

通信感知一体化技术思考



Reflections on Integrated Sensing and Communication Technology

潘成康/PAN Chengkang

(中国移动研究院, 中国 北京 100053)
(China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202205010

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20221013.1629.016.html>

网络出版日期: 2022-10-14

收稿日期: 2022-08-25

摘要: 通信感知一体化具有丰富的技术内涵和应用场景, 已成为当前6G研究热点。分析了通信与雷达技术特征的异同, 并从网络感知角度探讨了通感一体化面临的理论、技术与工程挑战。给出了语义视角下的一体化研究建议, 以及未来网络部署运营在频谱、产品形态和感知专网等方面的建议。认为在5G增强版和6G系统中开展通感一体化标准化工作, 必将推动通信产业与雷达产业的融合发展。

关键词: 6G; 通信感知一体化; 感知专网

Abstract: The integrated sensing and communication (ISAC) has rich technical connotations and application scenarios, becoming a hot research topic in 6G. The similarities and differences between the technical characteristics of communication and radar are analyzed. The theory, technology, and engineering challenges of the ISAC from the perspective of network sensing function are discussed. The research suggestions on the joint design of ISAC and semantic communications are proposed, as well as the suggestions for future network deployment and operation in terms of spectrum, product form, and private sensing network. It is believed that the standardization of ISAC in the 5G enhanced version and 6G system will certainly promote the integrated development of communication industry and radar industry.

Keywords: 6G; ISAC; private sensing network

1 通信感知一体化技术背景

感知与通信分别是信息处理的前端与中间环节, 负责信息采集与信息传递, 支撑后端的信息计算与应用。在传统信息处理流程中, 感知与通信相对独立。蜂窝物联网、雷达互联网^[1]、无线传感网等技术产业的发展, 都延续了这种架构。这些网络不具备面向目标的感知功能, 感知功能由终端负责。

雷达是典型的无线感知终端, 具有目标检测、定位、跟踪、识别和成像等功能, 长期与通信独立发展。20世纪60年代, 一种通过雷达脉冲间隔调制通信消息的雷达通信系统诞生, 成为通信感知一体化技术(以下简称通感一体化)的源头^[2]。20世纪90年代后, 通信体制开始向正交频分复用调制(OFDM)和多输入多输出(MIMO)发展。其中, OFDM成为通信主流波形。随后, MIMO技术也被引入雷达体制中, 但在连续波体制雷达中, 主流波形仍是Chirp信号。这个阶段, 通感一体化的重点是以雷达为中心, 通过基于Chirp信号的信息调制实现通信功能^[3]。

在5G时代, 5G新空口(NR)引入定位参考信号, 实现了基站与终端的协同定位功能。此时, 通感一体化开始以通信为中心, 并进入网络感知阶段。随着超大规模天线通信与雷达、毫米波通信与雷达技术的发展, 通信与感知两者技术

特征、信道特征、应用场景越发相似, 呈现体制化融合发展态势^[4]。同时, 智能化、沉浸式、数字孪生等新兴业务的发展, 极大提升了对目标的高精度探测、定位、识别、成像与大带宽、低时延信息传递等信息处理需求。因此, 在蜂窝网络中, 引入更强大的超越定位功能的感知能力, 成为当前5G增强与6G预研的核心目标之一。太赫兹/可见光通感一体化开始受到关注。

以网络感知为中心的通感一体化相关工作在中国通信标准化协会(CCSA)协会、IMT-2030(6G)推进组陆续展开。当前, 人们对通感一体化技术的概念与内涵已达成初步共识, 通感一体化技术体系正在逐步完善^[5]。外场测试工作正在进行中, 包括定位、识别与成像。初步测试结果证明了通感一体化的可行性与性能增益。

2 通感一体化技术特征

2.1 无线通信与无线感知技术分析

无线感知是以无线电为媒介进行信息采集的行为。感知发送机发送无线信号, 感知接收机接收目标反射的信号。系统通过信号处理算法提取信号中与目标特征相关的参数, 从而获知目标状态。目标状态空间取决于上层任务的定义, 可

以是静的位置状态、运动状态、形状属性等空间，也可以是这些空间的组合。空间大小（可量化的最小状态变量集）由感知系统的能力（工作范围与精度）决定。

为了估计目标状态空间中的未知参数，通常系统需要发送一个包含若干确定参数（如信号幅值、频率、相位等）的无线信号 $x(A(t), f(t), \varphi(t))$ 。该信号到达目标后，被目标自然调控（也可人工调控）形成反射信号。接收端接收到的反射信号 $y(t)$ 可表示为：

$$y(t) = \alpha(\Delta A(t), \Delta f(t), \Delta \varphi(t))x(A(t), f(t), \varphi(t)) + n(t), t \in [0, T], \quad (1)$$

其中， $x(A(t), f(t), \varphi(t))$ 对于接收端已知， $\alpha(t)$ 是信号经目标反射后的响应函数， T 是信号周期。感知算法被用来求解未知变量 $\alpha(t)$ 中幅值、频率和相位相对于 $x(A(t), f(t), \varphi(t))$ 的变化值。

无线通信是以无线电为媒介进行信息传递的行为。通信发送机发送无线信号，接收机接收经信道衰变的信号。系统通过信号处理算法检测信号中的调制参数获得源端编码信息。同样，这里可调控的参量有相位、幅度、频率等。参量的变化由编码信息调控，用来表征信息。参量状态空间由调制方式决定。通信接收端接收到的信号同样可由公式（1）表示。与感知检测相反， $\alpha(t)$ 对于接收端已知（例如当采用信道估计时，信道估计其实就是上述无线感知过程），而 $x(A(t), f(t), \varphi(t))$ 是不确定的。检测算法（即解调算法）可从调制状态空间中求解 $x(t)$ 中的参量值。

由以上分析可知，无线感知与无线通信本质上都是信号参数估计。但前者的目标状态空间远大于后者的调制状态空间。因此，前者通常需要多符号累积检测，后者仅需要单符号检测即可。前者大带宽用来提升精度，后者大带宽用来提升速率。

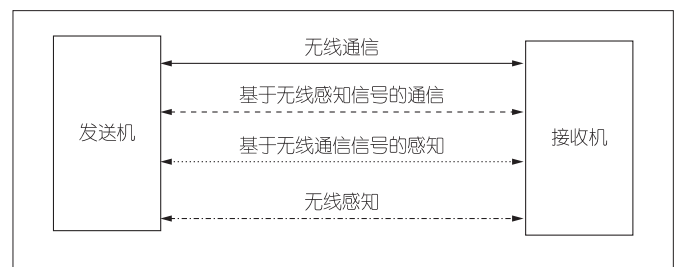
2.2 通感一体化思路

本节重点从无线信号格式角度讨论一体化设计。通感一体化信号包括无线通信信号、无线感知信号、通感一体化信号3种。由2.1节可知，当无线感知接收端已知部分无线通信信号参数，并可以基于通信信号实现部分感知功能时，接收端可直接复用通信信号，不对通信信号做特别修改，仅需增加接收检测算法设计。这就是基于无线通信信号的感知，例如基于WiFi信号和蜂窝信号的目标检测、天气状态检测等。由于通信信号的非平稳特性，感知性能会受限。

当通信接收端已知无线感知信号参数时，系统亦可借助

感知信号实现通信功能，这被称为基于无线感知信号的通信。它的基本原理是由信源端对感知信号进行人工调控，使 $\alpha(t)$ 携带通信信息。人工调控感知信号方式包括超表面编码、动作编码、几何形状编码等，从而将无线感知的能力复用为通信能力。

一体化信号是指通信信号与感知信号以正交或非正交方式复用在同一频段，从而同时具有感知与通信功能。这是当前网络通感一体化技术的研究重点。这里，一体化信号由通感一体化发送机发送，但通信接收机与感知接收机可以根据业务场景进行分离设置。



▲图1 无线信号的4种功能类型

3 通感一体化技术的关键挑战

通感一体化在技术方案与原型设计等方面不断取得突破，但在基础理论、低复杂度方案与工程设计上仍面临挑战。

3.1 理论挑战

(1) 一体化性能增益边界。通感一体化最初的目标是提升频谱利用效率和硬件效率。对于基于感知信号的通信和基于通信信号的感知来说，这两类效率增益不证自明。但一体化信号目前还存在两大理论挑战：一是统一的一体化性能指标，二是一体化性能指标下的性能边界。研究一体化性能边界问题的一个目的是分析通信与感知性能之间的折中关系。这是因为在一体化信号设计中，通信与感知存在资源竞争关系。折中关系分析可以帮助我们在非正交复用信号和正交复用信号两种方案中做出合理的选择。

通信效率可以由频谱效率（ $\text{bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ）或能效（ bit/J ）表征，但目前感知效率还没有统一定义。感知通常以分辨率和精度为性能度量单位，还没有与通信容量类似的感知容量定义。有部分学者提出了针对特定感知任务的容量定义，但不具备扩展性与普适性。

(2) 空间自由度。MIMO通信的空间自由度来源于多径信道，但多径信道对雷达感知来说，更多是杂波干扰。感知

的空间自由度来源于多个视线 (LoS) 分量, 可以通过实孔径或合成孔径获得, 但对 MIMO 通信来说, 难以提供自由度。因此, 一体化设备面临着空间自由度的两难问题。

3.2 技术挑战

(1) 一体化波形设计。不少学者提出了诸多解决方案, 例如融合 Chirp 信号的 OFDM 波形, 但具有回退功能的可工程化、可标准化的一体化波形还需要进一步攻关。

(2) 组网。传统雷达无组网功能, 没有协同机制, 相互之间的干扰全靠设备自身的抗干扰能力抑制。在进行网络通感一体化组网时, 我们可以考虑异频组网。然而, 同频组网还需要建立基站间的抗干扰协调机制。由于雷达的波束成形、波束跟踪和波束预测机制与大规模 MIMO 通信系统具有相似性, 因此协同波束成形和波束跟踪将是同时解决站内与站间干扰问题的首选方案。

3.3 工程设计挑战

传统移动通信设备是专用设备, 目前正在向通用开放设备形态发展。例如, 以雷达为代表的感知设备一直是专用设备。通信设备与感知设备对相关器件参数与性能要求不一致。通常情况下, 感知功能对设备和器件的参数与性能要求更为苛刻。这给通用化通信设备带来五大挑战: 一是器件精度, 尤其是模数转换 (ADC) / 模数转换 (DAC) 的量化精度、锁相环精度、时钟精度, 要对标感知性能; 二是信号处理时延抖动、高稳定的器件带来的成本挑战; 三是快速傅里叶变换 (FFT) 点数与采样量化比特数存在感知精度与复杂度折中挑战; 四是接收机灵敏度挑战; 五是天线隔离度挑战, 这是因为当通感一体化发送机与感知接收机同位置部署时, 需要采用隔离方式减少通信感知间的干扰。

在进行实际工程设计时, 需要全面评估系统误差因素与非系统误差因素带来的影响。通过建立误差分析模型, 我们一方面开展给定通用通信设备架构下的感知精度边界评估, 确定方案适用场景; 另一方面开展给定感知精度指标下的设备器件参数与性能指标评估, 做好器件选型。

4 未来研究与建议

4.1 语义视角下的通感一体化

通感一体化的优势不仅在于可以提升频谱利用效率和硬件效率, 还在于可以提升信息处理效率。未来移动网络服务将以任务为中心。一个任务生命周期包含多轮感知、通信、计算与应用的迭代循环, 直到系统从初始状态达到目标状态

为止。此时, 通感一体化设计目标将是通过融合感知与通信环节, 有效降低任务整体信息处理量与处理时延。面向任务的感知信息通常是目标的特征信息, 我们可以称其为相对任务的语义信息。

语义通信是为了降低传输带宽需求而得到广泛关注的 6G 候选技术, 它将信源编码从符号编码升级为语义编码, 将信源语义理解的任务从接收端前置到了发送端, 从而可以降低带宽。这里, 语义是一种对信源信息表征的新方式, 是完成任务所需的最低信息量。目前语义通信的研究重点是从感知到的原始信源信息中提取语义特征, 然后编码传输。从这个角度来说, 既然不需要传输原始信息的非语义部分, 也就没有必要感知非语义的原始信息。而无线感知的本义恰恰就是对目标做语义信息的感知。可以预想, 在未来窄带视频语义通信中, 像素概念可能消失在发送端, 代替它的将是感知语义。例如, 在人脸通话场景中, 基于毫米波或太赫兹一体化信号设计的近距离感知方案, 可直接提取人脸表情、动作等语义特征并编码传输, 在接收端通过机器学习模型恢复人脸画像 (当然, 接收端需要具备人脸先验信息)。在自动驾驶、无人机编队、智能交互场景中, 通感一体化同样可以与语义通信相融合, 以提升面向任务的信息处理效率。

4.2 运营策略部署

(1) 关于频谱。通信频谱资源在业务量持续增长的态势下一直呈稀缺状态。在未来产业推进中, 我们应重点考虑 3 点: 一是积极部署基于无线通信信号的感知技术, 不竞争通信频谱资源。二是积极引入额外的感知频谱资源, 例如将 24 GHz 补充到 26 GHz, 与 77 GHz 通信雷达频谱合并, 然后进行一体化信号设计, 而不是仅在通信频谱资源上叠加感知功能。当然, 如果一体化设备具备完全的回退能力, 就可以考虑在低业务量时, 在通信频谱资源上生成感知功能。三是容许移动终端在不干扰基站感知功能的前提下, 共享无线感知频谱进行本地感知。在终端较为密集的小区, 终端采用与基站相同频谱进行感知可能带来负面影响。

(2) 技术选型。虽然通感一体化信号仅有如 2.2 节介绍的 3 种形式, 但是根据感知收发机位置与数量的不同, 技术类型是多种的。从网络运营感知服务角度看, 基站配置通感一体化发送机, 并根据感知业务场景需求。在本站、他站或终端配置接收机, 是一种较为理想的技术路径。然而, 在他站和终端配置接收机, 对收发双方的时钟、频率与载波同步要求给系统设计带来挑战。

(3) 产品形态。规模化网络部署要求通感一体化设备应该具有通用性和高效性。理想情况下, 在不需要感知功能的

时候,感知资源(如硬件资源和频谱资源)可以完全释放给通信,反之亦然。这就要求产品形态具备完全的功能回退能力——除了用于部署感知专网的设备。

(4)感知专网。像无缝覆盖的通信网那样部署无缝覆盖的感知网络可能不太现实,况且目前也没有明确的场景需求。因此,在未来商用化过程中,我们可以分阶段、分区域、分场景建设感知专网,例如针对空管区域、交通要道、园区出入口、车间等场景,可建设具有最低通信功能的感知专网。

(5)感知功能管理实体。感知将是6G的内生功能与业务能力,因此需要在核心网定义感知功能管理实体单元、不同感知业务的服务质量(QoS)和面向语义的体验质量(QoE),以接收感知业务请求,按照检测、定位、跟踪、识别、成像等不同感知业务类型,进行业务感知、功能编排感知和资源调度感知。相关功能、接口与流程的标准化将是下一步工作重点。

5 结束语

无论是为了提升频谱利用效率、硬件效率还是信息处理效率,通感一体化都是必然趋势。考虑到日益增长的信息处理需求,一方面可以在现有通信频谱中引入感知功能,同时还要积极引入额外感知频谱,与通信频谱进行一体化设计;另一方面应重点设计具有完全功能回退的通用一体化设备,并进行规模部署,制定专用感知方案,实现垂直行业应用。

我们相信,在5G增强版和后续6G系统中开展通感一体化标准化工作,必将推动通信产业与雷达产业的融合发展,实现信息产业和关联行业的升级。

参考文献

- [1] AKAN O B, ARIK M. Internet of radars: sensing versus sending with joint radar-communications [J]. IEEE communications magazine, 2020, 58(9): 13-19. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900550
- [2] MEALEY R M. A method for calculating error probabilities in a radar communication system [J]. IEEE transactions on space electronics and telemetry, 1963, 9(2): 37-42. DOI: 10.1109/TSET.1963.4337601
- [3] ROBERTON M, BROWN E R. Integrated radar and communications based on chirped spread-spectrum techniques [C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. IEEE, 2003: 611-614. DOI: 10.1109/MWSYM.2003.1211013
- [4] LIU F, CUI Y H, MASOUIROS C, et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(6): 1728-1767. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3156632
- [5] IMT-2030(6G)推进组. 通信感知一体化技术研究报告[R]. 2021

作者简介



潘成康, 中国移动研究院技术经理; 主要从事5G应用技术、6G感知通信计算一体化和6G通信量子加速研究工作; 发表论文30余篇, 拥有专利20余项。