速移动特性要求预编码算法和检测算法能够保证实时的波束跟踪。在毫米波系统窄波束的情况下, 如果跟踪波束的角度偏差过大, 信噪比将急剧下降甚至无法检测到信号。假设收发

机相距 100 km (机间通信收发机距离的典型值), 接收机相对发射机以 2 马赫的速度进行切向运动, 此时接收机相对发射机的角度变化为 $0.39^\circ/\text{s}$, 而波束的主瓣宽度为 1.3° , 这表明只需 3.4 s 接收机就会穿过一个完整的波束主瓣宽度。这就要求预编码和检测技术能够使波束快速锁定并跟踪目标平台, 以保证战机在飞行过程中的通信链路不中断。在波束成形的过程中, 一般有 2 种思路: 一种是通过直接求解优化函数直接得到预编码矩阵的表达式; 另一种是采用码本搜索的方法, 从选定的码本中搜索出最佳的波束。求解优化函数的方法需要先进行信道估计, 得到信道矩阵的值, 而码本搜索的方法需要接收机反馈接收信号强度等信息。对于本文中信道状态快速变化的高速场景, 频繁进行信道估计或者码本搜索会极大地消耗系统资源, 从而降低通信效率。在这种情况下, 采用有效的波束预测方法实现波束跟踪可极大地提升系统的性能。传统的方法采用卡尔曼滤波来对接收机的角度方位进行时间序列估计, 极大地降低了信道估计或码本搜索的频率, 从而具有更高的实时性。近年来, 深度学习等人工智能 (AI, artificial intelligence) 技术的快速发展也有望提供新的预测方法, 进一步提高预测的精度、波束跟踪的精度和实时性。

2) 检测算法进行设计时, 接收波束不仅需要使接收到的有用信号功率大, 还需要减小其他用户信号及敌方干扰机信号的能量。得益于毫米波天线阵列的窄波束, 干扰机或其他用户只有与发射机同处于极窄的波束角度范围时才会对接收机造成显著的干扰。当这种情况出现时, 检测算法的设计需要额外考虑敌方干扰的影响。比如文献[19]中采用波束零陷方法降低敌方干扰信号对接收机的干扰强度。波束零陷方法通过正交投影的方式, 使接收波束在干扰机方向形成零陷, 从而极大地降低进入接收机的干扰信号能量。

假设我方发射机坐标为 $(0, 0, 8 \text{ km})$, 发射机功率为 200 W, 我方接收机坐标为 $(100 \text{ km}, 0, 8 \text{ km})$, 接收天线为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$, 单元间距为半波长的天线阵列, 接收机噪声为 -96 dBm , 敌方干扰机坐标为 $(150 \text{ km}, 3 \text{ km}, 7 \text{ km})$ 。为了比较不同检测波束成形算法及选用不同频段带来的抗干扰性能的差异, 此处先不考虑其他因素的影响, 即假设我方发射机发射天线、我方接收机接收天线、敌方干扰机发射天线皆为全向天线, 我方发射机、敌方干扰机到我方

接收机信道皆为视线线路信道且衰减按自由空间传输衰减公式计算。则我方发射机发射天线或者敌方干扰机发射天线到我方接收机接收天线单个天线单元的路径损耗计算式为

$$L = 32.45 + 20 \lg f + 20 \lg r \quad (3)$$

其中, f 为信号的频率 (单位为 MHz), r 为发射天线到接收天线的距离 (单位为 km)。对于 Ku 频段 (取频率为 15 GHz) 和毫米波频段 (取频率为 26.5 GHz), 分别使用波束匹配方法 (波束直接对准我方发射机, 检测向量为阵列响应的共轭)、文献[19]中的波束零陷方法在接收机进行检测, 得到系统的可达速率随干扰功率的变化, 如图 7 所示。从图 7 可以看出, 在相同干扰功率下, 毫米波频段的可达速率显著高于 Ku 频段, 其抗干扰能力更强。对于 Ku 频段, 采用抗干扰的波束零陷进行检测能显著提高可达速率; 对于毫米波频段, 由于其波束窄, 干扰机方向在其匹配波束的主瓣外, 此时是否采用波束零陷对其基本无影响, 2 种检测算法的性能曲线近乎重合。

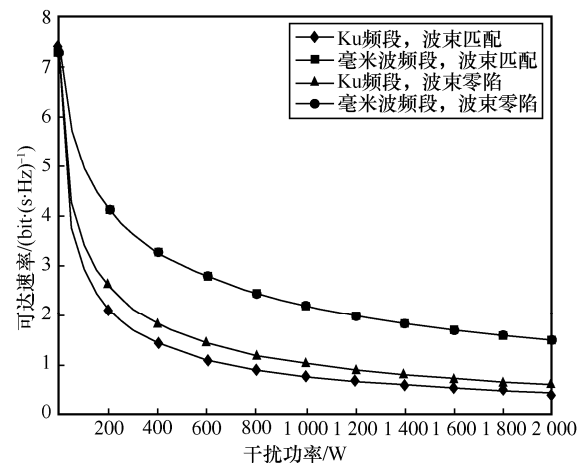


图7 不同检测方法下系统的可达速率随干扰功率的变化

3) 预编码算法形成的波束在指向接收机的同时, 需要尽可能降低窃听设备方向的能量。在预编码算法的设计过程中, 需要同时考虑目标接收机的接收速率 R_U 和窃听接收机的窃听速率 R_E , 这与只需考虑目标接收机的场景有很大的不同。对于不考虑窃听的场景, 只需要以和速率或者加权和速率为优化目标进行预编码的设计, 若采用混合预编码, 只需先按照全数字预编码进行求解, 再将求解到的最优预编码矩阵在模拟预编码的码本上进行投影即可, 其中模拟预编码的码本可选为离散傅里叶变

换基矩阵等。对于本文中具有窃听者的复杂场景，需要额外考虑窃听者的影响，这可以通过定义安全速率来进行求解。安全速率定义为目标用户的速率与窃听者速率的差值，对于单授权接收机、单窃听接收机场景，表达式为

$$R_{\text{sec}} = [R_U - R_E]^+ \quad (4)$$

其中， $[x]^+$ 表示 x 与 0 中的较大值。对于单授权接收机、多窃听接收机场景，通常直接假设多个窃听接收机不合作，取多个窃听接收机对应的窃听速率的最大值来计算安全速率指标，即

$$R_{\text{sec}} = \left[R_U - \max_{n \in \mathcal{K}_E} R_E(n) \right]^+ \quad (5)$$

其中， \mathcal{K}_E 代表窃听接收机集合。现有很多研究对单接收机场景多窃听接收机进行了求解，如文献[20]中给出了单用户多窃听者场景下以安全速率为目标函数的预编码方法。然而，对于更符合实际情况的多窃听接收机进行复杂合作的场景，安全速率指标的定义是一个难题，该场景下的安全通信问题有待进一步解决。

以上 3 个问题虽然已有相关的研究，然而现有的理论模型假设过于理想，如在波束跟踪的研究中，文献[21]中假设的匀速直线运动模型，文献[22]中的离散马尔可夫过程运动模型对高速、机动复杂的飞机场景来说过于理想；在抗窃听的预编码研究中，各窃听节点接收机相互独立进行窃听的假设也过于理想。因此研究者需要探索进一步的解决方案来推动基于毫米波机间数据链系统的落地。

3 毫米波机间数据链网络层关键技术挑战

对于毫米波通信系统，由于毫米波的抗遮挡效果差，无法通过大气层散射来进行通信，因此一般只能在视线线路范围内进行直接通信。对于不存在视线线路的通信双方，则可以通过自组网技术利用中继节点间接传输信息。而对于高速运动的战机平台，网络节点的拓扑结构随时间快速变化，完全有可能在信息传输过程中发生拓扑结构的变化，在这种情况下，网络节点的拓扑控制以及数据路由的选择策略将是影响系统性能的关键问题。

3.1 拓扑结构的控制

拓扑结构的控制可以分为三大类：优化能效的拓扑控制、优化网络容错的拓扑控制、优化干扰的拓扑控制^[23]。现有公开的关于无线自组网的研究以

无人机的自组网技术为主，因此主要针对的是优化能效的拓扑控制，如文献[24]通过一种基于聚类的自适应拓扑控制算法来降低整个网络的总功耗；文献[25]提出了一种三阶段的拓扑控制算法，同时降低了网络的能耗和时延。优化网络容错的拓扑控制一般以图论中的支撑图为理论基础，借助支撑图构造高容错的拓扑结构。优化干扰的拓扑控制一般以网络的和速率作为评价指标，进行拓扑结构的优化^[23]。

对于机间数据链来说，由于系统的功率容限较高，优化网络容错和优化干扰更重要。而对于毫米波机间数据链而言，其定向窄波束特性对拓扑结构提出了更高的容错率要求，但同时放宽了其链路间干扰的要求。其一，毫米波信道以视线线路信道为主，导致两节点间的通信链路容易受阻挡中断，提高了其容错率要求。其二，毫米波的波束窄、方向性好、反射和绕射能力弱，因此各节点间的通信干扰小，节点间能建立更多链路而不会产生严重的链路间干扰。在拓扑结构控制上，需要针对毫米波数据链的特点进行设计，不同的拓扑结构将带来显著的组网性能差异。以图 8 中 3 种最简单的拓扑结构（环形拓扑、星形拓扑、网状拓扑）为例，当遇到节点出错时，在网状拓扑下，未出错的节点依旧能正常通信；在星形拓扑下，只有出错节点为非中心节点时才能正常通信；在环形拓扑下，任意节点出错都会使所有节点无法通信。显然，在 3 种拓扑结构中，网状结构容错性能最佳。然而，网状结构由于需要建立的节点间链路数远多于环形结构和星形结构，其节点间链路的互相干扰也最严重。这就需要在设计系统时，综合容错和干扰目标，形成最佳的拓扑结构。在实际的应用中，拓扑结构不会呈现为简单的单一类型，而是多种拓扑结构的混合类型，通常是通过拓扑控制算法按照优化目标自动生成的。此外，拓扑结构的控制还呈现动态性，如图 9 所示，随着节点间链路状态的变化，需要不断进行链路的建立和改变以修复节点间的连通状态。

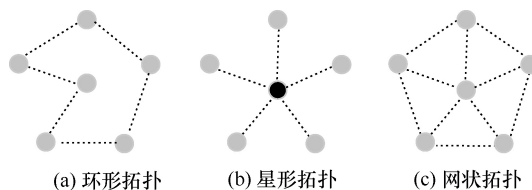


图 8 不同类型的拓扑结构

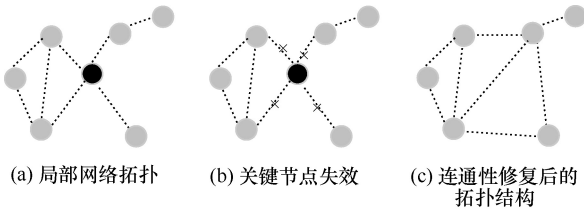


图9 拓扑结构的动态连通性修复

3.2 路由协议

在已有拓扑结构的基础上,如何选择数据的路由算法会直接影响到通信的时延性能。对于毫米波,其节点间链路不稳定,节点和节点间的数据链路会更频繁地连接和断开,这就导致路由信息过时快,路由协议需要额外地满足路由信息快速更新的要求。

路由协议主要分为主动路由协议和按需路由协议两类^[26-28]。其中,主动路由协议的路由表预先存储在节点中,并通过周期性广播来更新路由表,从而应对网络节点的变化。主动路由协议主要包括目的节点序列距离矢量路由、鱼眼状态路由、优化的链路状态路由协议等。按需路由协议只有在需要传输数据时才向网络中请求路由信息,可节省能耗、带宽等网络资源,但当其源节点上没有目的节点的路由时,需要临时搜索和创建路由,从而导致路由寻址时间较长,无法满足高实时性的要求。按需路由协议主要包括按需距离矢量协议、动态源路由协议、临时预定路由协议等^[26]。传统的先应式路由协议和反应式路由协议都无法同时满足机间数据链路由信息快速更新和路由寻址低时延的要求,故需要针对机间数据链场景研究新型的路由协议。

在路由结构上,存在单层结构和多层结构,单层结构下,每个节点都作为路由节点,承担数据转发的功能;多层结构下,各邻近节点组成一个一个的群组,每个群组内只有某几个节点承担数据转发的功能,这些节点以外的节点则通过群组内的这些节点的转发与其他节点进行通信^[28-29]。

在路由路径选择上,有贪婪转发算法、基于预测的算法等^[29]。贪婪转发算法将数据转发到时延最低的相邻节点;基于预测的算法根据各节点的位置和速度选择未来离目的地更近的节点进行转发,但其要求已知其他节点的位置和速度信息。在路由结构、路由路径选择以及路由信息的更新上,都尚未有针对毫米波机间数据链的研究,相关问题有待进一步解决。

3.3 实时自适应网络管理

机间数据链节点的高动态变化特性导致了毫米波节点间链路的不稳定性,使其自组网的网络管理相比其他场景要复杂得多。首先,节点和节点间的数据链路会频繁地连接和断开,实时管理节点的接入和离开需要消耗大量的系统资源;其次,节点的快速移动会导致网络的拓扑结构和节点间链路的性能参数发生变化,之前较优的路由表会快速失效且可能会在某节点链路变差后发生网络的拥堵。目前的节点接入多依赖于邻居发现算法^[30],在应对频繁接入和断开时复杂度较高,有待进行进一步的优化。要想在这种高动态的网络下达到更好的性能,就必须引入人工智能等技术,更智能地预测网络的变化情况及更智能地调控网络管理策略^[31],从而将网络性能的波动影响降到最低。

4 结束语

本文对机间数据链技术的发展历史、现有机间数据链系统的缺点和不足进行了分析和总结,在此基础上,针对现有机间数据链通信速率、抗干扰和抗截获性能上的不足,提出了一种基于毫米波通信的机间数据链系统。由于毫米波带来的大带宽和窄波束特性,所提系统具有高通信速率、抗截获和抗干扰的优点,通过无线自组网技术,有望满足编队内任意战机单元之间的高速、安全的通信需求。所提系统有望实现硬件精简化与集成化:其一,若以毫米波无线通信替代传统的有线传感器网络,该机间数据链系统可进一步实现机内外通信的一体化;其二,该系统可以使导弹的寻的毫米波雷达通过通信感知一体化技术建立与战机间的通信链路;其三,基于毫米波频段的智能反射面硬件有望替代现有复杂的混合预编码发射机。拥有众多优势的同时,该系统也面临着多方面的挑战,这些挑战主要是由机间通信的高速移动场景带来的,包括极大多普勒频偏信道建模和信号设计、实时的波束跟踪以及自组网问题,这些问题的研究与解决将为毫米波机间数据链系统的设计与部署提供关键技术支撑。

参考文献:

- [1] PACE D K. Conceptual model development for C4ISR simulations[C]//The 5th International Command and Control Research and Technology Symposium. [S. l. s. n.], 2000: 24-26.
- [2] 文吉. 机间数据链核心问题的分析与探讨[J]. 电讯技术, 2007,

- 47(5): 89-93.
WEN J. Discussion about the all-important problems in developing the intra-flight data link(IFDL)[J]. *Telecommunication Engineering*, 2007, 47(5): 89-93.
- [3] 王馨, 陈真, 周军, 等. 抗截获物理层安全宽带传输技术研究[J]. *通信技术*, 2021, 54(10): 2403-2412.
WANG X, CHEN Z, ZHOU J, et al. Research on anti-interception physical layer security wideband transmission technology[J]. *Communications Technology*, 2021, 54(10): 2403-2412.
- [4] 张伟, 周劼, 叶江峰, 等. 一种慢跳频系统频率跳变时刻同步算法[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2014, 12(3): 391-396.
ZHANG W, ZHOU J, YE J F, et al. A frequency hopping signals hop timing synchronization algorithm for slow frequency hopping system[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2014, 12(3): 391-396.
- [5] 张红超, 欧阳喜, 张冬玲. 盲接收条件下单信道时频混叠信号的调制识别[J]. *信息工程大学学报*, 2016, 17(1): 34-40.
ZHANG H C, OUYANG X, ZHANG D L. Modulation recognition for time-frequency overlapped signals in single-channel under blind reception conditions[J]. *Journal of Information Engineering University*, 2016, 17(1): 34-40.
- [6] 刘玲. 未来电子战展望[J]. *电子信息对抗技术*, 2021, 36(6): 30-33, 99.
LIU L. Look into the future of electronic warfare[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2021, 36(6): 30-33, 99.
- [7] 陆震, 黄用华. 美俄电子战对抗的现状与分析[J]. *北京邮电大学学报*, 2020, 43(5): 1-8.
LU Z, HUANG Y H. Electronic warfare confrontation between the United States and Russia[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2020, 43(5): 1-8.
- [8] 吕娜. 数据链理论与系统(第2版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
LYU N. Theory and system of data link[M]. 2nd edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018.
- [9] 何肇雄. 战术数据链组网技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
HE Z X. Study on networking process technologies for tactical data link[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [10] 龚睦. 低速率毫米波通信数据链研究与验证[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
GONG M. Research and verification of data link for low rate millimeter wave communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [11] Northrop Grumman. Understanding voice and data link networking [R]. 2014.
- [12] 谭勇, 魏嘉. 美国第五代战机数据链最新改进一瞥[J]. *现代军事*, 2015(2): 66-71.
TAN Y, WEI J. A glimpse of the latest improvement of the data link of the fifth generation fighter in the United States[J]. *Commlit*, 2015(2): 66-71.
- [13] ZIEGLER V, SCHULTE B, SABATER J, et al. Broadband 57-64-GHz WLAN communication system integrated into an aircraft cabin[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(12): 4209-4219.
- [14] 张辉, 黄默, 曲春辉. DBS 成像技术在毫米波雷达导引头中的应用[J]. *火控雷达技术*, 2014, 43(2): 30-33, 95.
ZHANG H, HUANG M, QU C H. Application of DBS imaging technology in millimeter-wave radar seeker[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2014, 43(2): 30-33, 95.
- [15] MNASRI B, BOUTAYEB H, TALBI L. New design technique for mm-wave reflecting electromagnetic surfaces with varying phase shifts[C]//*Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 191-192.
- [16] DENG R Q, DI B Y, ZHANG H L, et al. Reconfigurable holographic surface: holographic beamforming for metasurface-aided wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(6): 6255-6259.
- [17] WELLS J. Faster than fiber: the future of multi-G/s wireless[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2009, 10(3): 104-112.
- [18] HADANI R, RAKIB S, TSATSANIS M, et al. Orthogonal time frequency space modulation[C]//*Proceedings of 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [19] 吴若增. 改进的正交投影宽带发射波束零陷展宽算法[J]. *舰船电子对抗*, 2019, 42(3): 42-47.
WU R Z. Null broadening algorithm for wideband transmitting beam of improved orthogonal projection[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2019, 42(3): 42-47.
- [20] LI R D, WEI Z Q, YANG L, et al. Resource allocation for secure multi-UAV communication systems with multi-eavesdropper[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(7): 4490-4506.
- [21] 刘家学, 林松岩. 高阶无迹卡尔曼滤波算法在飞机定位中的应用[J]. *计算机应用与软件*, 2016, 33(5): 256-259, 264.
LIU J X, LIN S Y. Application of high-order unscented Kalman filter in airplane localisation[J]. *Computer Applications and Software*, 2016, 33(5): 256-259, 264.
- [22] ZHANG D Y, LI A, PRADHAN C, et al. Training beam sequence design for multiuser millimeter wave tracking systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(10): 6939-6955.
- [23] RAJARAMAN R. Topology control and routing in ad hoc networks[J]. *ACM SIGACT News*, 2002, 33(2): 60-73.
- [24] CHAUDHRY R, TAPASWI S. Optimized power control and efficient energy conservation for topology management of MANET with an adaptive Gabriel graph[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2018, 72: 1021-1036.
- [25] 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.
LIU J, SUN Q, LI S H, et al. Topology control algorithm based on directional antenna in wireless ad hoc networks[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2012, 33(9): 1257-1260.
- [26] 孟利民, 宋文波. 移动自组网路由协议研究[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
MENG L M, SONG W B. Mobile ad hoc network protocols[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2012.
- [27] 张莉莉, 王卫华. 无线自组网路由算法综述[J]. *软件导刊*, 2009,

8(10): 73-75.

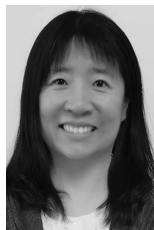
ZHANG L L, WANG W H. Summary of routing protocol for wireless mesh network[J]. Software Guide, 2009, 8(10): 73-75.

- [28] OUBBATI O S, ATIQUZZAMAN M, LORENZ P, et al. Routing in flying ad hoc networks: survey, constraints, and future challenge perspectives[J]. IEEE Access, 2019, 7: 81057-81105.
- [29] LAKEW D S, SA'AD U, DAO N N, et al. Routing in flying ad hoc networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(2): 1071-1120.
- [30] 胡郑峰, 王建. 一种定向无线自组网邻居发现算法[J]. 电讯技术, 2022, 62(11): 1663-1669.
HU Z F, WANG J. A neighbor discovery algorithm for wireless ad hoc networks with directional antennas[J]. Telecommunication Engineering, 2022, 62(11): 1663-1669.
- [31] DAS S, RAO R S, DAS I, et al. Cloud computing enabled big-data analytics in wireless ad-hoc networks[M]. Boca Raton: CRC Press, 2022.

[作者简介]



徐鹏政（1997-），男，江西上饶人，哈尔滨工业大学博士生，主要研究方向为预编码、毫米波、智能反射面技术等。



于启月（1982-），女，黑龙江哈尔滨人，博士，哈尔滨工业大学教授，主要研究方向为大规模多址通信理论及其应用、强多径大多普勒频移信道中的抗干扰技术的理论及其应用、Massive MIMO 理论与技术等。



林泓池（1993-），男，吉林集安人，哈尔滨工业大学博士生，主要研究方向为超密集组网、智能反射表面和非正交多址技术等。



刘海宁（1986-），男，河北衡水人，沈阳飞机设计研究所高级工程师，主要研究方向为航电系统、新体制网络设计等。