



专题：6G 通感算融合技术

6G 通信感知融合指标仿真方法研究

陈仲华, 金凌, 孙剑平

(中国电信股份有限公司研究院, 上海 200122)

摘要: 如何针对不同的应用合理提供通信感知融合的性能, 已经成为 5G 网络演进和新的 6G 网络技术的重要研究方向之一。通过对通感融合模式和关键绩效指标 (key performance indicator, KPI) 的分析, 提出了两种不同的通感融合实现的模式, 并针对不同模式提出了通感融合仿真系统的架构, 描述了仿真系统架构实现的组成模块, 以及各部分的实现技术。同时, 结合通信频谱效率和感知分辨率等典型的通感融合关键指标, 在一定条件下实现了关联仿真, 并对仿真结果进行了分析, 给出了仿真系统实现的案例。

关键词: 6G 通信感知融合; 信源仿真; 信道仿真; 感知分辨率; 频谱效率

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022257

KPI simulation method of harmonized communication and sensing in 6G

CHEN Zhonghua, JIN Ling, SUN Jianping

Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Shanghai 200122, China

Abstract: How to reasonably provide harmonized communication and sensing for different applications has become one of the important research directions of 5G network evolution and 6G technology. Based on the analysis of different scenarios and key performance indicators (KPIs), an architecture and brief realization including the implementation of each module of the harmonized communication and sensing simulation system was put forward. Furthermore, a correlation simulation case about communication spectrum efficiency and sensing range resolution was given to show how typical indicators work during the simulation under certain conditions.

Key words: 6G harmonized communication and sensing, source simulation, channel simulation, sensing resolution ratio, spectrum efficiency

0 引言

近年来, 随着 5G 网络的逐渐普及, 5G 除了提供更高的通信速率以外, 在行业应用领域中承

担了越来越重要的角色, 如工业互联网、扩展现实 (extended reality, XR) 通信、无人机、车联网等场景。在实际应用中, 5G 技术没有专题对通信感知融合场景进行研究, 在一些实现中难以满



足应用的需求,例如,5G 的感知仅限于定位,而实际应用中除了定位需求,更存在一些对物体运动状态(位置、速度等)的感知要求。此外,通常 5G 只具备二维场景的感知能力,难以实现对现实环境的三维感知,在感知精度上一般也只能实现亚米级的精度。因此,在 6G 中如何针对不同的应用合理提供通信感知融合的性能,就成为了 6G 网络技术的重要研究方向之一^[1-3]。目前 6G 通感融合预期能够实现高速移动环境中的三维物体感知,感知精度可达厘米级。

1 通感融合仿真的模式与指标

1.1 典型模式

6G 通感融合按照场景和实现技术的不同可以分为两种模式,模式一为应答感知模式,通信系统针对具备通信能力的终端进行感知,即感知的电磁波通过基站发射以后,直接在终端侧进行处理和计算;模式二为反射感知模式,通信系统针对普通物体进行感知,即感知的电磁波通过基站发射,并由终端发射回基站,在基站侧进行处理和计算。

应答感知模式场景基于通信终端实现通感融合,基于通信终端的通感融合模式如图 1 所示。

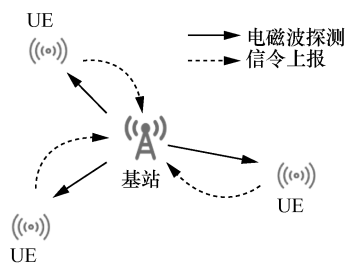


图 1 基于通信终端的通感融合模式

基站发射的下行通信信号中包含感知信号,一种常见的方式是利用通信信号中的信道检测导频实现信号衰减、时延、波束扫描等功能,在用户设备(user equipment, UE)获取定位、测距、测速、测角等参数,并通过信令上报给基站,由基站进行分析,实现对 UE 的感知。此模式用于感知的电磁波只需要单程穿越信道,总体上符合

二次雷达方程,如式(1)所示^[4]。

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{P_t \times G_t \times G_r \times \lambda^2}{(4\pi)^2 \times S_{\min}}} \quad (1)$$

其中, $R_{\max}$ 为电磁波感知的最远距离, P_t 为发射功率, G_t 为基站发射天线增益, G_r 为终端接收天线增益, λ 为电磁波波长, $S_{\min}$ 为接收机的灵敏度。

反射感知模式场景为基站感知普通物体,在这种模式下需要基站接收自身发出的电磁波在物体上的回波信号,并通过回波信号的分析来实现物体的定位,基于回波探测的通感融合模式如图 2 所示。

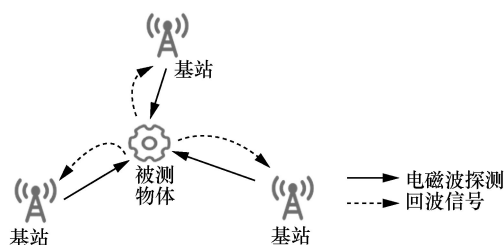


图 2 基于回波探测的通感融合模式

基站发射电磁波之后,经过被测物体的反射由基站接收,基站通过集成雷达系统实现对物体的定位、测距、测速、测角功能。此模式中通感融合的信号需要往返穿越通信信道,总体上符合标准的四次雷达方程,如式(2)所示^[4]。

$$R_{\max} = 4 \sqrt[4]{\frac{P_t \times G_t \times G_r \times \lambda^2 \times \sigma}{(4\pi)^3 \times S_{\min}}} \quad (2)$$

其中, σ 为被测目标的雷达截面积。

应答感知模式与反射感知模式相比,衰减、干扰较小,一般具有更好的性能。虽然,基于反射回波的通感融合感知的性能提升难度更大,但是回波感知的方式对终端的通信能力没有要求,适合更广泛的应用场景。同时,该模式可以通过多基站联合探测方案提升整体的感知性能。

1.2 常用指标

评价通信-感知融合系统的性能可以结合业内传统的空口性能指标(参考 3GPP、ITU 相关标准^[5-7])和与雷达相关的性能指标(如 IEEE 相关标准^[8-9])。常用通感融合系统性能评价指标见表 1。

表1 常用通感融合系统性能评价指标

指标名称	描述	计算方法	标准组织	融合模式
感知距离	在满足一定的发现概率条件下, 从发射机天线到目标物体的最远距离	$R_{\max} = 4\sqrt{\frac{P_t \times G_t \times G_r \times \lambda^2 \times \sigma}{(4\pi)^3 \times S_{\min}}}$	IEEE	应答模式、反射模式
分辨率(含距离、角度、速度)	指雷达能够区分两个物体的最小单元 (距离、角度、速度)	距离: $\Delta R = \frac{c}{2W}$ 其中, c 为光速, W 为信号带宽(单位: Hz) 速度: $\Delta V = \frac{c}{2 \times f_c \times T_c}$ 其中, c 为光速, f_c 为探测信号载波频率, T_c 为探测周期	IEEE	应答模式、反射模式
频谱效率	由信道带宽 (以 bit/(s·Hz) 为单位)归一化的理想条件下的最大数据速率	峰值频谱效率: $\Delta V = \frac{c}{2 \times f_c \times T_c}$ $SE_{\text{峰值}} = \frac{R_{\text{净核}}}{W} = \frac{R_{\text{原始}} - R_{\text{开销}}}{W}$ (单位: bit/(s·Hz))	3GPP, ITU-R	应答模式、感知模式
小区峰值速率	理想条件下可实现的最大数据速率 (单位: bit/s)	$R_{\text{峰值}} = W \times SE_{\text{峰值}}$ 其中, W 表示信道带宽(单位: Hz), $SE_{\text{峰值}}$ 表示该频带中的峰值频谱效率	3GPP, ITU-R	应答模式
容量	区域流量容量指服务于每个地理区域的总流量吞吐量	容量 $C_{\text{区域}} = \rho \times W \times SE$ 其中, ρ 表示 TRxP 密度(单位: TRxP/m ²)或站点密度(单位: site/m ²), W 表示信道带宽(单位: Hz), $SE_{\text{平均值}}$ 表示平均频谱效率(单位: bit/(s·Hz·site)), $C_{\text{区域}}$ 表示容量(单位: bit/(s·m ²))	3GPP	应答模式

在衡量通感融合系统的性能时, 感知指标与通信指标通常是相互制约的, 联合分析这两类指标即可反映融合系统的有效性和优化能力。仿真系统也是通过联合分析通信和感知指标实现对方理论性能的评估。

2 仿真方法与实现

2.1 仿真系统框架

通感融合仿真系统通过模拟通感基站和终端

之间的通信和感知过程, 利用理论分析的方式来评估系统的设计性能。通感融合仿真系统架构如图3所示。

仿真系统主要由信源、信道、接收与回波以及分析等部分组成。其中信源部分主要仿真生成通感融合的发射信号, 信道部分主要通过构建环境模型仿真发射信号和回波信号传播的路径特性, 接收与回波仿真主要完成信号的接收解调, 同时根据散射特性生成反射的回波, 为信号指标

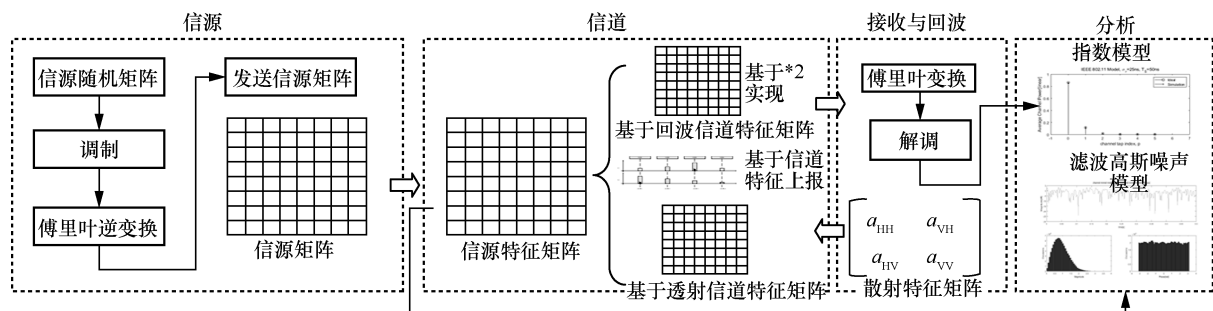


图3 通感融合仿真系统架构



的分析提供基础，分析部分是仿真系统的重要核心，可以根据系统的设计特征、理论计算方法和变量关系，生成分析的图表，并展示相应的关系。

2.2 信源模块仿真

信源仿真随机生成发射数据，通过调制、波形生成和成帧，实现发射信号的构建。通常信源的生成需要根据系统采用的调制、编码技术实现。目前产业界比较常用的调制技术包括正交相移键控（quadrature phase shift keying, QPSK）、正交振幅调制（quadrature amplitude modulation, QAM）等，常用的编码技术主要是正交频分复用（orthogonal frequency division multiplexing, OFDM）技术时频域采样和编码。因此，信源生成通常包含调制单元和快速傅里叶逆变换（inverse fast Fourier transform, IFFT）变换单元，用来生成典型的 OFDM 信号。

OFDM 是将一系列正交的子载波组合在一起，将一个大带宽信号分割成众多的窄带子载波，并将原始离散信号调制到子载波上进行传输的方式。其仿真的基本参数设定主要基于子载波带宽、比特率和保护间隔。其中保护间隔占用的功率通常为 1 dB，即占整个符号周期长度的 20%。根据保护间隔推算得出符号周期后，根据所要传输的比特率和允许使用的带宽再选择合适的调制类型、编码速率和快速傅里叶变换（fast Fourier transform, FFT）点数。

2.3 信道模块仿真

通感融合实现模式不同，信道仿真模块也有所不同。针对单向感知模式，信道仿真通过模拟不同的传输路径特性，一般采用信道特征矩阵描述。信道特征矩阵与信源发射矩阵进行时域卷积，可以生成接收信号矩阵。针对回波感知模式，信道仿真除了需要模拟不同的发射信号传输路径特性，还需要模拟回波信号的传输路径特性，由于无线传输信道一般是时变信道，通常发射信号传

输路径的特性不同于回波信号的传输路径特性，需要用不同的传输特性矩阵进行描述。有时在分析一些时变特性较少的信道时，为简化仿真系统复杂度，回波信道的仿真模型也可以采用发射信道的仿真模型。

无线信道模型主要包含路径损耗、天线增益、衰落模型和噪声与干扰等模型。路径损耗是电磁波发射以后，经过一定距离后功率衰减的情况；天线增益指实际天线与理想的辐射单元在空间同一点处所产生的信号的功率密度之比，对于有向天线相当于能够获取额外的功率增益。在仿真系统中，可以通过将经过路径损耗的发射信号功率乘以天线增益来综合反映功率的衰减幅度。衰落模型主要有慢衰落和快衰落两种方式，通常慢衰落与路径损耗有关，快衰落与多径传输中信号的叠加以及环境参数（如遮挡）有关，仿真快衰落时通常可以结合是否具有视距传输路径，采用不同的统计模型进行仿真，例如，在无视距传输场景下可以采用瑞利多径传输衰落模型，在有视距传输场景下可以采用莱斯多径传输衰落模型。在噪声和干扰仿真时，一般假设信道中存在的是高斯白噪声，可以全频段引入正态分布的噪声矩阵，与信号进行叠加，可以模拟信号在收到干扰以后的功率强度的变化，在仿真接收端可以设置接收门限，从而实现误码率的仿真。对于干扰需要设置干扰信号的时频域特征，其对信号的影响一般是短时局部频点的。增加干扰信号可以考察系统设计时的干扰保护、预调制、预失真技术的抗干扰性能。

2.4 接收与回波仿真

接收端通常是发射端的逆过程，接收信号需要进行 FFT、解调等步骤，最终获取接收信号的矩阵。在获取接收信号后，需要进行仿真变量的统计工作，统计变量的选择和统计方法主要由仿真目标方案和理论推导的变量关系为基础，例如，将接收矩阵与发射信号矩阵比较可

以统计误码率, 误码率对于检验通信的峰值速率有重要意义。还可以统计接收信号的功率与仿真的噪声的功率比, 从而更好地估计通信的质量。

此外, 在仿真采用回波感知技术的系统时, 接收端需要构建回波信号, 该信号不需要进行解码、解调, 但是需要进行物体反射特性的仿真运算, 物体反射的参数可以参考物体雷达截面积的计算方法。在远场和线性散射条件下, 可以通过物体反射电磁波的极化矩阵来表示电磁波的散射特性, 即接收端发射的回波信号需要乘以物体的极化特性矩阵, 由此生成回波信号。

2.5 仿真分析方法

仿真分析方法一般与需要研究的指标和实现技术有关, 例如, 如果需要研究系统的接收灵敏度、误码率, 可以通过仿真信噪比指标的仿真实现^[10]; 需要研究自干扰情况, 可以从通信信号和感知信号的功率调度算法仿真来实现。以下给出基于本文仿真系统, 研究通感波形的频谱效率和感知距离分辨率之间关系的一个仿真案例, 以此说明仿真系统的试验过程。

通常在评价通感融合技术的性能时, 感知距离分辨率和通信频谱效率是一对衡量指标, 可以反映融合波形在满足探测不同物体距离间隔精度要求时能够达到的通信性能。一般情况下感知距离分辨率与感知信号占用的频谱带宽有关, 其关系如式 (3) 所示。相应地, 在通感融合场景下等效的频谱效率计算式如式 (4) 所示。

$$R = \frac{c}{2B_r} \quad (3)$$

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (B_{ci} + \phi_i B_{ci})}{B} \quad (4)$$

其中, B 为信号总带宽; B_r 为通感融合波形占用的带宽; B_c 为通信波形占用的带宽; ϕ 为通感复用系数, 该系数反映通感融合波形的通信复用能

力, 即等带宽的通感融合波形与通信波形传输信息最大速率的比值; i 表示第 i 个终端。

根据 3GPP TR38.211 相关标准^[11], 物理层频谱资源被按照时频域分成资源块, 3GPP TR38.211 时频域资源管理示意图如图 4 所示, 在 OFDM 信号将无线资源从时间和频率维度进行了划分, 其中每一个 OFDM 符号表示一个 FFT 频率采样周期内的子载波数量。

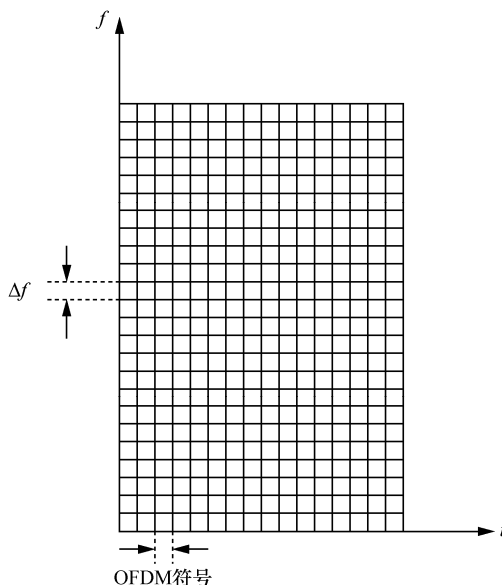


图4 TR38.211 时频域资源管理示意图

为方便示意, 仿真中不考虑通信子载波和感知子载波复用的优化方案, 所有子载波单独作为通信或者感知使用, 也不考虑通信子载波中的保护冗余。仿真中设置 OFDM 信号的 FFT 频率采样点数为 8 192, 子载波间隔为 120 kHz。将其中 128~1 024 个子载波用于感知, 其余子载波全部用于通信。通感波形无复用条件下的感知分辨率与频谱利用率仿真关系如图 5 所示, 在未优化场景下, 频谱利用率在 95%~100%变化时可以有效改善感知精度, 但当频谱利用率下降到 95%以下时, 提高感知精度会导致频谱利用率快速下降。如果采用通信、感知复用的优化波形, 应实现对频率利用率和感知分辨率的通感复用系数 ϕ 的优化。

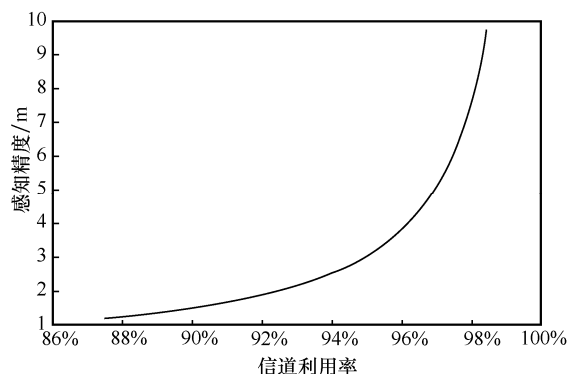


图5 通感波形无复用条件下的感知分辨率与频谱利用率仿真关系

3 结束语

仿真系统作为 6G 通感融合技术验证的重要方法,在实际应用中可以进一步实现复杂环境的仿真功能,例如,实现基于 3GPP 标准^[12]描述的复杂环境场景的信道仿真模型,以获得更为真实的仿真效果。目前 6G 网络的无线空口波形尚未确定,除了 OFDM 波形是备选方案之一以外,基于时延-多普勒域的新的正交时频空 (orthogonal time frequency space, OTFS) 波形也可能成为实际方案,因此在信源编码仿真部分也有待进一步对不同的波形提供仿真支持。此外,在实际应用中通感融合的信道估计也是提升通信感知系统整体性能的重要技术。但是由于信道的时变特性,仿真和估计通常需要海量的计算能力,因此雾计算^[13]在未来通感融合的信道估计中具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] ZHOU Y, LIU L, WANG L, et al. Service-aware 6G: an intelligent and open network based on the convergence of communication, computing and caching[J]. Digital Communications and Networks, 2020, 6(3):253-260.
- [2] GIORDANI M, POLESE M, MEZZAVILLA M, et al. Toward 6G networks: use cases and technologies[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(3): 55-61.
- [3] CALVANESE STRINATI E, BARBAROSSA S, GONZALEZ-JIMENEZ J L, et al. 6G: the next frontier: from holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 42-50.
- [4] 丁鹭飞, 耿富禄, 陈建春. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2020.

DING L F, GENG F L, CHEN J C. Radar principle[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002.

- [5] 3GPP. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies: TR 38.913[S]. 2022.
- [6] ITU-R. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020: M.2412-0[S]. 2017.
- [7] ITU-R. Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s): M.2410-0[S]. 2017.
- [8] CHEN H Y, AHMAD F, VOROBYOV S, et al. Tensor decompositions in wireless communications and MIMO radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2021, 15(3): 438-453.
- [9] XU C C, BRUNO C, SHIWA C, et al. Rate-splitting multiple access for multi-antenna joint radar and communications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2021, 15(6): 1332-1347.
- [10] YONG S C, JAEKWON K, WON Y Y, et al. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB[M]. Piscataway: IEEE Press, 2010.
- [11] 3GPP. NR; physical channels and modulation: TR 38.211[S]. 2021.
- [12] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: TR 38.901[S]. 2019.
- [13] ZHOU Y Q, TIAN L, LIU L, et al. Fog computing enabled future mobile communication networks: a convergence of communication and computing[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(5): 20-27.

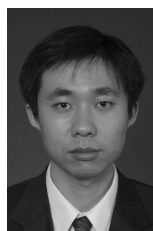
[作者简介]



陈仲华 (1977-), 男, 中国电信股份有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为 6G 通感算融合、未来网络、云网融合、SDN/NFV 技术。



金凌 (1986-), 女, 中国电信股份有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为未来网络架构、6G 通感融合仿真技术。



孙剑平 (1978-), 男, 中国电信股份有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为 6G 通感算融合、固移融合承载技术、云网融合。