

# 5G-A 通感一体化的 场景、挑战及关键技术

## Scenarios, Challenges and Key Technologies of 5G-A Integrated Sensing and Communication

陈大伟<sup>1,2</sup>, 向际鹰<sup>1,2</sup>, 陈诗军<sup>1,2</sup>, 夏树强<sup>1,2</sup>, 崔亦军<sup>1,2</sup> (1. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518055; 2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 广东 深圳 518055)

Chen Dawei<sup>1,2</sup>, Xiang Jiyong<sup>1,2</sup>, Chen Shijun<sup>1,2</sup>, Xia Shuqiang<sup>1,2</sup>, Cui Yijun<sup>1,2</sup> (1. ZTE Corporation, Shenzhen 518055, China; 2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China)

### 摘要:

作为 5G-Advanced 关键技术之一, 通感一体化成为当前无线通信领域新的研究热点。与通感一体化技术相关联的场景开发、技术研究、性能测试持续推进。首先介绍了通感一体化技术的概念、标准推进情况, 从消费者领域、企业管理、社会治理方面剖析了典型的应用场景。之后探讨了通感一体化技术面临的自干扰、同步问题等挑战, 最后介绍通感一体化技术涉及的波形设计、干扰消除、网络架构等关键技术, 并对全文研究内容做了总结。

### 关键词:

通感一体化; 挑战; 关键技术

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2022.08.005

文章编号: 1007-3043(2022)08-0023-06

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

As one of the key technologies in 5G-Advanced stage, integrated sensing and communication (ISAC) has become a new research hotspot in the current wireless communication field. Scene development, technology research and performance testing related to ISAC are continuously advancing. Firstly, the concept and standard promotion of ISAC are introduced, and typical application scenarios are analyzed from the aspects of consumer field, enterprise management and social governance. Then it discusses the challenges faced by ISAC, such as self interference and synchronization. Finally, it introduces the key technologies involved in ISAC, such as waveform design, interference elimination, network architecture and so on, and summarizes the research content of the full text.

### Keywords:

Integrated sensing and communication (ISAC); Challenges; Key technologies

引用格式: 陈大伟, 向际鹰, 陈诗军, 等. 5G-A 通感一体化的场景、挑战及关键技术[J]. 邮电设计技术, 2022(8): 23-28.

## 0 引言

2021 年 4 月, 3GPP 确定以 5G-Advanced (5G-A) 作为 5G 网络演进的第 2 阶段。5G-A 以及 6G 移动通信网络将革命性地扩充系统功能, 即在提供高速通信功能的前提下, 增加感知能力, 以支撑全方位智能化应用, 实现万物互联。通感一体化可以感知目标的方位、距离、速度等信息, 实现对目标的检测、捕捉、跟

踪、成像。相比当前独立的通信系统, 通感一体化系统提供感知层面的信息可辅助通信实现更高的速率、更可靠的信息传递。本文以 5G-A 为背景, 探讨通感一体化实现道路上可能遇到的主要挑战, 以及必须解决的关键技术问题。

## 1 通感一体化概念及场景需求

### 1.1 通感一体化的概念及分类

通感一体化是指融合通信和感知 2 个功能, 使系统同时具有通信和感知能力。通感一体化系统的信

收稿日期: 2022-06-01

号在传输信息过程中通过主动认知并分析信道的特性,进而感知周围环境的物理特征。从不同维度分析,有不同的分类。

感知内容上,可以分为狭义的通感一体化和广义的通感一体化<sup>[1]</sup>。狭义的通感一体化是指具有测距、测速、测角、成像、目标检测、目标跟踪和目标识别等能力的系统;广义的通感一体化指具有感知一切业务、网络、用户和终端,以及环境物体的属性与状态的系统。

感知方式上,可以分为主动感知、被动感知、交互感知。主动感知是指感知者发送电磁波,经过目标反射后,感知者接收回波进行感知,比如雷达技术。被动感知是指感知者接收电磁波并对自身实现感知。交互感知是指感知者与目标对象之间通过信息交互,对电磁波发送的主体、时间、频率、格式等内容进行约定,而后进行感知<sup>[2]</sup>。

通信和感知的相互作用上,可分为感知辅助通信和通信辅助感知2类<sup>[3-4]</sup>。感知辅助通信以通信业务为主,感知为通信提供信道信息、目标特征等先验信息,提高通信质量和速率。通信辅助感知以感知业务为主,通信为感知提供信息传递渠道。其中感知辅助通信是当前业界研究的重点。

基站分布上,可分为单站感知和多站感知<sup>[5]</sup>。单站感知指的是感知信号的发送和接收由同一个基站完成。多站感知指的是感知信号的发送和接收由分布式部署的2个或多个基站完成。

## 1.2 标准进展

3GPP中通感一体化技术目前处于技术预研阶段。SA1 在通感一体化的需求、场景方面完成立项。IMT2020(5G 推进组)已经开展了5G-A 通感一体化关键技术研究,包括场景、架构、测试、仿真和空口技术等,并进行了多项通感融合场景用例方面的可行性验证测试。IMT2030(6G 推进组)开展了全面综合原生的通感融合体系架构设计和关键技术研究,并发布了通感一体化第1阶段技术研究报告,下一阶段着重场景、技术和测试方面的研究。CCSA开展了通感融合研究工作。ITU-R 将通感一体化作为一个技术写进Trends 报告。

## 1.3 通感一体化的应用场景

通感一体化在终端消费、企业管理、社会治理等领域将发挥至关重要的作用,如图1所示。

健康医疗方面,5G-A 通信感知一体化系统在实



图1 通感一体化应用场景

现高速通信的同时,可有效实现健康监测和管理。现有技术已经实现了利用通信信号实现人体的呼吸和心跳的监测。当发现呼吸和心率异常时,预警信息通过通信链路实时回传给用户,实现实时监测功能。同时,太赫兹成像和光谱检查也将使医疗保健领域的大量新应用成为可能,例如癌变组织、龋齿的检测,以及用以提供被动的、连续的、居家的生物液体中的生化标记物的监测,如对汗液、眼泪、唾液、外周血和组织液的监测<sup>[1-3,6-9]</sup>。

智能工厂方面,感知技术配合监控系统实时感知车间内的人员、物品、设备的位置,感知技术可有效弥补监控盲区,实现车间内监控无缝覆盖。在感知技术加持下,智能工厂具有自主能力,后台算力单元通过整体可视技术进行推理预测,做出分析、判断、规划。感知技术能够提升作业车间的防盗报警、消防预警等能力,并将预警信息实时回传控制台,提升安全系数。

低空监控方面,无人机随意乱飞造成的隐私泄密、空中碰撞、噪声干扰等问题日渐显著。无人机安防市场多种探测方案并存,但都面临技术、效率、成本等诸多限制。5G-A 通感一体化技术可以发挥5G网络优势,让通信和感知共用资源、共享成本实现更好的感知性能及成本效益。一方面实现无人机位置、速度、航道、禁飞区等信息的连续感知探测,另一方面,利用5G大带宽通信能力,实现无人机飞控数据的实时回传,确保无人机依法依规飞行,防范非合作无人机入侵导致的各类安全事故。

## 2 5G-A 通感一体化面临的挑战

### 2.1 自干扰问题

5G通信自干扰会降低信号质量,有用信号占比急剧降低。在通感一体化领域,自干扰问题更为突出<sup>[9]</sup>。多站感知系统收发基站相距较远,自干扰问题不是很严重。本文以单站感知的自干扰问题为例。单站感知的干扰源包括天线间的自干扰、射频自干扰、数字

自干扰3部分,如图2所示。天线间自干扰指发端天线信号直接泄露被接收天线接收。由于距离较近,干扰信号能量较大,如果不对这部分干扰源进行抑制,将给后续数据处理带来很大问题。射频干扰指发端射频链路泄露的信号到接收端射频链路的现象。数字自干扰,指发端进入到DAC前的部分数字域杂波信号泄露并叠加到收端ADC后,形成干扰源。天线间的自干扰信号、射频自干扰信号、数字自干扰信号混杂在回波信号中,降低了接收信号质量,导致有用的信号成分比值降低,增加了目标感知和检测的难度。同时,由于干扰信号几乎没有经过路程的衰减,容易造成接收ADC饱和,有用信号量化后甚至检测不到。

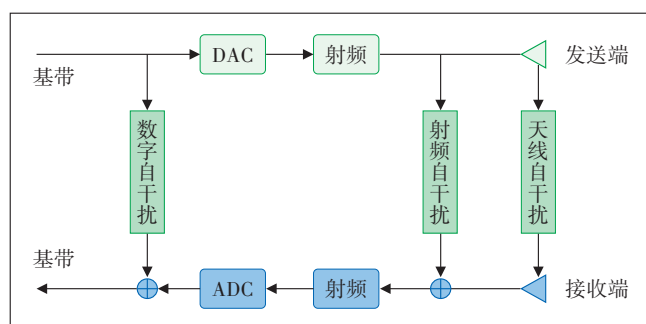


图2 通感一体化的自干扰

## 2.2 同步问题

同步问题是制约感知的关键因素。单站感知由于收发端共用同一时钟源,同步对感知影响不大。同步问题对多站感知影响不可忽略<sup>[10]</sup>。通感系统的发射端和接收端之间的不同步将导致定时偏移(Timing Offset, TO)和载波频率偏移(Carrier Frequency Offset, CFO)。对于不同的子载波,定时偏移的相位偏差与子载波的索引线性相关;载波频率偏移影响相同,但是在不同时域符号中会引起随时间变化的相位偏差。最终降低系统对目标时延和多普勒频率估计精度,并导致测距和速度测量精度降低。

从作用效果上看,5G通信系统基站之间同步水平普遍在 $\mu\text{s}$ 级, $\mu\text{s}$ 级的同步误差可以满足低时延、高可靠通信的基本需求。然而对于通感一体化,要实现高精度位置感知,要求定位精度至少达到米级甚至分米级,收发基站之间1 $\mu\text{s}$ 同步误差就代表300 m的距离感知误差,显然无法实现高精度感知目标。必须采用必要的软硬件算法把基站之间同步误差控制在ns级甚至ps级,这是实现高精度感知的必要条件。

## 2.3 通感系统的算力问题

算力问题是通感一体化重大挑战之一。行业将“通感一体化”扩充为“通感算一体化”,算力问题是通感一体化底层支撑,感知、通信、算力三功能互利互惠,相辅相成。

为了获取极致的感知体验,通感系统对感知性能和感知实时性提出了高要求。一方面需要设计高精度的感知算法,高性能算法往往意味着高复杂度。另一方面,感知实时性对感知结果的处理和回传提出极高的要求,需要系统提供更快的传输速率、采样率、处理速率,当前通信系统无论网络架构还是硬件很难支撑如此大规模的算力。

对于高速移动目标如车辆的感知,为实时跟踪车辆的位置,需要短时间内快速处理感知数据并获取感知结果,回传给用户;对于无人机入侵的感知,无人机由于表面积有限,其反射的信号能量很小,需要用高复杂度的算法解算精确位置;对于健康医疗来讲,后台需要同时处理海量用户的健康检测数据,完成呼吸、心跳等参数的解算。以上通感一体化的应用场景均需要巨大算力作为支撑。

## 2.4 信道估计及信号检测问题

通感一体化技术的研究刚刚兴起,进行大量仿真需要精准的信道模型支撑。通信仿真广泛使用的模型之一是3GPP TR 38.901信道模型,但是该模型仅包含面向通信的功能,不区分感知目标和非感知目标。无线信道环境中的反射体导致的多径成分对于通信来说是有益的,而目标感知需要区分不同多径的属性,如路径是反射径还是直射径,是一次反射径还是多次反射径。其次,面向通信的信道模型不支持自发自收的信道建模,在自发自收的感知方式下,需要在信道模型中考虑感知目标的反射、散射特征,且回波信号所经历信道的路径损耗和额外的反射损耗是通信信道的2倍<sup>[11]</sup>。

通信信号的检测只需测出包含有用信号的信号径即可,不用关心信号径是LOS径、反射径。而对于感知来讲,感知信号一般是目标的反射信号,可能是一次反射径,对于复杂场景,可能是二次、三次甚至多次反射径,信号经过反射后,能量指数级减小,甚至淹没在噪声中,如何在噪声中检测弱小信号,给信号检测提出了重大挑战。对于通信来讲,LOS径功率大非常有利于解调、解码。但是LOS对于感知可能是极大的干扰,可见通信和感知在信号检测上存在很大的矛盾,如何有效平衡二者,需要研究更智能、更高效的信



号检测算法。

### 3 5G-A 通感一体化的关键技术

#### 3.1 一体化波形设计

通感一体化波形设计可从3个方面开展:以通信为中心的波形设计、以感知为中心的波形设计、通感联合的一体化波形设计<sup>[2-3,9,12]</sup>。

以通信为中心的波形设计在保证通信性能的前提下使波形具备一定的感知性能。以OFDM为代表的通感一体化波形设计受到越来越多的关注,它与以5G为代表的移动通信系统物理层标准具有良好的兼容性。基于OFDM的通感一体化波形能够最大限度地保证通信性能,但是OFDM波形的大峰均比以及高旁瓣会给信号检测带来极大干扰,其感知性能受到很大限制。为了提高感知性能,以通信为中心的一体化波形首先应当考虑恒包络波形设计,使感知在不产生信号失真的情况下以最大可用功率发射信号。通感一体化波形应当具有良好的相关特性,使频谱、空间谱的旁瓣水平降至最低,降低目标检测的误检率。

以感知为中心的一体化波形设计在不影响感知性能的前提下将通信数据嵌入到感知波形如LFM中。其中包括在感知波形的时频域表示中嵌入不同的通信符号、利用感知信号旁瓣波束发送数字通信信息

等。然而由于LFM携带数据信息量有限,这类波形设计通常导致通信速率与频谱效率较低。因此,虽然以感知为中心的一体化波形能够提供良好的感知性能,但是其应用几乎仅限于中、低数据速率的场景。OFDM信号和LFM信号的性能比较如表1所示。

表1 OFDM和LFM信号的性能比较

| 性能     | LFM                | OFDM         |
|--------|--------------------|--------------|
| 峰均比    | 低                  | 高            |
| 携带数据能力 | 弱                  | 强            |
| 模糊函数旁瓣 | 低                  | 高            |
| 多普勒频偏  | $1/2T$ , $T$ 为脉冲宽度 | 不超过子载波间隔的10% |
| 感知距离   | 受限脉冲宽度、采样率         | 循环前缀对应距离的一半  |

可见,无论是以通信为中心的波形设计还是以感知为中心的波形设计,均存在一些弊端。通感系统需要一种联合的一体化波形,使之既能满足高速通信,又能精确完成目标感知。通感联合的一体化波形设计可以提供额外的灵活性和自由度,提高感知与通信的整体性能。典型的通感联合的一体化波形OFDM-Chirp<sup>[13]</sup>的原理如图3所示,通信和感知数据通过频分复用分别被调制到奇数子载波和偶数子载波上,由于子载波之间完全正交,感知和通信信号互不干扰,且分别保留了通信信号的数据携带能力以及LFM信号的低峰均比、低旁瓣特性。

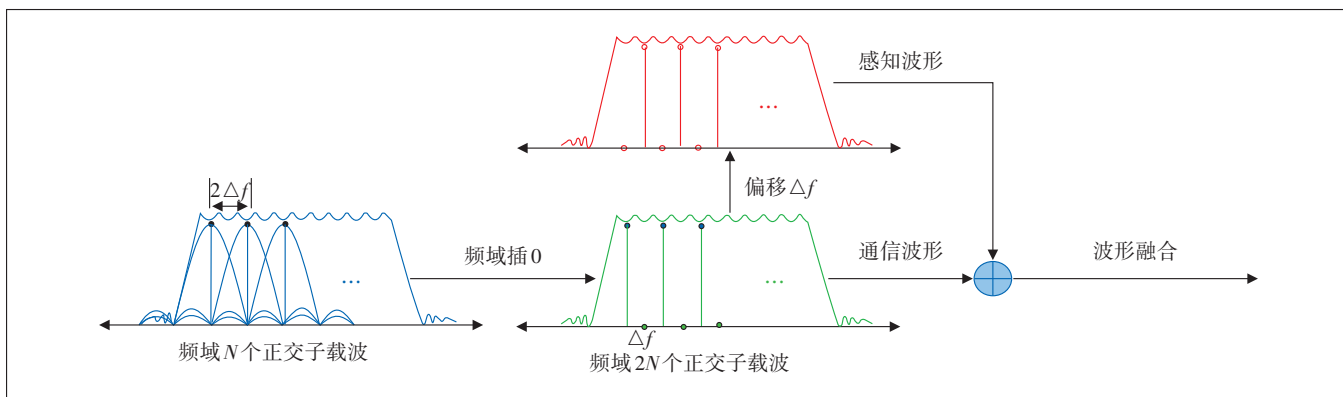


图3 一体化波形设计

#### 3.2 干扰消除技术

通感一体化的干扰消除包括硬件干扰消除和算法干扰消除。

##### 3.2.1 硬件干扰消除

硬件干扰消除主要有以下3种方式。

a) 天线自干扰消除:对于全双工通感系统,当收发天线共用同一根天线时,可以在收发天线之间增加

环形器,控制信号从一个端口进入,从另一个端口输出,增加收发天线之间的隔离度<sup>[14]</sup>。当收发天线独立时,可以适当增大收发天线之间的距离来保证隔离度。对于多天线形式,选择恰当的天线摆放方式,也可以减小自干扰。

b) 射频自干扰消除技术:直接耦合射频自干扰消除技术从发射端的射频通道直接耦合出一部分信号

作为参考信号,通过调整参考信号参数,重建出与自干扰信号相位相反的信号,在接收端与自干扰信号相加进而抵消。间接耦合射频自干扰消除技术根据自干扰信号来估计数字域信号特征,使用额外一条射频链路产生与自干扰相近的射频信号,最后在接收端射频链路上互相抵消<sup>[15,17]</sup>。

c) 数字自干扰消除技术:在ADC之后的数字域再次对干扰进行消除,包括自干扰估计与重建、自适应滤波、非线性消除3类<sup>[16-17]</sup>。

对于5G-A通信感知,单独使用某一种方法,效果往往有限,可以综合使用以上方法。如融合天线自干扰消除与数字自干扰消除技术,使收发天线隔开一定的距离,再通过数字滤波的方法来消除残余自干扰。

### 3.2.2 算法干扰消除

通感一体化系统的干扰信号可以在感知算法设计阶段进行消除。此处的干扰信号包括单站感知中由于隔离度不够造成的干扰,以及多站感知中由于视距路径引入的干扰成分。可选的干扰消除算法包括差分法、子空间分解法等。

a) 差分法:感知接收信号中包括有用的目标反射信号以及干扰信号,干扰信号主要是收发端之间的LOS成分,如图4所示。一般干扰信号功率远大于有用信号。不同时刻的有用信号不同,但是干扰信号近似恒定不变。对时刻 $n$ 接收的数据与前一时刻 $n-1$ 数据做差分,可有效消除公共的干扰成分,再对差分数据匹配滤波得到 $r_1$ , $r_1$ 中包括2个抽头,其位置分别对应有用信号数据到达时刻,提取抽头数据即为 $n$ 时刻和 $n-1$ 时刻的有用信号数据。这种方法可有效消除干扰信号,但是无法将2个抽头数据和所属时刻正确对应。将当前时刻 $n$ 接收数据与 $n-2$ 时刻接收数据做差分,匹配滤波后得到 $r_2$ ,比较 $r_2$ 中的2个抽头位置和 $r_1$ 中的2个抽头位置,位置相同的2个抽头的数据即为 $n$ 时刻的数据。

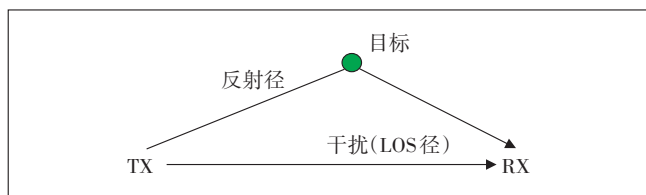


图4 场景建模

b) 子空间分解法:对某时刻的接收数据采样,构造协方差矩阵。对协方差矩阵进行奇异值分解,强自

干扰信号分布在由较大奇异值对应的奇异向量所构成的子空间中,把接收数据投影到该子空间中,得到干扰信号的估计结果。接收数据消掉这部分干扰信号,即得到有用信号。

## 3.3 架构设计

### 3.3.1 网络架构

5G系统网络架构只考虑了通信需求,并没有把感知功能融合进去。实现5G-A阶段通感一体化功能需要对5G网络架构做适当优化,以充分实现感知功能。为减小对5G系统的影响,通感一体化系统架构将尽量复用5G架构的网元功能,包括AMF、NEF、AF、UPF等功能,如图5所示。

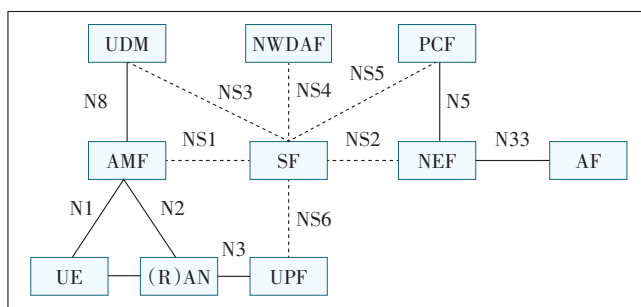


图5 5G-A通感一体化网络架构

通感一体化感知服务器(核心网)可能需要定义1个新的网元感知功能(SF),SF通过必要感知接口与其他网元连接。该网元功能向基站触发感知请求以及从基站接收感知数据,并计算得到感知结果。考虑到需要接收的感知数据量较大,感知服务器和基站之间有可能需要通过用户面接口进行通信。新增SF同时可以提供对外能力开放接口,将感知数据和结果发给第三方。

### 3.3.2 算力架构

通感一体化系统在保证高速通信同时要感知目标的角度、距离、速度。感知信号往往来自目标的反射,伴随着较强的杂波干扰。弱信号的检测提高了算法的复杂度,对于无人机、车辆等高速移动目标的感知,感知结果要具有实时特性,这些都对系统算力提出了极高要求。为满足算力需求,5G-A通感一体化算力架构如图6所示,具有以下2个特点。

a) 复用5G通信算力资源:5G-A感知优先复用部署在核心网侧的通信算力资源,在同一节点部署算力,有利于感知和通信算力分配,在实现通感一体化同时节约资源开销。

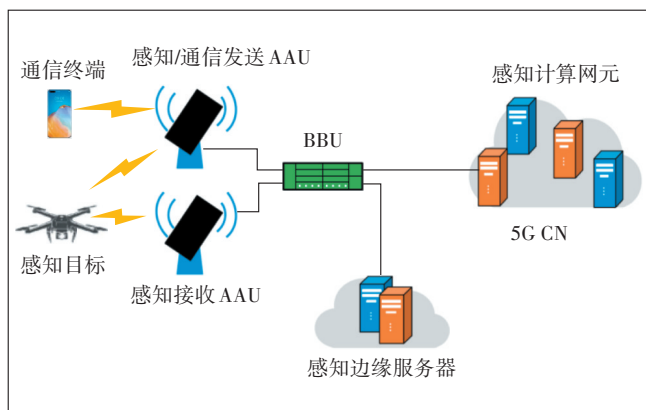


图6 5G-A通感一体化算力架构

b) 支持在AAU、边缘服务器等分布式部署算力: 对于一般的感知需求, 只需要使用现有的5G算力架构, 即可达到目的。对于特殊的感知需求, 需要在AAU、边缘服务器等部署算力。在AAU上部署算力, 可实现数据的即时处理。AAU由于各方面限制, 无法在收发数据同时支持大规模算力部署。不足算力需要下沉给边缘服务器, 感知边缘服务器可完全满足通感一体化的算力需求。

## 4 结束语

作为5G-A关键技术之一, 通感一体化是当前业界的研究热点, 通感一体化的应用场景遍及各个领域。通感一体化面临前所未有的挑战, 必须解决好关键问题, 才能引领5G-A通感技术快速落地直至商用。本文从不同维度探讨了通感一体化的关键技术, 参考了业界技术方案, 并提出了可选的解决方案供探讨。随着通感一体化逐渐被关注, 越来越多的厂商投入到5G-A、6G通感一体化的研究当中, 通感一体化的前景值得期待。

### 参考文献:

- [1] 段向阳, 杨立, 夏树强, 等. 通感算智一体化技术发展模式[J]. 电信科学, 2022, 38(3): 37-48.
- [2] IMT-2030(6G)推进组. 通信感知一体化技术研究报告[R]. 北京: IMT-2030(6G)推进组, 2021.
- [3] 中国通信学会. 通感算一体化网络前沿报告[R]. 北京: 中国通信学会, 2021.
- [4] LIU F, CUI Y H, MASOUIROS C, et al. Integrated sensing and communications: towards dual-functional wireless networks for 6G and beyond [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(6): 1728-1767.
- [5] 刘家祥, 蒋峥, 孙震强, 等. 6G通感一体化组网融合技术[J]. 移动

通信, 2022, 46(5): 56-61.

- [6] TAN D K P, HE J, LI Y C, et al. Integrated sensing and communication in 6G: motivations, use cases, requirements, challenges and future directions [C]//2021 1st IEEE International Online Symposium on Joint Communications & Sensing (JC&S). Dresden: IEEE, 2021: 1-6.
- [7] 刘凡, 袁伟杰, 原进宏, 等. 雷达通信频谱共享及一体化: 综述与展望[J]. 雷达学报, 2021, 10(3): 467-484.
- [8] 韩志强, 杨立, 夏树强. 多模式多频段协作感知应用探究和实践[J]. 无线电通信技术, 2022, 48(3): 499-505.
- [9] 裴郁杉, 唐雄燕, 黄蓉, 等. 通信感知计算融合在工业互联网中的愿景与关键技术[J]. 邮电设计技术, 2022(3): 14-18.
- [10] NI Z T, ZHANG J A, HUANG X J, et al. Uplink sensing in perceptive mobile networks with asynchronous transceivers [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2021, 69: 1287-1300.
- [11] 姜大洁, 姚健, 李健之, 等. 通信感知一体化关键技术与挑战[J]. 移动通信, 2022, 46(5): 69-77.
- [12] XIAO Z Q, ZENG Y. Waveform design and performance analysis for full-duplex integrated sensing and communication [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(6): 1823-1837.
- [13] KIM J H, YOUNIS M, MOREIRA A, et al. A novel OFDM chirp waveform scheme for use of multiple transmitters in SAR [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(3): 568-572.
- [14] BHARADIA D, MCMILIN E, KATTI S. Full duplex radios [C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM-SIGCOMM '13-Full duplex radios. Hong Kong: ACM, 2013: 375-386.
- [15] 陈国强. 全双工通信中的射频自干扰消除技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [16] CHOI J Y, HUR M S, SUH Y W, et al. Interference cancellation techniques for digital on-channel repeaters in T-DMB system [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2011, 57(1): 46-56.
- [17] BARNETO C B, RIIHONEN T, TURUNEN M, et al. Full-Duplex OFDM radar with LTE and 5G NR waveforms: challenges, solutions, and measurements [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(10): 4042-4054.
- [18] 高飞, 王文剑, 刘建国, 等. 通感一体化融合的研究及其挑战[J]. 移动通信, 2022, 46(5): 45-51.
- [19] 杨艳, 张忠皓, 李福昌. 通感一体化融合架构及关键技术[J]. 移动通信, 2022, 46(5): 52-55.

### 作者简介:

陈大伟, 毕业于哈尔滨工业大学, 硕士, 主要从事5G高精度定位、信号检测、通感一体化技术研究工作; 向际鹰, 主要从事无线3G、4G、5G、B5G和6G相关研发工作; 陈诗军, 毕业于哈尔滨工程大学, 高级工程师, 硕士, 主要的研究方向为5G定位、通感一体化等; 夏树强, 毕业于南京理工大学, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为载波聚合、低时延高可靠、通信感知一体化等; 崔亦军, 主要研究方向为5G/6G无线产品架构、超宽带基站、Massive MIMO、智能电磁表面等。