6G通信感知一体化系统的 性能指标



Performance Metric for 6G Integrated Sensing and Communication System

江甲沫/JIANG Jiamo,韩凯峰/HAN Kaifeng,徐晓燕/XU Xiaoyan

(中国信息通信研究院,中国 北京 100191) (China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China) DOI: 10.12142/ZTETJ.202205008

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20221013.1453.010.html

网络出版日期: 2022-10-13 收稿日期: 2022-08-29

摘要:面向6G通信感知一体化(ISAC)系统,从业务共存、能力互助、网络共惠3个阶段研究了技术演进趋势,明确给出各阶段的系统设计目标和性能指标需求。从通信性能、感知性能、资源分配和应用场景等维度,提出影响6G ISAC系统性能的四维边界因素。基于提出的通感效率和通感效用两个新的性能指标,仿真评估了典型场景下的通信感知一体化系统性能,为后续进一步开展6G ISAC的系统设计和评估验证工作提供了重要参考。

关键词: ISAC;性能指标; 效率; 效用

Abstract: The development of 6G integrated sensing and communication (ISAC) systems is studied from three stages: traffic coexistence, capability cooperation, and network mutualism. The target of system design and requirement of performance metrics are proposed. The influence factors called four-dimension boundary factors of ISAC are presented in the four aspects: communication performance, sensing performance, resource allocation, and application scenario. Based on two new performance metrics called ISAC efficiency and utility, the performance of ISAC is simulated in typical scenarios. Some key suggestions for system design and evaluation are proposed for the evolution of 6G ISAC.

Keywords: ISAC; performance metric; efficiency; utility

来6G将向毫米波、太赫兹等更高频段发展,与感知频 段逐步交叠,孕育并催生通信感知一体化技术,以赋 予6G 网络随时随地感知物理世界的能力[1]。作为新一代智能 化综合数字信息基础设施,6G将与先进计算、大数据、人工 智能等信息技术交叉融合,实现通信与感知、计算、控制的 深度融合,逐步具备泛在互联、普惠智能、多维感知、全域 覆盖、绿色低碳、内生安全等典型特征[2]。在6G的典型场景 和业务中,通信感知融合将成为具有代表性的新增场景和新型业务。6G通信感知一体化技术将利用无线通信信号,实现 对目标的检测、定位、识别、成像等感知功能,进而获取和重构周围的环境信息,推动6G 网络进入物理世界和数字世界融合的数字孪生时代。国际电信联盟(ITU)面向 2030 的未来技术趋势研究报告指出,通信感知一体化技术将成为新一代移动通信系统最有潜力的关键技术方向之一[3]。

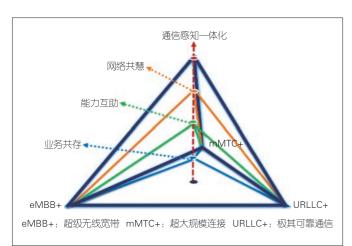
对于6G通信感知一体化系统的性能指标设计,业界进行了多种探索。一方面,在通信感知一体化系统的通信和感知功能并存场景下,在保证通信或者感知功能性能需求

的同时,对另一部分功能的性能进行优化。文献[4]提出了 在保证用户需求的信干噪比的情况下,最小化通信感知一 体化系统的克拉美罗界(CRB),进而提升通信感知一体化 系统的感知性能。另一方面,考虑是否有新的性能指标定 义形式,综合表征通信感知两种功能的联合性能。例如, 部分学者基于感知互信息与时间的比值提出"估计速率" 的概念[5]。文献[6]研究了基于频率资源复用的通信天线和 感知天线的位置排列问题,提出了以最大化互信息 (MI) 作为优化目标的思路。文献[7]提出了将传统通信指标和感 知指标以加权的方式作为通感一体化的联合指标的方法, 并设计了"加权频谱效率"的新指标。该指标由通信容量 和估计速率加权构成。文献[8]则以误码率和CRB加权作为 新指标,研究了以最小化该指标为目标的波形设计方案。 在组网技术方面,部分学者提出了"移动感知网络"组网 概念[9], 探讨了通信感知一体化系统在网络层面的性能指 标。但总体来说,对于6G通信感知一体化性能指标的研 究, 业界尚未形成共识。

目前,面向6G通感一体化的研究还存在融合演进路径不清、联合性能刻画维度模型难以建立、关键性能指标缺失等问题。为此,我们在第1章中,基于通信与感知能力协同水平,研究了"业务共存、能力互助、网络共惠"通感一体化融合演进路径,以明确各演进阶段系统设计目标和性能指标需求;在第2章中,依据效率、可靠性、网络化等指标类型,对通信和感知性能指标进行梳理和分类,并基于"通信性能、感知性能、资源分配、应用场景"等4个维度,提出刻画通感一体化业务共存阶段的性能边界体系架构,为通感性能极限等理论研究提供分析框架;在第3章中,创新地提出"通感效率"指标和"通感效用"指标,分别刻画单位感知精度下的可达通信容量以及最优通信和感知性能的可实现程度,并针对典型通感业务进行仿真验证,为开展6G通感评估与测试工作提供重要参考;最后在第4章中对全文进行总结,并提出下一步的研究方向。

1 通感性能指标的需求

在6G通信感知一体化的技术发展过程中,通信与感知将分阶段、分层次融合演进,其技术趋势主要包括业务共存、能力互助、网络共惠3个阶段(图1所示)。基于以上3个阶段的发展,最终6G的内生感知能力将得以实现。在通信感知一体化技术发展的不同阶段,面对不同的技术关注点和业务需求,系统性能也有不同的优化方向。因此,我们应考虑不同的通信感知一体化系统的性能指标。



▲图1 6G通信感知一体化技术演进阶段

1.1 业务共存阶段

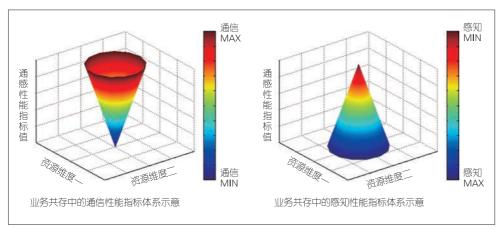
在业务共存阶段,系统的优化设计往往以通信或感知的 单方面性能指标为主要考虑点,即当通信与感知二者之间存 在资源分配和干扰协调等需求时,在满足系统基本需求的前 提下单方面优化通信或感知的性能。通信系统和感知系统设计的主要原则是尽可能避免相互之间的影响,尚不需要考虑相互辅助。此时通信感知一体化的性能指标体系如图 2 所示。在业务共存的极端情况中,即当通信和感知中只有一种业务存在时,可完全不需要考虑对另一种业务的影响,只需要在系统设计的限制条件下全力优化当前工作的系统性能;但是当通信与感知业务同时存在时,则需要统筹优化二者的性能,并减少彼此的干扰等影响。此时引入新的性能指标体系来呈现通信与感知性能之间的这种关系,将为解决此阶段6G 通信感知一体化系统设计的资源分配问题提供有益参考。

1.2 能力互助阶段

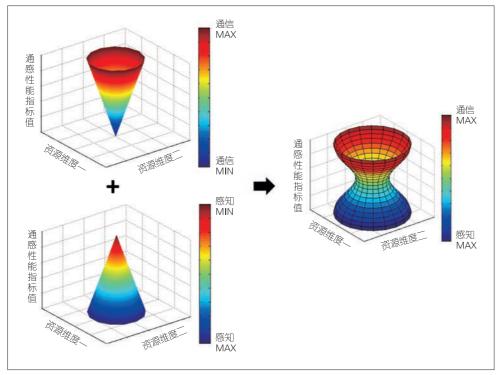
通信感知一体化技术不断演进,进入一体化程度更高的能力互助阶段。通信与感知系统同时工作,其中的一方会为另一方提供辅助以增强性能。辅助另一方的前提是需要满足自身的基础性能需求,如图3所示。一方面,感知功能辅助增强通信功能,保证最低感知性能需求,使得通信系统的性能可以超过业务共存阶段的性能;另一方面,通信功能保证最低通信性能需求,辅助增强感知功能,使得感知系统的性能可以超过业务共存阶段的性能。虽然此时仍可以使用独立通信或感知性能指标来评价系统性能,但是因为互助能力有潜力使通信和感知功能在一定程度上突破资源限制,所以在能力互助阶段也存在引入新的性能指标的需求。在能力互助的过程中引入新的性能指标,有助于分析通信和感知功能的资源利用率,从而提升整个通信感知一体化系统的性能。

1.3 网络共惠阶段

在网络共惠阶段,6G通信感知一体化的系统设计目标不再是单独关注通信性能提升或者感知性能提升,而是关注通信感知的整体性能联合提升,即感知既能够辅助通信,通信也能够辅助感知,二者相辅相成。此时,通信与感知功能紧密结合。通信和感知单一的性能指标无法评价整个系统的性能,因此需要引入新的性能指标来综合表征系统的"效用",如图4所示。基于这种新的6G通信感知一体化系统的性能指标,当系统效用达到最大时,通信系统性能并不一定是最优的,感知系统性能也不一定是最优的。网络共惠阶段的系统整体性能优化挑战,不再是单目标优化,而是多目标联合优化。一方面,在网络共惠阶段,通信与感知系统的性能存在折中关系,可以通过新的性能指标来表征;另一方面,新的性能指标的引入可以更加全面地表征通信辅助感知和感知辅助通信,有助于打破独立优



▲图2 业务共存阶段的性能指标示意图



▲图3 能力互助阶段的性能指标示意图

化时的多维资源限制。

2 通感性能指标的边界因素

2.1 性能指标的分类

目前,人们对通信性能指标的分类和研究已相对完备。 在6G通信感知一体化系统中,与通信功能相关的主要性能 指标包括效率指标、可靠性指标、网络化指标。

(1) 通信效率指标:主要衡量在单位可用资源下(如时域、频域、空域、码域、能量域)的通信可达能力,包括峰值速率/体验速率、频谱效率、能量效率等。

- (2)通信可靠性指标:主要 衡量通信系统对抗不良通信环境 (如衰落、干扰、噪声等)的能 力,包括误比特率、误码率、中 断概率、空口时延/抖动等。
- (3) 通信网络化指标:主要 衡量通信网络的系统级性能,包 括连接密度、网络总容量/速率、 网络覆盖范围/覆盖率等。

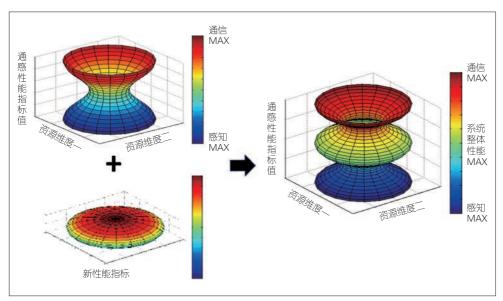
在 6G 通信感知一体化系统中,除了需要探究通信性能外,还需要同时考虑感知性能。6G 通信感知一体化系统的感知性能指标不局限于传统雷达理论的性能指标。因此,参照通信性能指标分类的维度,感知性能指标也可从效率指标、可靠性指标、网络化指标3个维度进行分类。

- (1) 感知可靠性指标:主要 衡量感知能力的理论上限及可达 性能。根据感知业务内容,感知 可靠性指标可进一步分为:检测 可靠性指标,包括检测概率、虚 警概率等;估计可靠性指标,包 括估计均方误差(或用费雪信息 或克拉美罗界进行衡量)、模糊函 数等;识别可靠性指标,包括分 辨率、识别准确率等。
- (2) 感知效率指标:主要衡量在单位可用资源下(如时域、频域、空域、码域、能量域)的

感知可达能力。

(3) 感知网络化指标:主要衡量组网后的感知网络能力水平,包括感知范围、可感知目标数目、网络平均感知能力、对移动目标的感知能力、网络协作能力等。

当前业界绝大部分与感知性能分析相关的研究成果,主要是从感知可靠性指标的角度开展的。原因在于传统感知系统(例如雷达系统)的核心任务是实现精确的检测估计性能,同时拥有丰富的频率、功率、硬件条件(例如天线阵列)等可用资源,且无须考虑组网等网络化能力。然而,6G通信感知一体化系统需要利用同一个无线网络来同时实现通信和感知,因此需考虑资源受限和组网协作等问题。这



▲图 4 网络共惠阶段的性能指标示意图

意味着人们需要利用新的性能指标来定义6G通信感知一体化系统。

2.2 性能指标的四维边界因素

在6G通信感知一体化系统中,系统将在同一硬件平台中同时提供通信和感知的服务能力。为了更好地分析和研究6G通信感知一体化系统的性能,我们需要充分考虑通信与感知能力的性能权衡即性能指标的边界因素,并且需要针对不同感知业务场景开展具体分析。

本文综合考虑6G通信感知一体化系统性能指标的影响 因素,从通信性能、感知性能、资源分配、应用场景等4个 维度,分析6G通信感知一体化系统性能指标的边界因素,即"四维边界因素",如图5所示。具体包括:

- (1)根据可用资源刻画最优性能边界及可达性能域。资源分配维度主要包括时域、频域、空域、码域、能量域等可用资源维度。在给定资源条件下,根据资源分配策略来权衡通信与感知性能,并由此刻画出在该资源条件下的最优性能边界及可达性能域。
- (2) 针对不同的应用场景选择适配的性能指标组合。感知性能指标与感知业务场景强相关,因此需要根据不同的通感应用场景,灵活选择适宜的通信和感知性能指标组合。
- (3) 在给定有限可用资源的情况下,需要着重研究并定义"通感效率/效用"指标。在考虑不同通感技术方案的横向优劣对比时,建议在给定可用资源的情况下,比较可达感知和通信的性能,即比较不同技术方案的"通感效率/效用"指标。

3 通感性能指标的新角度

3.1 新性能指标的定义

本节首先给出通感效率和通 感效用两个关于6G通信感知一体 化的性能指标新定义。

(1) 通感效率指标

该指标旨在刻画在单位感知 误差下的最大可达信道容量,其 定义为信道容量和参数估计误差 的比值,具体可表示为:

$$E_{\rm ISAC}^{\gamma} = \frac{C^{\gamma}}{\kappa + {\rm CRB}^{\gamma}},$$
 (1)

其中, C^{γ} 表示在信噪比为 γ 时的信道容量, CRB^{γ} 表示在信噪比为

 γ 时的参数估计(测距、测速和测角等)克拉美罗界(即最小均方误差), κ 为一个预置常数以限制 $E_{\kappa \alpha r}^{\kappa}$ 的最大值。

根据通感效率的定义可知,当信道容量提升或感知估计误差下降时, E'_{ISAC} 会增大;而当信道容量下降或感知误差提升时, E'_{ISAC} 的取值会变小。综上, E'_{ISAC} 能够表征通感一体化的联合效率性能,并且 E'_{ISAC} 越大,系统的通感效率就越高。

(2) 通感效用指标

该指标旨在刻画系统对于可用资源在给定资源分配方案 下的利用程度,其包含信道容量可达度和感知精度可达度两项,具体的定义式可表示为:

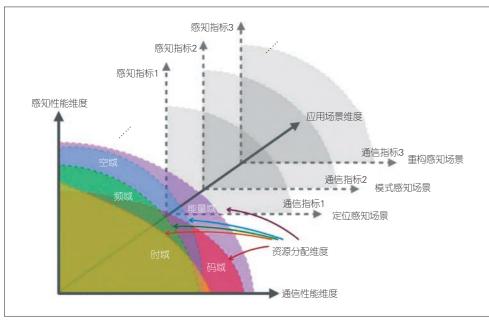
$$U_{\rm ISAC}^{\gamma} = \eta \frac{C^{\gamma}}{C_{\rm max}^{\gamma}} + (1 - \eta) \frac{{\rm CRB_{\rm min}^{\gamma}}}{{\rm CRB}^{\gamma}}, \tag{2}$$

其中, C_{\max}^{γ} 表示可用资源均用于通信业务时的最大可达容量, CRB_{\min}^{γ} 表示可用资源均用于感知业务时的最小可达估计误差, $\eta \in [0,1]$ 表示加权因子并用于权衡通信和感知业务的比重。

根据通感效用的定义可知,当通信业务占用更多资源时,信道容量可达度得到提升但是感知精度可达度会下降;当感知业务占用更多资源时,感知精度可达度会提升但是信道容量可达度会下降。综上, U'_{isac} 可表征系统对于通信和感知的最大可用性能的利用率,并且 U'_{isac} 越大,系统的通感利用率(即效用)就越高。

3.2 新性能指标的分析与评估

基于笔者团队最新研究成果^[10],针对导频资源对上述两个新评估指标进行理论推导,本文考虑基于导频资源复用实现通感一体化的场景,即导频资源既用于信道估计又用于目



▲图5 6G通信感知一体化系统性能指标的四维边界因素

标物的感知探测。特别地,基于导频信道估计的单个时隙的 遍历容量的表达式为:

$$C^{\gamma}(L_{p}) = \frac{B(L - L_{p})}{\left[1 - \frac{1}{(1 + \sigma_{1}^{2}\gamma_{p}L_{p})}\right]\ln 2} \left[e^{\frac{1 + \gamma_{p}L_{p}}{\gamma_{d}}}\operatorname{Ei}\left(-\frac{1 + \gamma_{p}L_{p}}{\gamma_{d}}\right) - e^{\frac{1}{\gamma_{d}\sigma_{1}^{2}}}\operatorname{Ei}\left(-\frac{1}{\gamma_{d}\sigma_{1}^{2}}\right)\right],$$
(3)

其中,B表示带宽,L表示一个时隙内的符号总数, L_p 表示导频的符号数, σ_1^2 表示通信信道的方差, γ_p 和 γ_d 分别为导频符号和数据符号的信噪比, $Ei(\cdot)$ 表示指数积分函数。

基于导频信号的测距和测速的遍历 CRB 的表达式分别为:

$$CRB_{d}^{\gamma} = \frac{c^{2} \exp\left(-A_{\surd}/\left(2\sigma_{2}^{2}\right)\right)_{1} F_{1}\left[1/2; 1; A_{\surd}/\left(2\sigma_{2}^{2}\right)\right]}{8\sqrt{2\sigma_{2}^{2}} \pi^{3/2} \gamma_{p} s_{\text{res}} B_{\text{rms}}^{2}} \cdot \frac{1}{L_{p}},$$
(4)

$$CRB_{v}^{\gamma} = \frac{6\lambda^{2} \exp\left(-A_{v}/(2\sigma_{2}^{2})\right) {}_{1}F_{1}\left[1/2; 1; A_{v}/(2\sigma_{2}^{2})\right]}{32\sqrt{2\sigma_{2}^{2}} \pi^{3/2}\gamma_{p}s_{res}T_{s}^{2}} \cdot \frac{1}{L_{p}(L_{p}+1)(2L_{p}+1)},$$
(5)

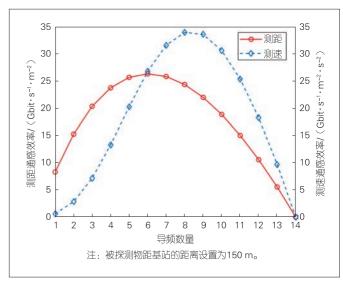
其中,c表示光速, λ 表示载波的波长, s_{res} 表示雷达横截面积, T_s 表示符号时间间隔, B_{rms} 表示均方根带宽, A_s 表示基站与被探测物体间的主径信道强度, σ_2^2 表示感知信道的方差, $_1F_1(\cdot)$ 表示合流超几何函数。

下面我们基于公式(3)、(4)和(5)分别进行关于测距和测速的通感效率指标和通感效用指标的仿真评估。具体的仿真参数设置如下:单个时隙内的符号总数为L=14,符号时间间隔为 $T_s=0.05$ ms,载波波长为 $\lambda=2$ mm,载波的带宽为B=200 MHz,被探测物的雷达横截面积为 $s_{\rm res}=100$ m²,通信信道的方差为 $\sigma_1^2=2$,感知信道的莱斯因子为 $K=A_s/\sigma_2^2=3$,均方根带宽为 $B_{\rm ms}=\sqrt{12}$ B。

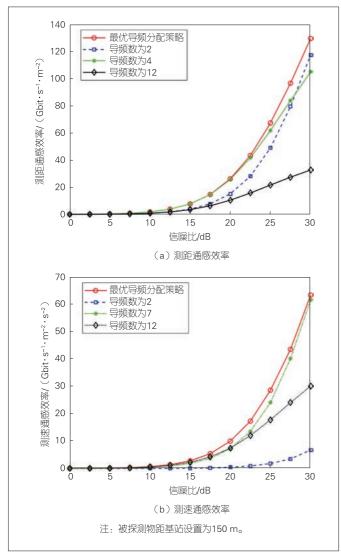
图6给出了通感效率随着导频数量的变化趋势曲线。特别地,当信噪比设置为20dB, κ设置为0.1时,如图6所示,测距和测速的通感效率均随着导频数量的增

加呈现先增大至最大值后递减的趋势。这是由于当导频数量较少时,增加导频数量可以提升感知的准确度。此时提升信道估计的精度可以增加信道容量,从而提高通感效率。然而,当导频数量足够多时,信道估计的精度和感知的准确度趋于饱和。继续增加导频数量会使得数据传输的可用资源减小,降低信道容量,进而降低通感效率。因此,我们可以通过设计并优化导频分配方案来提升通感一体化系统的通感效率。

图 7 (a) 和图 7 (b) 分别给出了测距通感效率和测速 通感效率随信噪比的变化趋势曲线。特别地,当载波波长设 置为 $\lambda = 5 \text{ mm}$ 时,如图 7 所示,相较于固定导频数的 3 种方



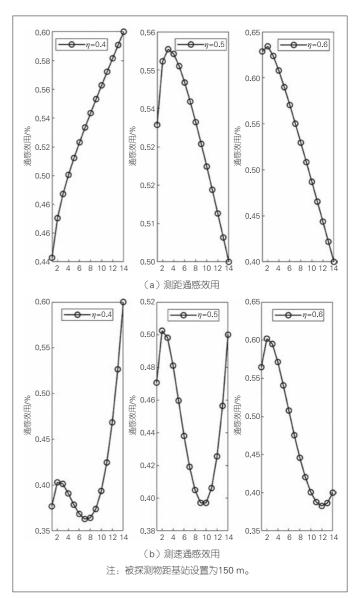
▲图6 通感效率随导频数量的关系曲线



▲图7 通感效率随信噪比的关系曲线

案,最优的导频分配方案能够始终实现通感效率的最大化。如图 7 (a) 所示的测距通感效率,当信噪比较低时,为实现通感效率的最大化,一定数量的导频资源是必要的;当信噪比较高时,随着信道估计增益和感知精度的饱和,较少导频资源开销能够提供更优的通感效率。如图 7 (b) 所示的测速通感效率,少量导频资源的分配方案在全信噪比下获得的通感效率都较低;大量导频资源的分配方案获得的通感效率会随着信噪比的增加而缓慢提升,这说明测速业务需要合适数量的导频资源以实现通信业务和感知业务间的性能平衡。此外,从图 7 (a) 和图 7 (b) 还可以看出:对于不同的感知业务,导频的最优分配方案也存在着显著的差异,因此不同业务需要定制化设计资源分配方案。

图 8 (a) 和图 8 (b) 分别给出了测距通感效用和测速 通感效用随导频数量的变化趋势曲线。如图 8 (a) 所示的



▲图8 通感效用随导频数量的关系曲线

测距通感效用曲线,当 η = 0.4时,由于更侧重于业务的感知功能,通感效用在将全部资源用作导频时取得最大值。然而此时通信业务不能正常进行,因此需要设置一个保障通信功能正常运行的阈值。当 η = 0.5时,业务的通信功能和感知功能并重,此时可以通过设计导频资源分配的优化方案使系统的通感效用达到最大。当 η = 0.6时,由于更侧重于业务的通信功能,通感效用在导频数量较少时取得最大值,为了满足感知业务的测参精度要求,也需要设置一个保障感知功能正常运行的阈值。如图 8(b)所示,测试通感效用曲线包含极大和极小两个峰值。为了避免过多的性能资源浪费,我们在进行通感一体化设计时需要规避极小值区间的可行资源分配方案。

4 结束语

通信感知一体化技术已经被广泛认为是6G通信系统中最具潜力的关键技术之一,而多维感知的业务需求也对6G通信系统的设计和通信感知一体化技术的发展提出了更高的要求。随着6G通信系统的愿景、需求、指标、关键技术、评估和验证的发展,在标准推动的过程中,性能指标的设计将成为关键要素之一。如何在不同的技术演进阶段、不同的业务场景下充分评价通信感知一体化的性能,将一直是后续相关领域技术发展的基础。

致谢

中国信息通信研究院沈霞副高级工程师、徐明枫工程师 在本研究中承担了重要工作,对他们表示感谢!同时本研究 得到了北京邮电大学赵中原副教授的帮助,在此一并感谢!

参考文献

- [1] WANG Z Q, DU Y, WEI K J, et al. Vision, application scenarios, and key technology trends for 6G mobile communications [J]. Science China information sciences, 2022, 65(5): 1–27. DOI: 10.1007/s11432-021-3351-5
- [2] IMT-2030(6G)推进组. 6G典型场景和关键能力 [R]. 2022
- [3] ITU-R WP5D. 未来技术趋势研究报告 [R]. 2022
- [4] LIU F, LIU Y F, LI A, et al. Cramér-Rao bound optimization for joint radarcommunication beamforming [J]. IEEE transactions on signal processing, 2022, 70: 240-253. DOI: 10.1109/TSP.2021.3135692
- [5] CHIRIYATH A R, PAUL B, JACYNA G M, et al. Inner bounds on performance of radar and communications co-existence [J]. IEEE transactions on signal processing, 2016, 64(2): 464–474. DOI: 10.1109/ TSP.2015.2483485
- [6] TURLAPATY A, JIN Y W. A joint design of transmit waveforms for radar and communications systems in coexistence [C]//Proceedings of 2014 IEEE Radar Conference. IEEE, 2014: 315–319. DOI: 10.1109/RADAR.2014. 6875606
- [7] CHIRIYATH A R, PAUL B, BLISS D W. Radar-communications convergence: coexistence, cooperation, and co-design [J]. IEEE transactions on cognitive communications and networking, 2017, 3(1): 1–12. DOI: 10.1109/ TCCN.2017.2666266
- [8] KUMARI P, VOROBYOV S A, HEATH R W. Adaptive virtual waveform design

- for millimeter-wave joint communication-radar [J]. IEEE transactions on signal processing, 2020, 68: 715-730. DOI: 10.1109/TSP.2019.2956689
- [9] ZHANG J A, RAHMAN M L, WU K, et al. Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks — a survey [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(1): 306–345. DOI: 10.1109/ COMST.2021.3122519
- [10] JIANG J M, XU M F, ZHAO Z Y, et al. Rethinking the performance of ISAC system: from efficiency and utility perspectives [EB/OL]. (2022–08–18) [2022–08–25]. https://arxiv.org/abs/2208.08654

作 者 简 介



江甲沫,中国信息通信研究院主任工程师、中国通信标准化协会无线通信技术工作委员会前沿无线技术工作组组长;主要研究方向为6G通信感知一体化、6G无线与人工智能融合、6G原型验证系统设计等;主持和参与多项国家级和省部级项目,获省部级科技成果奖项一等奖2项;发表论文30余篇。



韩凯峰,中国信息通信研究院副高级工程师;主要研究方向为面向6G的无线人工智能、通信感知一体化技术;主持和参与省部级研究项目4项、中国通信学会研究课题7项;发表论文30余篇。



徐晓燕,中国信息通信研究院副高级工程师;主要研究方向为面向6G的技术预研、ITU相关标准制定等。