

vivo



通感一体化技术

vivo通信研究院
2023年10月

目 录

第一章

引言	01
----	----

第二章

通感一体化定义	02
---------	----

第三章

通感一体化可行性分析	05
------------	----

3.1 通感一体化设计可行性	08
----------------	----

3.2 通感一体化的性能分析	09
----------------	----

第四章

通感一体化系统框架与关键技术	11
----------------	----

4.1 通感一体化系统框架	12
---------------	----

4.2 通感一体化波形与信号设计	16
------------------	----

4.3 多频段协同感知	21
-------------	----

4.4 多天线通感一体化技术	22
----------------	----

4.5 多点协作感知	24
------------	----

4.6 感知的链路自适应技术	26
----------------	----

4.7 通感一体化移动性管理	29
----------------	----

4.8 感知非理想因素的消除	32
----------------	----

4.9 感知安全隐私保护方案	35
----------------	----

4.10 其他关键技术	37
-------------	----

第五章

通感一体化信道建模与样机验证	39
----------------	----

5.1 信道测量与建模	42
-------------	----

5.2 样机验证	43
----------	----

第六章

结束语	47
-----	----

参考文献	49
------	----

缩 略 语	51
-------	----

01

第一章

引言

2020年和2022年，vivo通信研究院先后发布了《数字生活2030+》、《6G愿景、需求与挑战》和《6G服务，能力与使能技术》三本白皮书[1-3]，分别对6G的美好愿景和使能技术进行了畅想与阐述。本白皮书针对6G使能技术之一的通感一体化技术，分析其定义、可行性与系统框架，并对波形与信号设计、多频段协同感知、多天线通感一体化技术等多个关键技术展开了阐述，期望和行业伙伴一起对通感一体化进行技术攻关与实践验证，助力构建面向2030+的自由连接的数字与物理融合世界。

02

第二章

通感一体化定义

无线信号在传播过程中受到周围物体或环境的影响，会引起信号幅度、相位等特征的变化。通过对接收信号的分析，不仅能够得到信号承载的通信信息，还能够提取出反映物体或环境特征的信息。也就是说，电磁波除了能够传递通信信息，还具有与生俱来的感知能力。在过去，通信系统和感知系统由于研究对象与关注重点不同而被分别研究。实际上，二者均基于电磁波的发送和接收来完成信息的获取和传递，在工作原理、系统架构以及工作频段上存在着不少相似之处。通信感知一体化（即通感一体化）是指在同一系统中通过频谱共享、硬件共享与信号共享的方式，实现通信、感知功能的一体化设计，能够节约硬件成本，提升频谱使用效率。

作为6G研究热点之一，通感一体化已经被国际电联无线电通信部门（International Telecommunication Union--Radio communication Sector, ITU-R），中国IMT-2030（6G）推进组，北美Next G Alliance，欧洲电信标准协会（European Telecommunications Standards Institute, ETSI），Hexa-X，电气电子工程师学会（Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE），第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）等组织广泛关注。ITU-R在《IMT面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书》将通感一体化作为6G的典型应用场景之一[4]。该场景将使能6G系统具备对未连接的目标（如人体）以及连接的目标（如手机）的空间信息、运动情况和周围环境信息的感知。

通感一体化开启了无线网络的又一扇门，将催生出丰富多彩的感知业务用例。在智能交通场景，通感一体化系统可以从“上帝视角”对车辆位置、速度和行人状态进行检测，进而对突发事件进行识别。车辆除了作为被感知的目标，还可以作为通信节点与感知收发节点，与路边部署的通感一体化基站协同工作，感知环境的同时进行通信任务，达到实时避开障碍物、选择路线、检测突发状况和遵守交通法规的目的。利用无线通信网络对交通路况进行实时感知，在不增加额外的部署成本的情况下，具有全天候、广覆盖等优点，能够有效降低道路交通场景中的安全隐患。

**全天候****广覆盖****高谱效**

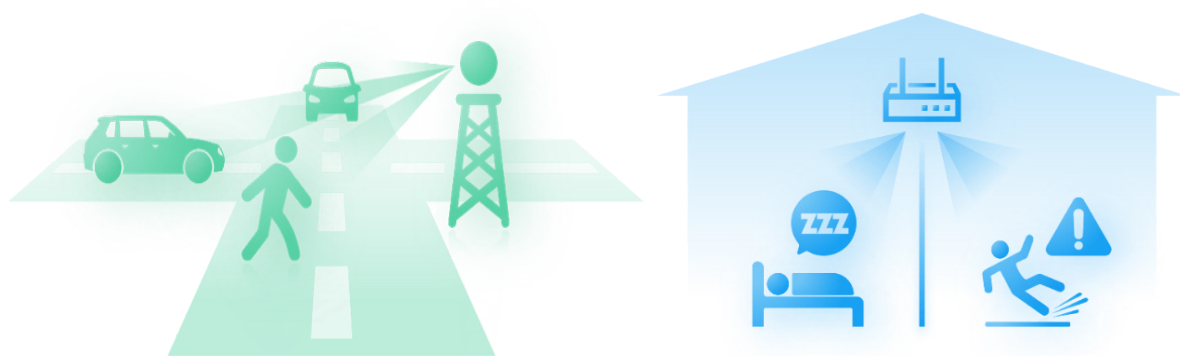


图2-1. 通感一体化在交通与家庭场景中的应用

在家庭生活场景，通感一体化也能够发挥重要作用，例如个人健康监护、居家安全等方面。呼吸和心跳等生命体征提供了医学问题的重要线索，例如睡眠异常所表现出的呼吸急促或呼吸不畅，活动时心率异常等症状都反映了身体的非健康状况，对生命体征进行监测对于个人医疗保健具有重要意义。传统接触式检测在病床监护中被广泛使用，但在居家生活的场景下，不仅影响被测试者的睡眠舒适度，且购买专门的设备增加了成本开销。采用通感一体化技术，可以通过对无线信号的分析得到呼吸或心跳的特征信息。除了生命体征以外，还可以对老人或儿童跌倒等日常活动进行持续监测，为家庭安全提供更多保障。相比于传统的基于摄像头或佩戴式设备的方式，通感一体化具有无接触、低成本的优点，不受限于视距条件和光照条件，且不存在隐私泄露的隐患。

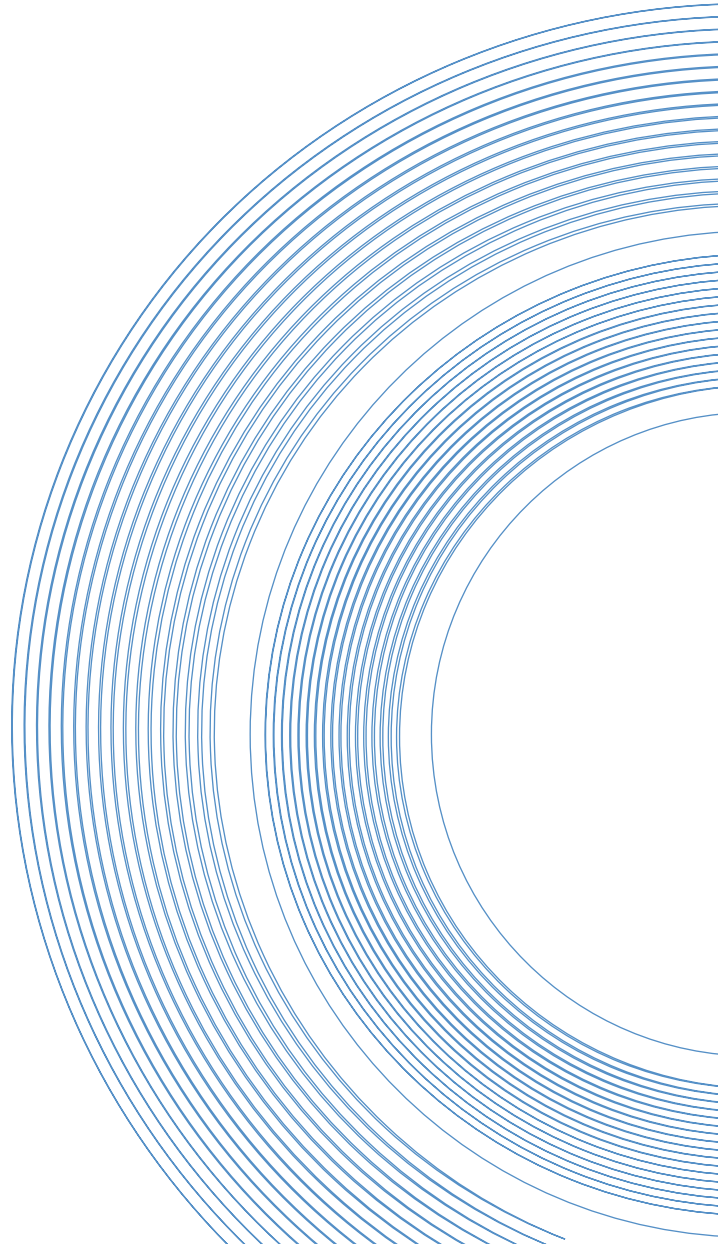
除了智能交通和家庭生活场景，通感一体化应用将覆盖未来社会生活的各个方面，在低空无人机、工业自动化、医疗健康、仓储物流、安防监控、农业气象、休闲娱乐等诸多场景发挥重要作用[5]。此外，通过感知技术还可以获取无线通信环境信息以及通信节点信息，例如用来帮助通信系统进行高效率波束管理，提升信道估计性能，减小信道测量反馈开销，调整信号配置与资源分配策略等，即感知辅助通信[6-9]。

03

第三章

通感一体化可行性分析

通信和感知的融合在需求、原理以及硬件条件等方面具备一定的基础，且能够带来诸多好处，但两者的性能指标和信号处理流程仍存在一定差异。通信系统需要将承载信息的调制符号与导频符号联合发送，其信道估计算法仅估计具有有限未知参数的复合信道，重点关注译码性能，以提高吞吐量和传输可靠度为优化目标。感知系统信号发送过程中无需考虑信息承载问题，通常使用未经调制的发射信号，重点关注感知目标对发射信号带来的改变，以提高参数估计精度为优化目标。





3.1 通感一体化设计可行性

前面提到，通感一体化可以采用频谱共享、硬件共享以及信号共享的方式。典型的雷达感知系统工作在S (2-4 GHz)、C (4-8 GHz)、X (8-12 GHz) 以及Ku (12-18 GHz)，Ka (27-40 GHz)，毫米波（如70 GHz）等频段。随着移动通信系统的不断演进，每一代新的移动通信系统都会被分配新的频谱，通信与感知在工作频段上将会有越来越多的重合。通信和感知共享频谱资源，能够提高频谱利用率。

从发射端角度，通信和感知可以共用基带信号生成、数字/模拟（D/A）转换、射频前端、发送天线阵列等模块。从接收端角度，两者可以共用接收天线阵列。为了减轻自干扰的影响，感知系统也可以使用与发送天线阵列物理隔离的接收天线阵列来接收回波信号。此外，通信和感知在接收下变频、模拟/数字（A/D）转换以及时频同步、时频变换等接收数据预处理流程通常是一致的。通信系统通过信道估计获取信道信息后用于后面的均衡处理，进而完成解调和译码的过程。而感知系统则利用信道信息进行参数估计得到相应的感知信息。一种典型的通信系统和感知系统收发端模块复用方案如图3-1所示。其中，红色框线部分表示感知特有的处理模块，蓝色框线部分表示通信特有的处理模块，黑色框线部分表示两者可以共用的处理模块。

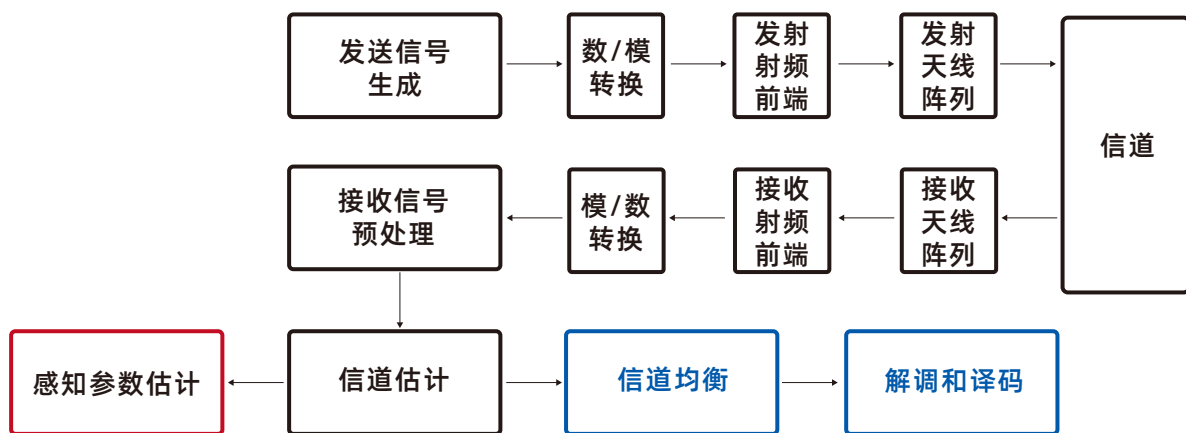


图3-1. 通信与感知收发端模块复用方案

感知系统可以复用通信系统中的已有信号，包括用于信道测量和信道估计的各种参考信号，同步信号，以及通信数据等，以达到信号共享的目的[10]。还可以面向不同感知场景设计新的专用感知信号，通过时分复用、频分复用、空分复用等方式与通信信号共同传输。



3.2 通感一体化的性能分析

通感一体化系统的性能指标包括通信性能指标和感知性能指标。通信性能指标主要包含误比特率/误码率、时延、数据速率、连接密度、频谱效率、能量效率、可靠性等。感知性能指标包括感知精度、感知分辨率、感知范围、刷新频率、业务时延等[3]。

感知性能与通感一体化系统的工作频段、发射功率、硬件架构、接收处理算法、信号资源配置等多方面因素有关。其中，感知信号资源配置与对应的感知性能之间关系如表3-1所示[11, 12]。感知信号的时间资源、频率资源和空间资源分别决定了系统在多普勒、时延和角度等维度的感知性能。感知信号的带宽、相干处理时长以及天线孔径决定了距离、多普勒和角度的分辨率，而感知信号的采样间隔则决定了最大无模糊感知测量范围。对于双基地感知，其测距和测速性能还与收发设备与感知目标的几何位置有关。

表 3-1. 感知信号和对应的测量性能之间关系

感知信号资源	感知性能
信号带宽B	时延分辨率 $\Delta\tau = 1/B$ 距离分辨率（单基地感知） $\Delta R = c/2B$ 距离分辨率（双基地感知） $\Delta R = c/2B \cos(\beta/2)$
频域采样间隔 Δf	最大无模糊时延 $\tau_{\max} = 1/\Delta f$ 最大无模糊距离（单基地感知） $R_{\max} = c/2\Delta f$ 最大无模糊距离（双基地感知） $R_{\max} = c/2\Delta f \cos(\beta/2)$
相干处理时长 T_f	多普勒分辨率 $\Delta f_d = 1/T_f$ 速度分辨率（单基地感知） $\Delta v = c/2f_c T_f$ 速度分辨率（双基地感知） $\Delta v = c/2f_c T_f \cos(\beta/2)$
时域采样间隔 ΔT	最大无模糊多普勒 $f_{d,\max} = 1/\eta\Delta T$ 最大无模糊速度（单基地感知） $v_{\max} = c/2\eta f_c \Delta T$ 最大无模糊速度（双基地感知） $v_{\max} = c/2\eta f_c \Delta T \cos(\beta/2)$
天线孔径D	角度分辨率 $\Delta\theta = \lambda/Nd \cos\theta$
天线单元间隔d	最大无模糊角度 $\theta_{\max} = \pm \sin^{-1}(\lambda/2d)$

参数说明：
 β 为双基地感知的双基地角，如图3-2所示；
 目标运动方向已知时 $\eta=1$ ，目标运动方向未知时 $\eta=2$ ；
 f_c 为载波中心频率， λ 为载波波长， N 为天线单元数， θ 为波束指向。

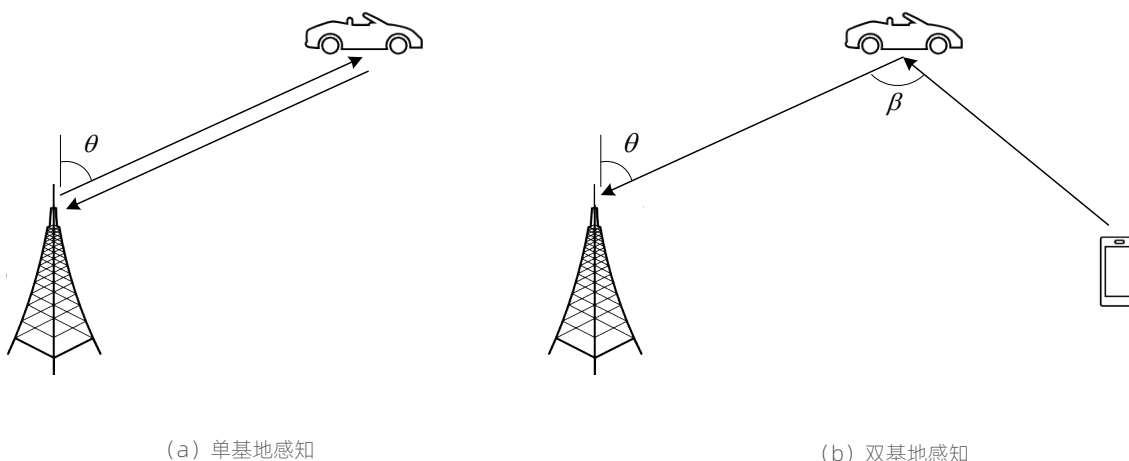


图 3-2. 单基地和双基地感知系统架构示意图



感知精度一般取决于感知分辨率以及接收信号的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)或信干噪比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) [13]。图3-3给出了城市微蜂窝 (Urban Micro, Umi) 场景下基站自发自收感知信号的单基地感知和基站发用户设备 (User Equipment, UE) 收感知信号的双基地感知的感知SINR的仿真结果。感知SINR表示经过感知目标反射的径或簇的信号功率与干扰和噪声的比值。仿真中的干扰考虑了来自除三个最强干扰小区以外的其他小区的同频干扰。作为感知目标的车辆和行人的雷达散射截面积 (Radar Cross Section, RCS) 分别采用 1m^2 和 0.1m^2 的典型值。对于双基地感知, 假设感知目标与UE的距离不超过 10 m 。感知信号的频域子载波间隔为 120 kHz , 频率是 6 GHz , 带宽为 400 MHz 。对于车辆等高速目标, 信号发送周期为 0.125 ms , 相干处理时长为 10 ms ; 对于行人等低速目标, 信号发送周期为 1.25 ms , 相干处理时长为 100 ms 。在上述两种典型的信号资源配置下, 采用二维傅里叶变换进行感知信号处理均可以获得约 54 dB 的处理增益。仿真得到的感知SINR包含了处理增益。仿真结果表明, 由于感知接收节点距离感知目标更近, 双基地感知相比单基地感知在移动蜂窝网络架构下能够获得更好的感知覆盖性能。

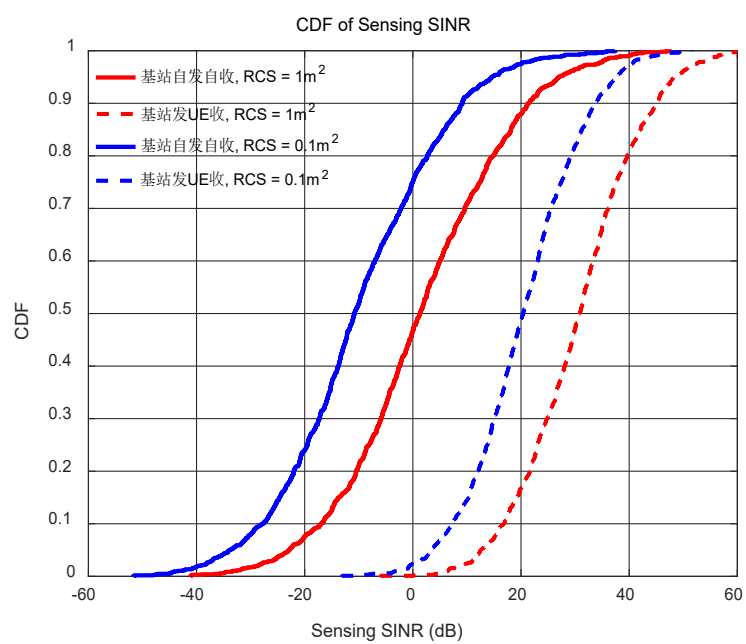


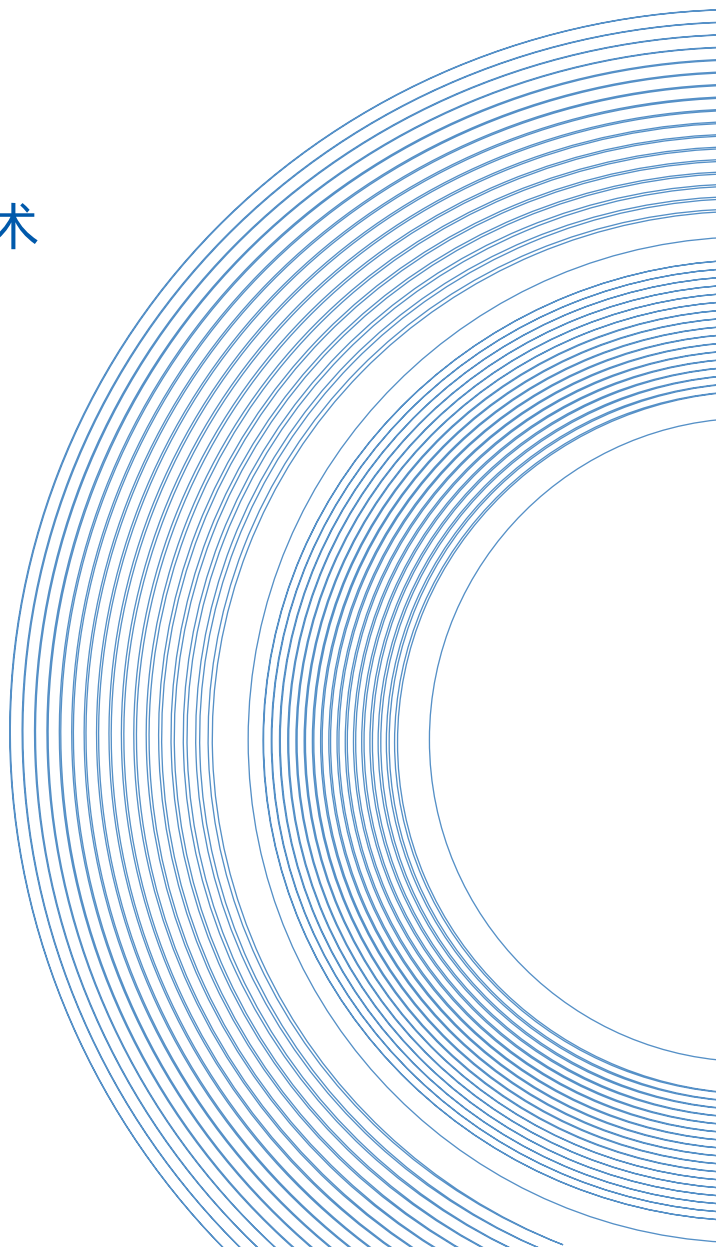
图 3-3. Umi场景感知性能仿真结果

04

第四章

通感一体化系统框架与关键技术

本章首先介绍了通感一体化的系统框架，然后对通感一体化系统的若干关键技术进行了分析。





4.1 通感一体化系统框架

通感一体化系统逻辑框架如图4-1所示。6G网络中的感知业务相关的功能设备包括感知控制设备、感知数据处理设备和感知收发设备。其中，感知控制设备用于进行感知业务相关的信令和策略控制，包括感知QoS保障和感知隐私安全等感知流程控制，以及感知信号配置和感知测量配置等。感知数据处理设备用于进行感知数据的处理和分析以获取感知结果。感知收发设备用于执行感知信号的收发、测量以获取环境或目标物体的信息，可以是基站或UE等设备。

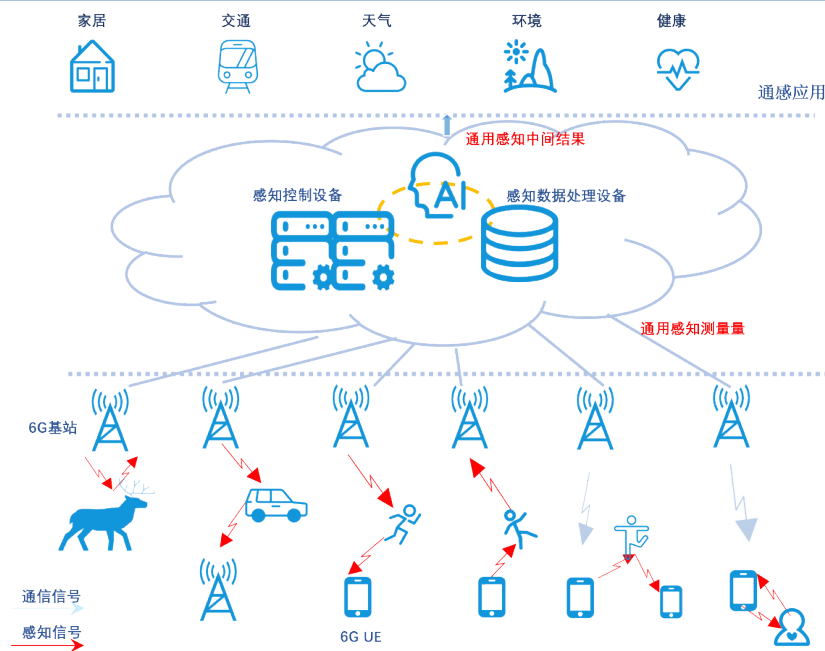


图4-1. 通感一体化系统框架

基于图4-1，一种感知业务示例流程如下

感知业务触发

当消费者向网络请求感知业务时，感知控制设备首先需要触发感知授权和安全验证过程。以确认消费者可以获取感知目标相关信息。此外，感知控制设备还需进行相应的感知业务政策和计费控制（Policy and Charging Control, PCC）策略分配，可为消费者提供差异化的感知服务保障。

感知收发设备选择

感知控制设备根据业务需求确定适配的感知模式，并确定合适的感知收发设备。其中，适配的感知模式可以是多种模式的混合。

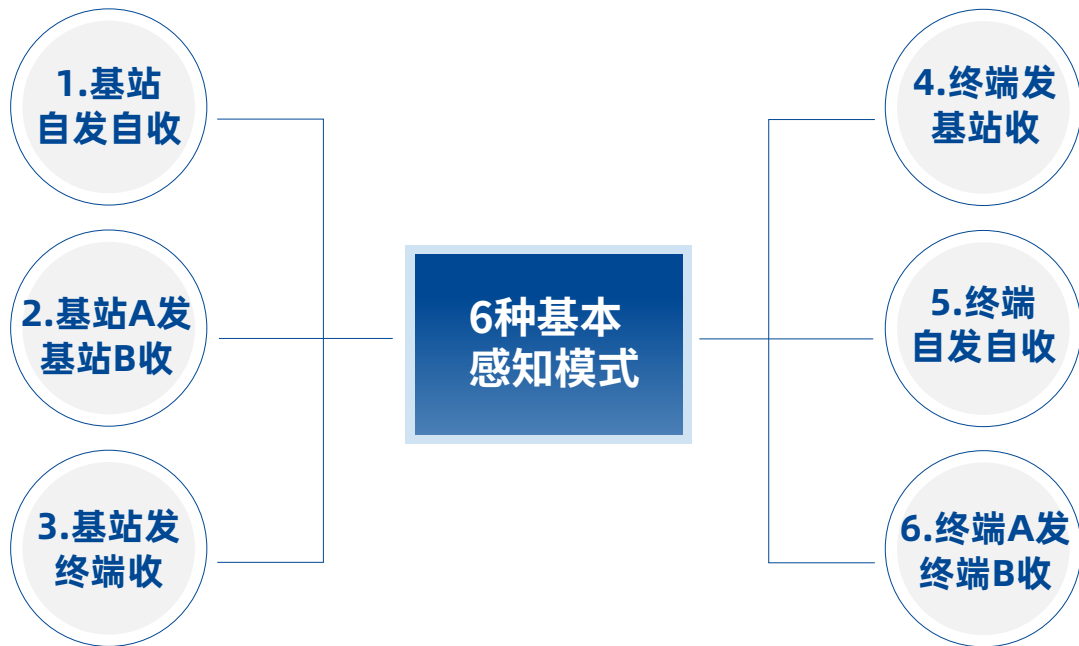
感知测量执行

感知控制设备触发感知收发设备按照相应的感知模式执行信号收发和测量，其中多个感知收发设备可以执行多种感知模式，且PCC策略不仅需要保证不同感知收发设备之间相互协同，还要保证通信和感知业务之间相互协同。

感知结果生成

感知收发设备上报通用的感知数据至网络中的感知数据处理设备。感知数据处理设备分析所述感知数据以获取通用的感知中间结果，其过程中可考虑结合AI能力。感知数据处理设备将感知中间结果开放给消费者，业务消费者根据自身的业务逻辑进行处理，以生成最终的感知业务结果。

从感知信号收发功能角度，通感一体化包括6种基本感知模式：



其中，模式（1）和（5）属于单基地感知，其他模式属于双基地感知。不同感知模式的优缺点总结如表4-1所示。除上述6种基本感知模式外，通感一体化系统框架还将兼容非3GPP感知等。非3GPP感知是指利用通信网络中存在的传感器，摄像头、雷达设备等获取感知数据。

表 4-1. 不同感知模式的优缺点

感知模式	优点	缺点
基站自发自收	无收发同步问题	基站需具备全双工能力
基站A发基站B收	不要求全双工能力	收发同步误差会影响感知性能
基站发终端收	可复用或增强现有信号，不要求全双工能力，通过选择合适的终端可提升感知覆盖性能	终端位置、朝向和速度的估计误差，以及收发同步误差会影响感知性能
终端发基站收	可复用或增强现有信号，不要求全双工能力，通过选择合适的终端可提升感知覆盖性能	终端位置、朝向和速度的估计误差，以及收发同步误差会影响感知性能
终端自发自收	无收发同步问题，支持无网络覆盖下的感知	终端需具备全双工能力
终端A发终端B收	可复用或增强现有参考信号，不要求全双工能力，支持无网络覆盖下的感知	终端位置、朝向和速度的估计误差，以及收发同步误差会影响感知性能

通感一体化的感知用例纷繁复杂，不同的感知用例对感知测量量的要求也有所不同。一方面，需要将感知测量量进行梳理和分类，形成感知测量量的统一框架，为未来的标准化工作铺平道路；另一方面，针对部分用例的感知测量量可能过大的问题，在感知测量上报的过程中需要进行数据压缩，并且数据压缩不能对感知质量造成过大的损失。不同等级感知信息的定义如表4-2所示，其中接收信号或原始信道信息是最原始的感知信息，其数据量较大，需要进一步处理和分析才能得到感知测量量和感知结果。

表4-2. 不同等级的感知信息

不同等级的感知信息	感知信息的内容
接收信号或原始信道信息	接收信号或信道响应的复数结果，幅度/相位，I路/Q路数据及其相关运算结果
感知测量量	时延、多普勒、角度、强度及其多维组合表示
感知结果/感知中间结果	目标是否存在、距离、速度、朝向、加速度、位置、轨迹、动作、表情、呼吸速率/心跳速率、成像结果、天气情况、空气质量、材质与成分、人体健康结果等



4.2 通感一体化波形与信号设计

目 (1) 通感一体化波形设计

波形设计是通感一体化技术研究的重点，波形特性与感知性能紧密关联。通感一体化波形设计可以是基于通信波形或感知波形，进行相关的改进使得通信波形支持感知功能或感知波形支持通信功能，但这种方式资源利用效率较低；也可以通过新波形设计将通信和感知功能集成到一种波形，实现一体化设计。下面对几种潜在的通感一体化波形路线进行分析。

通信用常用波形

基于通信波形的设计思路是保证通信传输效率的前提下实现感知功能，目前常见的通信波形包括正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）、离散傅里叶变换扩展正交频分复用（Discrete Fourier Transform Spread-OFDM, DFT-s-OFDM）、单载波频域均衡（Single Carrier Frequency Domain Equalization, SC-FDE）、滤波器组多载波（Filter Bank Multi-Carrier, FBMC）等。OFDM波形作为典型的多载波调制技术广泛应用于4G/5G移动通信系统，具有较高的频谱效率，可以进行灵活带宽资源分配。OFDM波形被用于参数估计时不存在距离-多普勒耦合效应，接收端基于傅里叶变换的检测算法简单高效，并且基于OFDM波形的雷达和通信系统的发射机制高度相似，便于实现通感一体化设计。OFDM波形存在峰值平均功率比（Peak to Average Power Ratio, PAPR）高、对多普勒和相位噪声敏感等问题，需要针对性的优化。例如采用恒包络OFDM（Constant Envelope-OFDM, CE-OFDM）设计能够改善传统OFDM波形PAPR高导致的高功率放大器出现非线性失真的问题[14]。DFT-s-OFDM波形通过增加DFT扩展的方法使OFDM波形具有单载波特性，从而降低PAPR，有研究将频域赋形（Frequency Domain Spectrum Shaping, FDSS）用于DFT-s-OFDM波形进一步降低带外（Out-Of-Band, OOB）发射和符号间干扰（Inter-Symbol Interference, ISI），提升感知性能[15]。对于采用SC-FDE波形的IEEE 802.11ad系统，其无线帧中的短训练字段（Short Training Field, STF）与信道估计字段（Channel Estimation Field, CEF）由互补格雷序列组成，用于通信系统帧同步、频偏估计、信道估计，同时可用于雷达系统的目标检测以及测距、测速功能[16]。另外，有文献考虑利用FBMC作为通信感知融合波形[17]。FBMC具有较好的频谱特性，且通常不需要循环前缀，但和OFDM一样存在PAPR高的问题，且FBMC为避开子载波间干扰（Inter-Carrier Interference, ICI），通常采用偏移正交幅度调制（Offset Quadrature Amplitude Modulation, OQAM），接收端感知信息的计算相对更加复杂。

雷达常用波形

目前广泛应用的雷达波形是调频连续波（Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW），FMCW雷达连续发射多个啁啾（Chirp）信号并对回波信号进行检测，Chirp 信号也被称为线性调频信号（Linear Frequency Modulation, LFM），是频率随时间线性变化的信号，具有大时宽-带宽积、恒包络、自相关特性好的优点，可以直接通过混频的方式完成信号检测，收发机架构和信号处理流程简单。为使FMCW具有通信功能，可以将通信调制数据嵌入到FMCW波形使其携带通信信息实现通感一体化，例如通过改变调频斜率或起始频率使其承载通信信息。此外，基于雷达常用波形进行通感一体化设计还可以考虑与空间调制或广义空间调制结合。例如通过选择不同的发射天线来承载通信信息，可以避免对感知信号自身特性的改变，尽量减小对感知性能的影响。上述在FMCW波形基础上实现通信功能的方案，通常存在通信效率较低的缺点。

通感融合波形

OTFS（Orthogonal Time Frequency Space，正交时频空）是潜在的6G通感一体化新波形。OTFS技术定义了延迟多普勒域和时频域之间的变换，把通信数据和导频映射到延迟多普勒域进行处理。已有研究表明OTFS在感知参数估计性能方面与OFDM波形相当，并且其循环前缀开销较OFDM更小，即OTFS以更高的复杂性为代价获得更高的频谱效率[18]。也有一些通感波形研究将Chirp与OFDM结合设计新的通感一体化波形，使用Chirp信号而非单一频率信号作为OFDM系统的子载波，相对于传统OFDM波形在不增加接收端处理复杂度的情况下降低了PAPR[19]。





(2) 通感一体化信号设计

通感一体化信号设计包括序列设计与信号资源映射设计等，其设计原则是在满足一定的信号资源开销的前提下，追求对基本感知测量量例如时延、多普勒、角度的测量性能最优。

序列设计

在相位编码雷达信号以及通信导频信号设计中，通常采用具有良好自相关特性的序列，例如巴克码、Gold序列、Kasami序列、Zadoff-Chu序列等。除了自相关特性以外，序列的互相关特性、包络特性、序列长度等也是序列设计中需要考虑的方面。在OFDM通信系统中，一般会对各个符号添加循环前缀，采用最小二乘（Least-square, LS）信道估计获取信道信息，进而计算得到距离、多普勒等感知信息。此时发送序列自相关特性一般不会影响信道信息的获取，但序列的其他特性会影响其抗干扰和噪声的性能，因此序列设计仍然是感知信号设计中需要重点考虑的方面。

通信系统中序列设计通常仅考虑时域或频域维度序列特性，而感知数据处理通常需要联合多个符号或多个时隙，同时考虑序列的时域和频域维度特性。例如对于采用频域序列生成和映射的通信参考信号，多个OFDM符号对应的时域自相关旁瓣较高，可以采用时域维度加扰的方式改善其时域自相关特性。假设每个感知相干处理时间内包含 M 个OFDM符号，每个符号承载长度为 N 的参考信号序列，采用具有良好自相关特性和互相关特性的序列对不同符号承载的参考信号序列进行整体相位调制得到。新的信号设计由于是对不同符号承载的参考信号序列进行整体相位调制，其频域维度序列特性没有改变，但时域维度序列特性得到了改善。用于多目标感知时，该设计相比仅考虑频域维度序列特性的通信参考信号设计能够减小干扰，提升感知性能。

为了进一步充分利用通感一体化系统中的信号资源，提升感知性能，还可以将通信数据信号用于辅助感知测量。对于双基地感知模式，由于发送的通信数据对接收端是未知的，需要先进行数据解调和译码，恢复出发送数据，再进行感知信息的计算。通信系统中，通信数据信号通常占更多的资源开销，使用通信数据信号辅助感知测量，能够提升处理增益，且由于增加了时频域资源密度，能够提升最大无模糊测量范围。但需要考虑接收端解码错误以及数据信号的波束方向（可能与感知信号的波束方向不同）对感知性能的影响。

信号资源映射设计

感知信号资源映射规则需要考虑满足感知分辨率和感知测量范围等性能。更大的信号带宽、更长的信号持续时间能够提供更高的距离分辨率和速度（多普勒）分辨率，增加信号频域密度和时域密度能够提供更大的无模糊距离范围和无模糊速度（多普勒）范围。传统的雷达感知中通常发送资源连续且时宽、带宽较大的信号，但通感一体化系统中还需要考虑对通信速率的影响，因此对感知资源开销有一定限制，需要根据感知业务中对上述几项感知性能的需求不同来设计信号资源映射图样。例如，对于有着高速度分辨率需求的低速目标检测场景，可以采用持续时间较长，时域密度较低以及带宽较小和频域密度较低的信号图样；还可以是在保证感知分辨率的前提下，摒弃一些时频域资源元素，即不采用规则的矩形资源图样，并保证非规则资源图样中的最大带宽满足测距分辨率的要求，或者最大时域资源长度满足速度（多普勒）分辨率的要求；或者是采用非均匀采样间隔的资源图样设计来平衡感知测量范围与资源开销之间的矛盾。

步进频雷达是一种广泛应用的高距离分辨率雷达。借鉴步进频雷达中利用窄的瞬时带宽实现大的系统带宽的思想，采用跳频的方式进行感知信号资源映射以获取高的感知分辨率。采用具有近似“图钉型”模糊函数的Costas码替代步进频编码可以改善步进频雷达中存在的距离—多普勒耦合问题，提升雷达探测性能[20]。在通感一体化系统设计中，也可以借鉴Costas码的跳频思想进行信号资源映射，图4-2给出了2种Costas阵列在OFDM系统中的资源映射关系示意图，阶数分别是6和12。

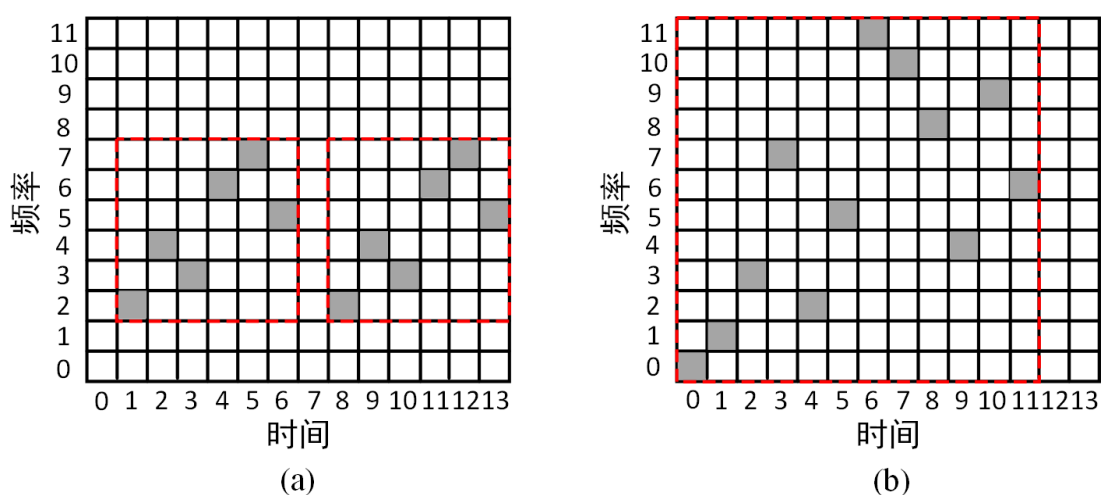


图4-2. Costas阵列在OFDM系统中的资源映射关系示意图 (a) 6阶 (b) 12阶

为了减小感知信号在时间、频率和空间等维度的资源开销，可以根据压缩感知理论，采用小于奈奎斯特采样率的亚采样进行感知信号的设计，如图4-3所示。采用亚采样设计的感知信号，其采样点的位置需要满足压缩感知的有限等距条件（Restricted Isometry Property, RIP）[21]。在一般情况下，随机的采样点位置能够满足RIP条件，这给感知信号的亚采样设计带来了方便。另外，亚采样之后的采样点数不能够任意的小，需要满足。这里， M 为亚采样的采样点数、 N 为对应的全采样的采样点数、 K 为感知目标的个数、 α 为一个常数。因此，当环境中存在的感知目标个数越少时，亚采样之后的采样点数可以被设置得越小，从而能够节约更多的信号资源。需要指出的是，相比于传统的全采样信号设计，基于亚采样的信号设计对于接收端信号处理能力具有更高的要求，并且信号配置的信令开销会相应地增大。

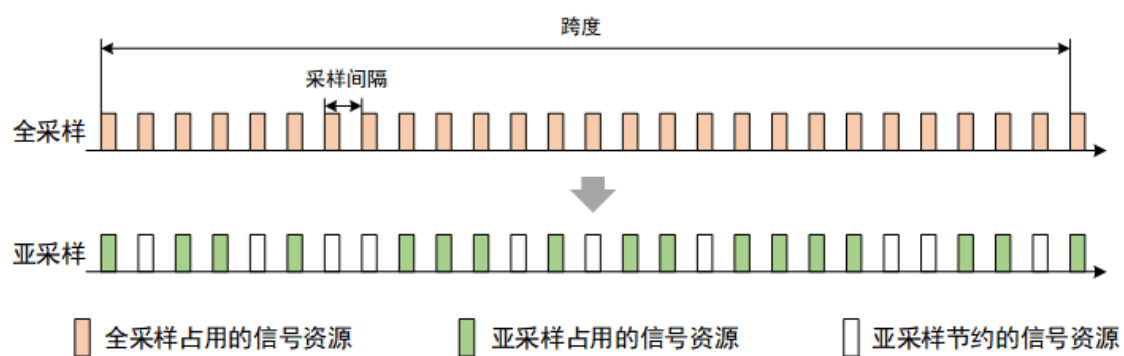
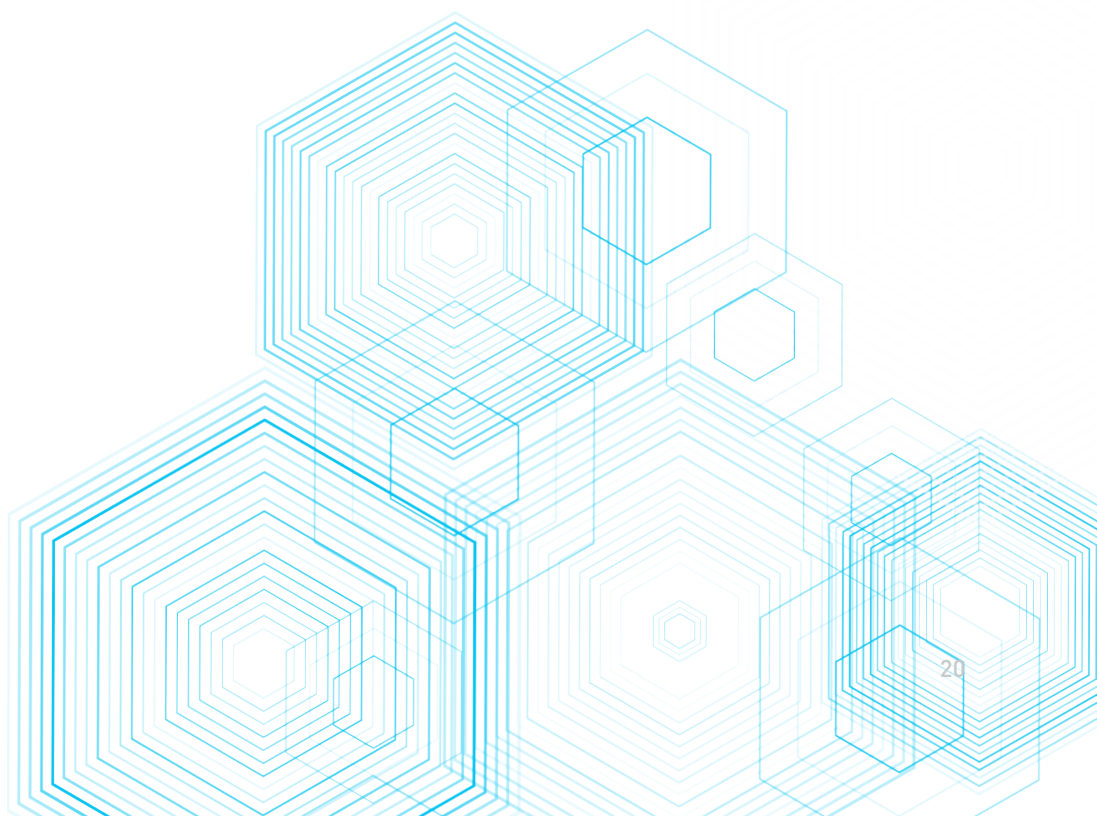


图4-3. 亚采样的感知信号示意图





4.3 多频段协同感知

多频段协同感知可以充分利用频谱资源，提高频谱利用效率。一方面，多频段协同感知扩展了带宽资源，有利于实现高分辨率感知，并且不同频段的信号波长不同，其信道响应特性存在差异，充分利用不同频段进行感知可以获得更加全面的感知信息。另一方面，多种类型通信网络并存，包括6G、5G、Wi-Fi等，多频段协同感知技术可以实现不同类型的通信网络协作感知，提升通感一体化系统稳定性和扩大业务适用范围。多频段协同感知按照感知数据处理方式不同可以分为多频段独立测量和多频段联合测量。

多频段独立测量是指在不同频段上分别获取感知测量量，然后针对不同频段进行感知结果层面的融合。一方面，可以根据不同频段的特点对不同频段分配不同的感知测量量进行测量。另一方面，也可以对不同频段分配相同的感知测量量，各自得到结果后进行非相干合并。此外，也可以是不同频段在测量过程中采用分工协作的方式。例如先基于低频段进行粗粒度测量，在此基础上基于高频段进行精细粒度测量得到最终的测量结果。多个频段独立测量进行协同感知的方式的优点是简单易实现，但是可能会存在信息冗余和感知结果不一致的问题，且无法充分利用多频段联合带来的带宽资源增加的优势。

多频段联合测量是指在不同频段上联合进行感知数据的采集和融合处理，可以获得更全面、更准确的感知结果。感知距离分辨率与信号带宽成反比。实际系统中受到资源开销限制、不同用户资源调度分配策略、硬件性能等因素影响，可能无法使用连续的大带宽信号进行感知测量。采用多个不连续频段进行距离测量能够提升距离分辨能力，即基于带宽分别为 B_1 和 B_2 的两个不连续频段进行感知测量并进行相干处理，相比基于等效带宽相同(B_1+B_2)的单个连续频段进行感知，由于总带宽增大能够获得更高的距离分辨率，且不连续频段间隔越大对分辨率的提升越高。

与连续频段感知相比，基于非连续频段的测量由于采样信息的缺失可能引入额外的干扰，因此在低SNR区间相对于连续频段下的感知性能并不理想。多频段联合测量的挑战还在于不同频段可能存在随机初始相位问题，对采用相干处理的方式会产生严重影响，需要进行特殊的接收处理和发送信号设计解决频段间的相位失真问题，导致实现复杂度较高。



4.4 多天线通感一体化技术

在无线通信领域，借助多天线技术，可实现空间分集和空分复用，分别可以提高通信可靠性和提升通信的传输容量。多天线技术对于无线感知同样重要，因为它拓展了感知维度，使系统能够具备感知目标方向的能力，同时还增强了感知性能，提高了感知的可靠性和能量利用效率。

通过数字或者模拟波束赋形，配备多天线的通感一体节点可以形成高增益的窄波束，使感知信号大部分能量集中在感知区域或者感知目标上，提高了反射信号的信噪比。当感知区域的角度范围较大，或者一个环境中存在多个待感知目标/感知区域时该技术可能需要借助波束扫描完成。波束扫描相比于单次感知占用了更长时间，降低了感知实时性。若使用一个较宽的波束对感知区域或感知目标进行覆盖，在发送总功率相同的情况下又在一定程度牺牲了感知精度或感知信噪比。

未来的多天线通感一体化系统很可能同时具备MIMO通信以及MIMO雷达[22]功能，利用MIMO雷达中的虚拟阵列（Virtual Array, VA）原理提升感知精度。基于虚拟阵列原理，通过合理部署发射天线和接收天线位置，可以仅使用M+N个天线，获得MN个天线的角度估计分辨率。当MIMO系统的某一侧天线数量有限时（如UE侧），可以通过增加另一侧的天线数量、合理地部署另一侧天线位置的手段，实现高分辨率感知。此外，该技术借助空域滤波等阵列信号处理方法还能有效抑制杂波干扰。



在波束赋形与虚拟阵列结合的多天线技术中，波束赋形可以借鉴现有5G系统的波束管理过程。即可以基于感知测量量测量值（例如，多普勒频率、距离、角度等）或者感知性能评价指标的测量值（例如，感知信噪比SNR等），确定最佳感知波束。以基站与UE之间收发通感一体化信号为例，图4-4展示了多天线通感一体化技术的示意图。在这个场景中，UE发送通感一体化信号，基站接收该信号，对环境中的车位置进行感知，同时UE和基站之间进行通信。基站配备多个数字通道，每个数字通道又与一个天线子阵列连接。图4-4中假设基站有6个天线端口（即6个数字通道），UE有2个天线端口（即2个数字通道），则基站和UE可以构造出最大为12个天线端口的虚拟阵列。系统可以通过两个独立的波束扫描过程或者一个波束扫描过程，获得通信测量量和感知测量量的测量值，从而确定通信波束和感知波束。图4-4中，感知波束指向了感知目标，而通信波束则指向了通信的发射端或接收端。需要指出，兼具低成本和灵活性的大规模MIMO数字模拟混合架构设计以及高精度的相位调控方案，仍然是上述通感一体化多天线技术能够实际落地的先决条件。此外，灵活的、低复杂度的通感一体化波束赋形和预编码算法尚未成熟，未来仍需进一步研究。

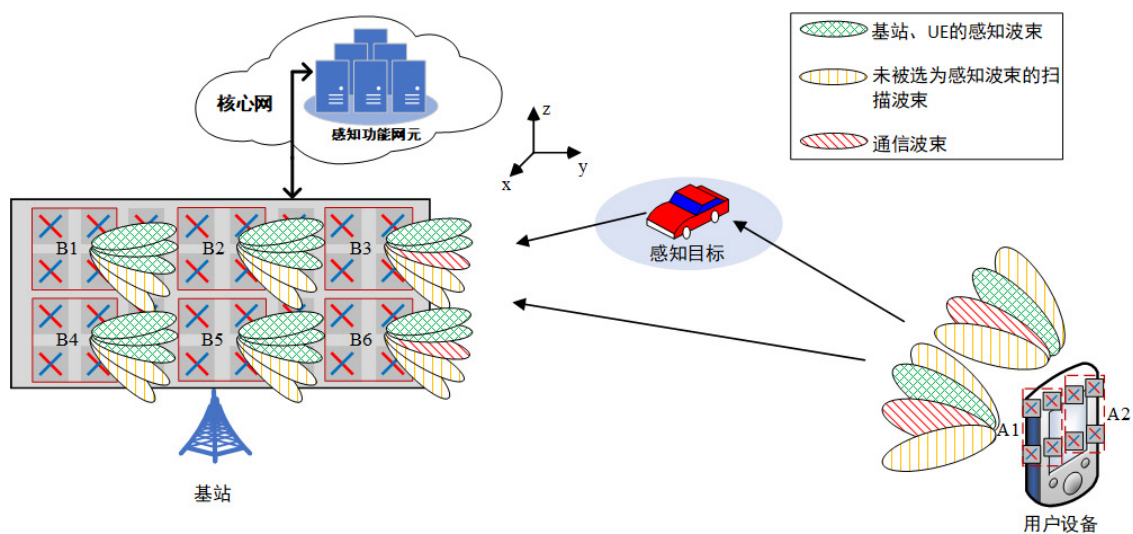


图4-4. 多天线通感一体化波束管理示意图



4.5 多点协作感知

单基地感知的好处是无收发节点间的同步问题，缺点之一是感知节点需具备全双工能力以避免自干扰的影响。另外一个缺点是感知节点只能“看见”感知目标朝向自己的一面，无法“看见”感知目标其他的面。因为大多数感知目标其不同角度的RCS不同，某些角度的RCS会比较小，影响该角度的感知性能。

为了解决单基地感知的缺点，可以考虑引入多点协作感知。双基地感知是最简单的一种多点协作感知，包括基站间的双基地感知，基站和UE间的双基地感知等。基站间双基地感知由于基站位置一般是固定的，可能出现基站距离感知目标较远的情况，从而出现对某些位置目标的感知结果难以满足感知需求的问题。

基站和UE间的双基地感知可以复用现有帧结构和现有信号，通过选择合适的UE（例如距离感知目标较近的UE）参与感知过程来提升感知覆盖性能。其缺点是UE位置、朝向和速度的估计误差，以及基站UE间的同步误差会影响感知性能。一种对应的解决方案是引入一种特殊感知辅助终端。感知辅助终端可以按需放置在距离感知目标较近的位置，保持相对静止，其位置和朝向是已知的，以避免UE位置、朝向和速度的估计误差对感知性能的影响。感知辅助终端与普通UE的区别请参考表4-3。

表4-3. 感知辅助终端与普通UE的区别

属性	感知辅助终端	普通UE
所有者	运营商或行业用户或普通消费者	普通消费者
是否可移动	相对静止	随时可移动
供电方式	电源线/电池/无线供电	电池供电
是否具备上行和下行能力	上行和下行，或只有下行，或只有上行	上行和下行
硬件能力，体积和天线数	比普通UE更强更大更多	-
和基站间的同步能力	和基站有线连接共时钟，或GNSS，或空口同步	空口同步

进一步地，在双基地感知的基础上，可以考虑更复杂的多点协作感知，如图4-5所示。例如，更多（大于两个）节点参与的感知以及不同感知模式的多点协作感知，不同频点的多点协作感知，射频感知与非射频感知融合的多点协作感知等。

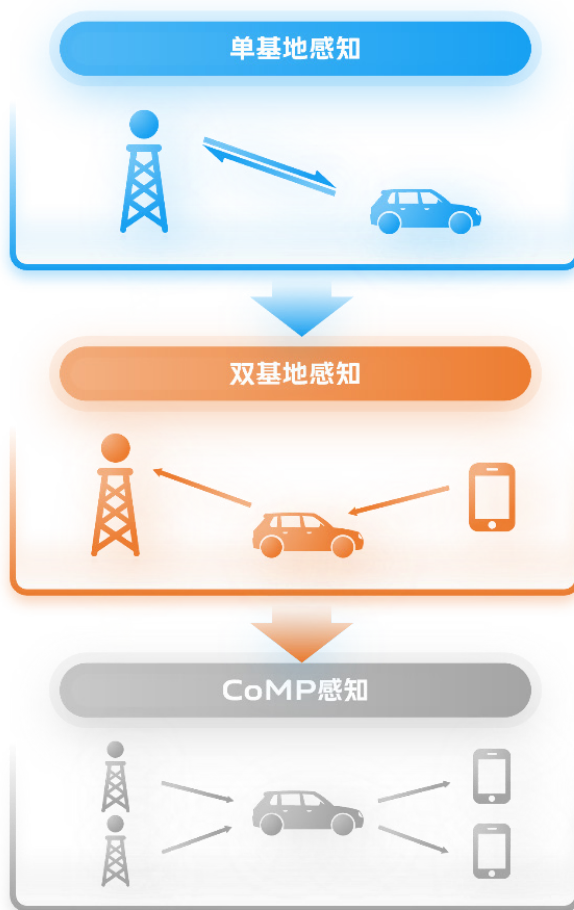


图4-5. 从单基地感知到双基地感知再到多点协作感知的发展路径

多点协作感知相比单基地感知可以提高感知覆盖范围，提升感知性能，提高系统的鲁棒性和抗干扰能力。特别地，对于单基地感知或双基地感知中存在的感知目标特殊的运动方向导致的多普勒检测盲区（盲速）问题，感知目标位于双基地感知的两个节点的连线附近导致定位模糊问题（距离检测盲区），以及感知目标与接收天线面板位于同一平面导致的测角模糊问题等，均可以利用多点协作感知的方式来解决。多点协作感知中，需要对多个节点的感知信息进行收集和处理，生成最终的感知结果，此时需要考虑感知信息数据量大小和协作增益之间的折中。

多点协作感知的挑战包括参与协作的各个收发节点之间的同步问题，硬件不一致问题，以及包括小区内/小区间的同频干扰，交叉链路干扰在内的复杂多类型干扰的应对等。



4.6 感知的链路自适应技术

为了在满足感知用例的感知性能要求的同时实现信号资源的优化配置，以提高通感一体化系统的整体效率，网络需要自适应地调节感知信号的资源配置，即感知的链路自适应技术。

通感一体化系统中感知信号资源的链路自适应技术的基本流程如图4-6所示。感知节点在执行感知业务得到感知测量量后，向网络反馈指定的感知测量量。网络根据反馈的感知测量量，并结合通感一体化系统的其他业务运行情况，判断是否需要调节感知信号的资源配置。如果需要，则网络向感知节点发送信令来指示更新的感知信号资源配置。

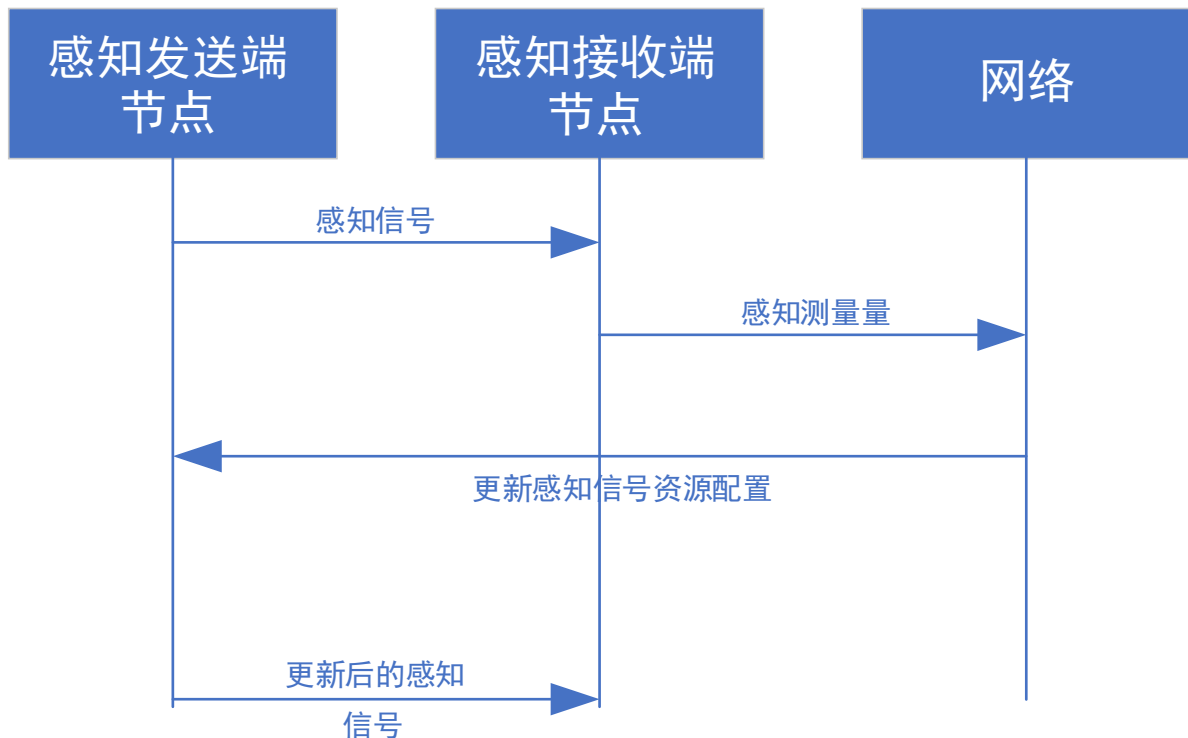


图 4-6. 感知信号资源链路自适应配置流程

在感知的链路自适应流程中，需要对功率、时间、频率和空间四个维度的资源配置进行自适应调节。网络需要获取的测量量以及对应的需要调整的资源配置主要包括以下几个方面：

功率资源的自适应调节



感知接收节点需要向网络反馈感知信号功率、感知SNR等，网络判断并执行感知信号发射功率的自适应调节。其中，感知信号功率表示经过感知目标反射的径或簇的信号功率，感知SNR表示感知信号功率与噪声的比值。

时间资源的自适应调节



感知接收节点需要向网络反馈的测量量包括：多普勒/速度、多普勒/速度的方差、时延/距离的方差和角度方差。其中，多普勒/速度的方差、时延/距离的方差和角度方差能够反映感知目标运动速度的变化情况。时间资源的自适应调节首先需要满足多普勒/速度的测量分辨率和最大不模糊测量范围。进一步地，较小的时域采样间隔能够提升感知信号功率和感知SNR；较大的感知帧时长会带来距离徙动等问题；较小的感知更新周期有利于维持对感知目标的稳定跟踪。其中，感知更新周期是指相邻两次执行感知信号处理所对应的感知信号之间的时间间隔。

频率资源的自适应调节



感知接收节点需要向网络反馈的测量量主要包括：感知目标的时延/距离。在满足时延/距离的测量分辨率和最大不模糊测量范围的约束条件的前提下，较小的频率采样间隔能够提升感知信号的处理增益，从而提升感知信号功率和感知SNR。

空间资源的自适应调节



感知接收节点需要向网络反馈的测量量主要包括：感知目标的角度。在满足角度的测量分辨率和最大不模糊测量范围的约束条件的前提下，选择较少的天线数量和较大的天线单元间隔能够降低感知信号的资源开销。

根据上述讨论，感知信号资源的链路自适应调节涉及的调节参数和对应的感知测量量如表4-4所示。

表 4-4. 感知信号资源链路自适应的测量量和参数

维度	调节参数	感知测量量
功率	EPRE	感知信号功率、感知SNR等
时间	时域采样间隔、感知帧时长、感知更新周期	多普勒/速度、多普勒/速度的方差、时延/距离的方差、角度的方差等
频率	频域采样间隔、带宽	时延/距离
空间	天线数量、天线单元间隔	角度





4.7 通感一体化移动性管理

通感一体化业务的连续性，包括了通信业务连续性和感知业务连续性两个方面。感知目标和感知信号收发节点的状态（包括空间位置、空间朝向、运动速度等）的改变，或者感知环境的改变，均有可能影响感知性能。除了通过通感一体化波束管理来保证通信小区内业务质量，网络还可能需要进行通感一体化移动性管理，即参与感知业务的节点（基站或UE）发生切换的机制来保证感知业务连续性以及持续保障感知QoS。

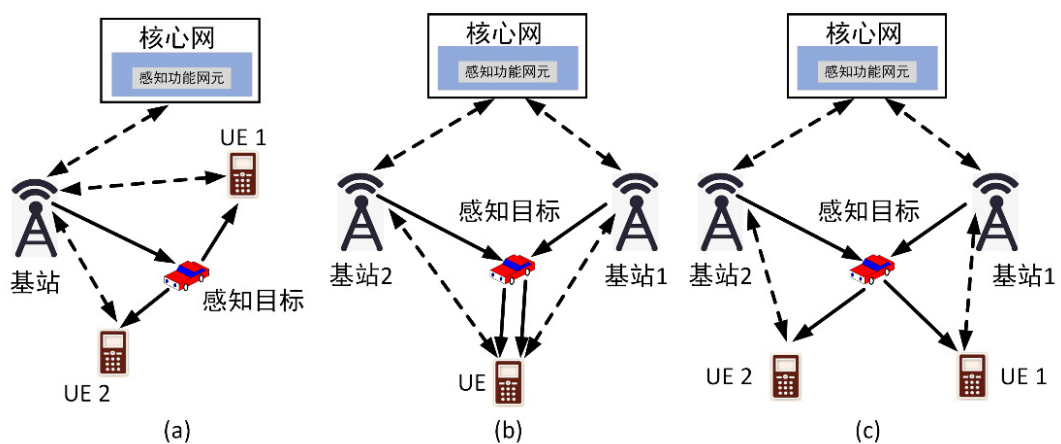


图4-7. 双基地感知模式下的感知节点切换场景示例



以下简要讨论几种典型的感知节点切换场景。以基站下行发送感知信号，UE接收该信号，对感知区域中的移动车辆进行测距测速作为例子，图4-7 (a) 给出了感知节点UE发生切换的场景。当目标车辆从UE 1附近移动到UE 2附近的过程中，经过目标车辆反射的感知信号质量可能会由于UE 1与目标车辆之间距离增大或者目标车辆RCS变化而显著降低，进而引起感知/通感一体化业务性能下降，甚至业务中断。基站或者感知网元可以根据所掌握的该区域内的UE信息，调度UE 2作为切换后的感知节点。图4-7(b) 给出了感知节点基站发生切换的场景。类似地，基站1（源感知节点）或者感知网元可以通过调度基站2（目标感知节点）作为切换后的感知节点，与UE一同继续完成感知/通感一体化业务。图4-7(c) 则是给出了基站与UE均发生切换的情况，即切换前为基站1与UE 1对目标车辆进行感知，切换后为基站2与UE 2对目标车辆进行感知。

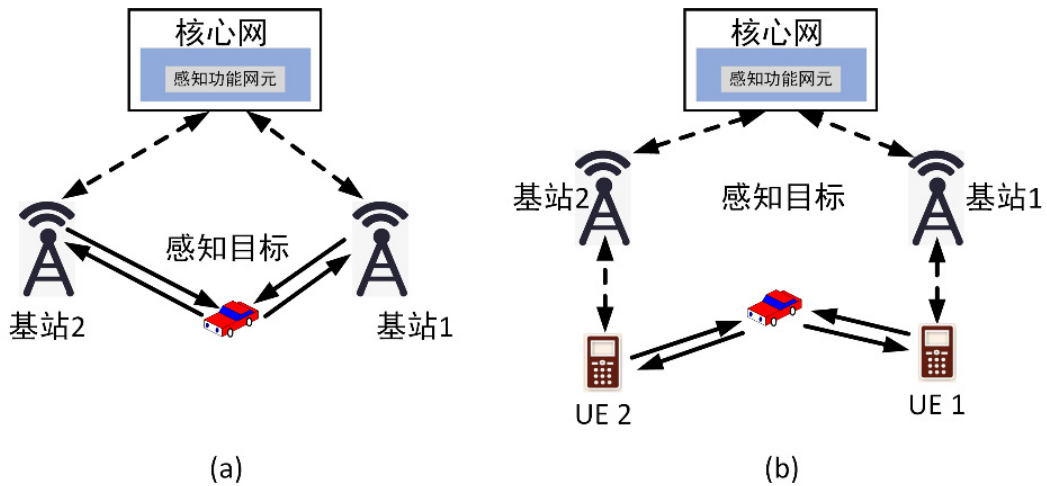


图4-8. 单基地感知模式下的感知节点切换场景示例

对于感知节点自发自收感知模式，为了保证感知/通感业务连续性，同样可能需要感知节点切换，如图4-8 (a)所示。基站1或感知网元可以根据所掌握的该区域内的其他基站信息，调度基站 2作为切换后的感知节点，进行自发自收感知。对于UE自发自收感知（图4-8 (b)），情况也类似。

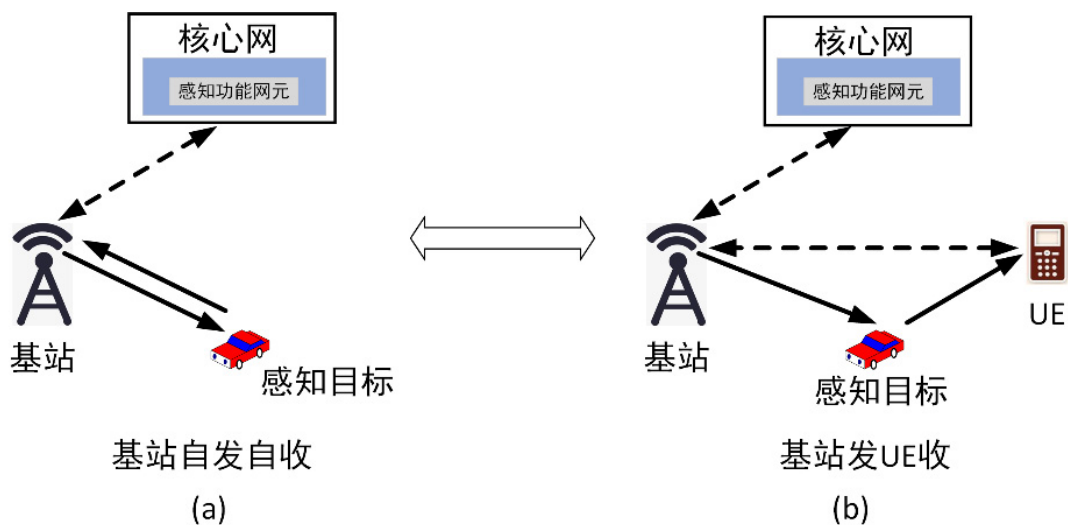


图4-9. 感知模式切换的示例

考虑到不同感知节点（包括基站、UE）感知能力的差异以及感知节点分布的不均匀性，感知节点切换时还可能伴随着感知模式的切换。仍然以对移动车辆测距测速为例子，图4-9给出了一个感知模式切换的示意图。假设在切换之前，基站通过自发自收感知信号的方式实现对目标车辆的感知。当目标车辆逐渐远离基站，由于感知信号回波路程增大或者目标车辆RCS变化，或者目标车辆RCS变化可能显著下降，进而引起感知/通感一体化业务性能下降甚至业务中断。此时，基站或者感知网元可以根据所掌握的该区域内的其他基站以及UE信息，调度目标车辆区域附近的UE与基站，通过基站发感知信号UE接收的方式对目标车辆进行持续测距测速。在这种场景下，切换后参与感知的基站与源基站可以是不同的基站。



4.8 感知非理想因素的消除

在通感一体化应用中，由器件的非理想性引起的感知非理想因素会导致严重的测量误差，进而影响感知精度[10, 23]。感知非理想因素主要包括：定时偏差、本振频率偏移、通道不一致性、时域随机相位。一些感知非理想因素对通信功能没有影响或者影响较小，但是对感知功能具有较大影响。感知信号的收发端之间共用时钟是解决定时偏移和本振频率偏移问题的最直接的方法[24]。下面介绍几种其他的感知非理想因素的消除方法。

(1)CSI商/共轭乘

- 对多个共用时钟源的接收天线的接收信号进行除法运算或者共轭乘运算，能够抑制收发端之间本振频率偏移和时域随机相位的影响，提取出感知目标的多普勒频移。
- CSI商/共轭乘方法的基本原理是，连接到同一射频和基带模块的两个天线接收信号所承受的本振频率偏移是相同的，经过除法运算或者共轭乘运算后很容易被去除。进一步地，在静态径的功率占主导地位的情况下，CSI商的方法能够提取出感知目标的多普勒频移，且不受多普勒频移的镜像频率的影响。
- CSI商或共轭乘的方法也存在一些局限性。首先，此种方法只能提取感知目标的多普勒频移，而无法解决定时偏差带来的时延模糊问题；第二，此种方法要求感知环境中只有感知目标主导的动态径（有多普勒频移），其他径均为静态径，这要求环境中不能存在其他运动目标。第三，由于会受到镜像频率的影响，共轭乘运算提取出的多普勒频移值是模糊的。

(2)参考径

- 参考径是在感知测量的环境中，基于先验信息能够事先确定其参数特征的径。基于参考径方法的核心思想是通过已知信号传播时延和多普勒频移的参考径来估计出叠加在这条径上的由定时偏差引起的时延和由载波频率偏移引起的多普勒，即定时偏移和本振频率偏移。如图4-10(a)所示，典型的可用作参考径的是视距（Line of Sight, LOS）径[25]。

● 当感知信号的收发端设备之间因为遮挡等原因而没有LOS径时，可以利用RIS作为中继从而获得参考径[26]，如图4-10(b)所示。已知RIS的位置，可以根据发送端设备、RIS和接收端设备之间的位置关系计算得到真实时延和真实多普勒，从而提取出定时偏移和本振频率偏移。进一步地，RIS可以对感知信号进行调制，感知信号的接收端通过RIS的调制信息可以识别出经过RIS反射的参考径[27]。

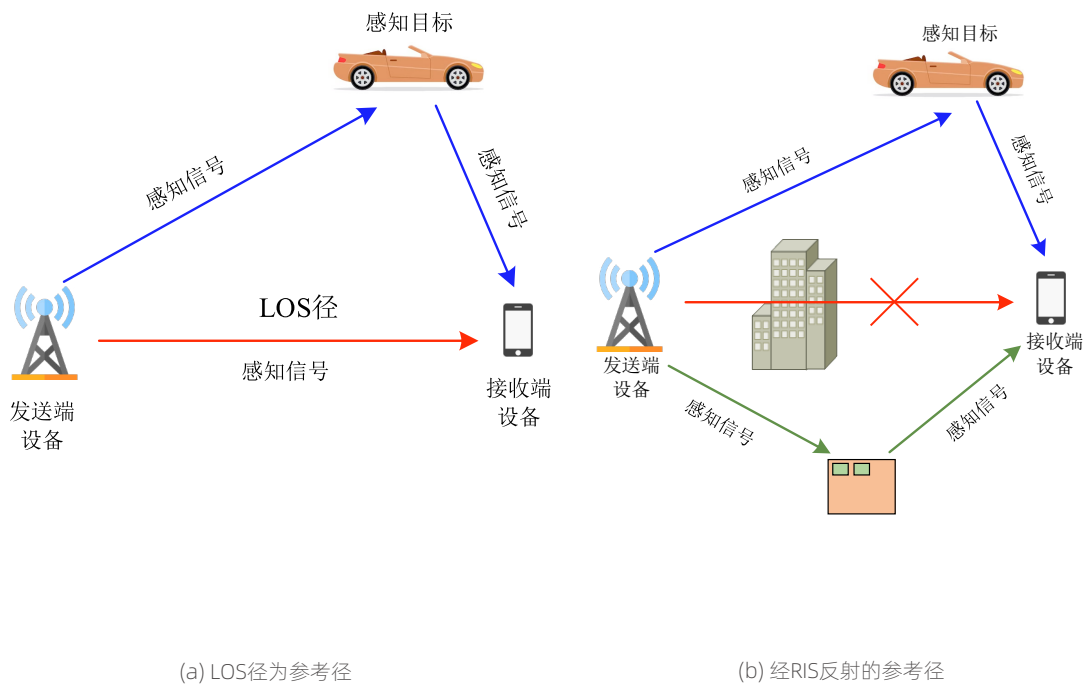


图 4-10. 参考径方法示意图

(3)往返测量

类似于NR定位中的往返时间（Round-Trip Time, RTT）方法[28]，在通感一体化系统中可以通过往返测量来估计出感知信号的收发端设备之间的定时偏移和本振频率偏移。其基本思想是，在较短的时间内（例如，几毫秒到几十毫秒），感知目标的运动状态（位置和速度）可以被认为保持不变；对于同一感知目标，基于感知信号的收发端设备之间相互收发感知信号，进行往返测量得到的信号传播时延和多普勒频移是相同的，而定时偏移和本振频率偏移的绝对值相同、正负号相反，因此可以提取或抑制定时偏移和本振频率偏移，如图4-11所示。

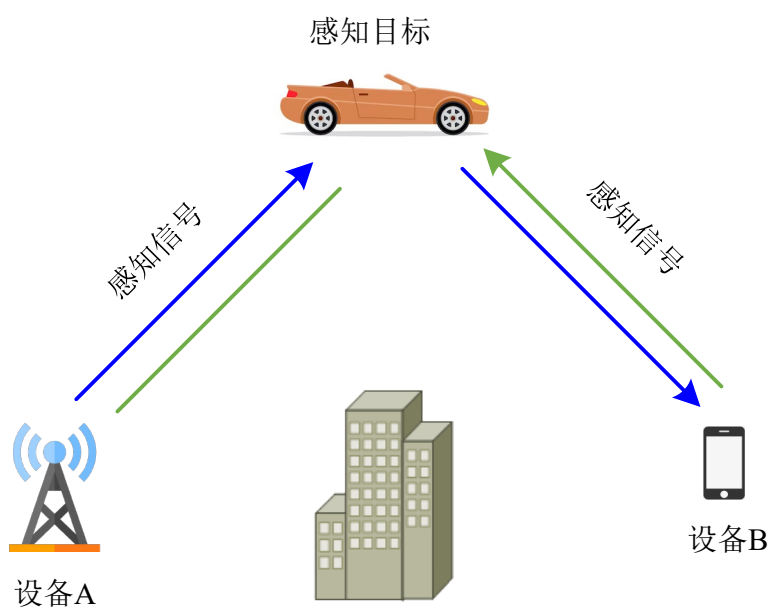


图 4-11. 往返测量方法示意图



4.9 感知安全隐私保护方案

感知功能的引入为无线通信系统提供了新的业务能力，但也带来了新的安全隐私问题，感知得到的一些信息中可能具有隐私性，存在信息泄露风险，例如感知目标的位置或行为，生命体征监测数据，特定区域的成像结果等。因此，需要相应的监管规则和手段规范感知应用，以及采用有效的技术手段对感知信息进行保护，防止隐私泄露以及其他安全事故的发生。下面对一些潜在的感知安全隐私保护方案进行说明。

(1) 感知信号加密

针对OFDM波形下感知信号特征，可以从无线感知信号发送和测量流程着手来解决感知结果的隐私问题。感知信号的发送或接收设备根据感知加密需求对感知信号进行加密处理，即通过时、频域序列加扰的方式对时延（距离）、多普勒（速度）等感知信息进行加密处理，只有获得加密信息的特定设备才能够获取正确的感知测量结果。将子载波个数为 N 、符号数为 M 的发送数据用矩阵形式表示为

$$X = \begin{pmatrix} c_{0,0} & \cdots & c_{0,M-1} \\ c_{1,0} & \cdots & c_{1,M-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N-1,0} & \cdots & c_{N-1,M-1} \end{pmatrix}$$

其中， $c_{k,l}$ 表示第 k 个子载波、第 l 个符号上承载的调制数据，以时延（距离）信息加密为例，基于加扰序列 $\{e^{-j\alpha_k}, k = 0, 1, \dots, N-1\}$ 对发送数据矩阵进行沿频域维度的加扰，接收信号可以表示为

$$Y'_{k,l} = c_{k,l} H'_{k,l} + W_{k,l} = c_{k,l} A_{k,l} \sum_{q=0}^{Q-1} e^{j2\pi T_O f_{D,q} l} e^{-j(2\pi k \tau_q \Delta f + \alpha_k)} e^{j\varphi_q} + W_{k,l}$$

其中， τ_q 表示第 q 个感知目标引起的时延， $f_{D,q}$ 表示第 q 个感知目标的相对速度带来的多普勒频移， T_O 为OFDM符号时长， $A_{k,l}$ 表示信道幅度衰减因子， $W_{k,l}$ 为噪声。基于原始发送信号 X ，采用LS信道估计得到的信道信息可以表示为

$$D'_{k,l} = \frac{Y'_{k,l}}{X_{k,l}} = A_{k,l} \sum_{q=0}^{Q-1} e^{j2\pi T_O f_{D,q} l} e^{-j(2\pi k \tau_q \Delta f + \alpha_k)} e^{j\varphi_q} + \frac{W_{k,l}}{X_{k,l}}$$

直接基于 D' 进行时延-多普勒检测无法得到准确的时延信息，需要利用加扰序列对检测结果进行恢复得到真实的检测结果，如图4-12所示。

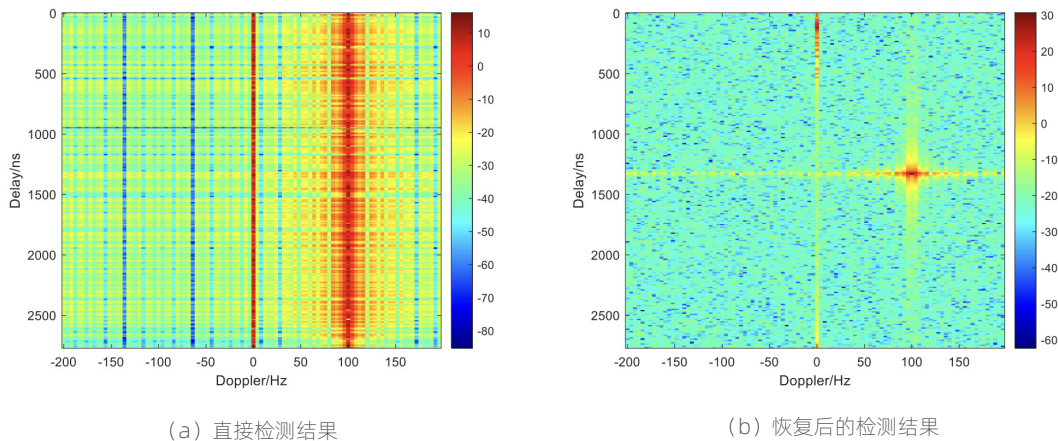


图4-12. 基于序列加扰的感知信息加密与恢复

(2) 感知功能的启用/禁用

随着感知技术的不断发展，未来将会涌现出更多的无线感知功能，并且安全隐私要求也将更加多样化和复杂化。为解决多样化的感知安全隐私需求，可根据安全隐私要求或政策规定按一定条件启用或禁用部分指定设备的感知功能。例如，在某些场合下，需要禁用部分基站的感知功能，以防止这些基站被用于跟踪用户的位置信息。也可以根据实际情况，对设备特定的感知功能进行启用或禁用。例如对天气情况和空气质量监测等一些隐私要求低的感知功能不作限制，但是对生命体征、位置信息等隐私要求高的感知功能进行禁用。

(3) 感知授权和鉴权

为了保护感知区域和感知目标的隐私，以及感知设备的安全，网络需要基于授权信息判断感知请求是否被允许。面向6G通感移动网络需解决多个维度的感知授权和鉴权，包括：（1）感知区域的授权和鉴权；（2）感知目标的授权鉴权；（3）UE、基站和网络功能作为感知设备的授权和鉴权。

感知区域是网络进行感知的区域，例如无人机监管应用场景中的禁飞区域等。感知目标是移动网络进行感知的对象，例如手势及动作识别应用场景中的人等。感知区域和感知目标的授权信息可以由对应区域和目标所有者或管理者提供，可以包括是否允许感知，允许被感知的内容（如距离、速度、呼吸等），允许的感知请求方，允许的感知结果接收方和允许的感知精度等信息。感知区域和感知目标的授权由网络功能维护，可按照感知地理位置范围或感知业务属性等由多个网络功能实例进行维护和使用。



3GPP感知与非3GPP感知的融合

我们将基于5G/6G通感一体化系统的感知称为3GPP感知，而将除3GPP感知以外的感知方式称为非3GPP感知。典型的非3GPP感知模块有：毫米波雷达、摄像头、加速度计/陀螺仪等。3GPP感知与非3GPP感知互为补充、高效融合，是对物理世界进行更便捷、更高效、更精确的数字化构建的重要途径。

3GPP感知与非3GPP感知的融合，主要有以下几个方面

UE或基站上配备的非3GPP感知模块，例如全球定位系统（Global Positioning System, GPS）、加速度计、陀螺仪等，能够提供UE或基站的位置、速度和姿态等状态信息。一方面，一些感知非理想因素的消除方法的实施依赖于UE或基站的状态信息；另一方面，从感知测量量到感知结果的转换也强烈依赖于UE或基站的状态信息。因此，UE或基站的状态信息的准确程度决定了最终感知结果的准确程度。

3GPP感知获得感知目标的距离/速度/角度或点云信息后，有时很难与物理世界中的真实感知目标进行精准的匹配。非3GPP感知有助于解决该问题。例如，通过摄像头获得感知目标的数量和类型，然后将3GPP感知获得的距离/速度/角度或点云信息关联到这些感知目标。

3GPP感知与非3GPP感知获得的测量量进行融合，具有如下效果：相同类型的感知测量量的融合能够提升感知精度，不同类型的感知测量量的融合能够丰富感知测量量的类型、使得感知结果更加多维立体。

3GPP感知与非3GPP感知之间能够进行协作，以提升感知效率。例如，非3GPP感知提供的信息，可以作为感知先验信息，从而减小3GPP感知的搜索范围、或者提升感知信号处理的效率。

为了实现3GPP感知与非3GPP感知的高效融合，需要对非3GPP感知的测量量进行标准化，需要网络例如核心网支持对非3GPP感知和3GPP感知的统一控制。

RIS辅助的通感一体化技术

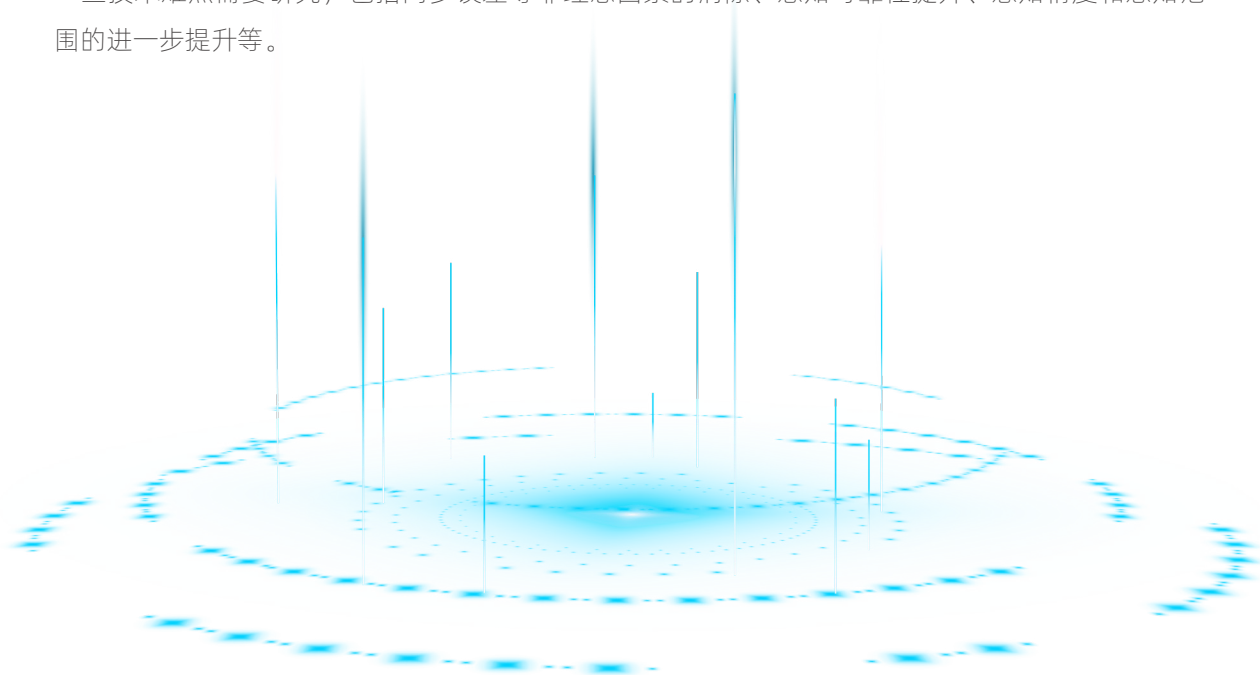
RIS辅助的定位系统可以通过优化RIS的相位调整参数来提升定位精度。文献[29]通过分析定位系统的CRB指出最大化虚拟 LOS 路径（即信号从发射端经RIS反射后到达接收端的路径）的信号强度可以获得最优的CRB。因此，RIS的波束对准操作在RIS辅助定位流程中是关键环节，直接影响RIS辅助定位的精度；同时，RIS的转发波束角度也可以作为定位估计流程中的辅助信息，来确定终端相对于RIS的位置。

对环境中的无源物体进行感知时，接收端需要通过信号处理从多径信号中分离出感知物体的反射路径，根据感知物体的反射路径信息估计感知物体的特征。目前无源感知的算法主要集中在收发端的设计，RIS 辅助的无源感知技术为感知物体的反射路径的获取提供一个新的信号处理维度。此外，RIS 反射波束可以形成基站的镜像，扩展对感知物体的观测角度[30]。RIS的反射信号也可以作为干扰路径的抵消信号，提升感知物体对应的路径的信号比重[31]。

Backscatter辅助的通感一体化技术

反向散射通信（Backscatter Communication）是实现极低功耗通信最具代表性的技术之一。反向散射设备，例如射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）标签，具有低成本、低功耗、易于大规模部署的特点。Backscatter辅助的通感一体化，通过将标签设备安装在特定感知目标上或者部署在特定感知区域，相比于设备解耦（Device-free）的通感一体化，在实现基本感知功能的同时，还能够获取额外的感知目标信息，从而进一步增强通感一体化的性能。

现有研究表明，Backscatter辅助的通感一体化具备以下优势：辅助与增强感知、提高感知SNR、实现微小信号感知、增大感知范围等[32-36]。此外，高速率远距离反向散射技术[37]，为实现蜂窝化的、基于反向散射的通感一体化打下了基础。目前，Backscatter辅助的通感一体化仍然存在一些技术难点需要研究，包括同步误差等非理想因素的消除、感知可靠性提升、感知精度和感知范围的进一步提升等。

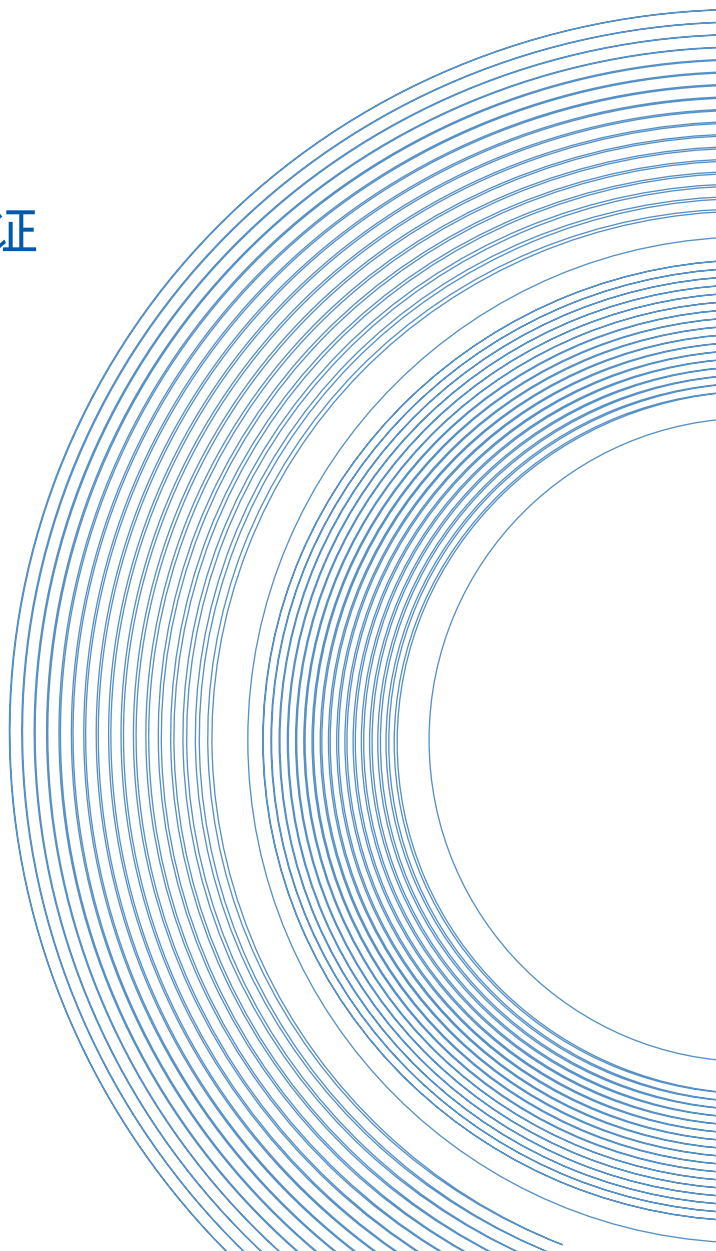


05

第五章

通感一体化信道建模与样机验证

信道测量与建模是仿真评估的基础。而仿真评估和样机验证，有助于发现通感一体化系统在原理验证、系统设计、硬件实现、算法设计等各个环节上存在的潜在问题，挖掘对应的解决方案，推动通感一体化技术的成熟与落地。本章围绕信道测量和建模，通感一体化样机验证进行分析。





5.1 信道测量与建模

通感一体化信道建模为各种关键技术的研究和仿真评估提供了基础，通过信道测量能够进一步了解不同场景感知信道的特性和变化规律，为信道建模提供参考依据。vivo通信研究院联合北京交通大学对人体呼吸、跌倒等室内场景通感一体化信道进行了测量与基于射线追踪（Ray tracing, RT）的仿真泛化[38, 39]。通过对仿真和实测信道参数的分析可知，通信信道和感知信道的统计特性存在一定相似性和规律性，通感信道建模基于已有通信信道模型进行演进是合理且可行的。

目前3GPP TR 38.901已经支持0.5~100GHz频段的通信信道模型[40]，主要用于通信系统性能评估，未考虑感知系统功能。通感一体化信道建模可以基于3GPP TR 38.901中的基于几何的随机建模（Geometry Based Stochastic Model, GBSM）方法的基础上增加对感知目标的建模，也可以采用射线追踪（Ray tracing, RT）等方法进行确定性建模。

通感一体化信道建模时需要考虑感知目标关联的信道簇和非感知目标关联的信道簇。其中，基于3GPP TR 38.901进行建模时，对感知目标的建模可以采用分段建模或不分段建模两种建模思路[39]。分段建模方案是将感知发送端到感知目标之间的信道和感知目标到感知接收端之间的信道建模为两段级联的信道。在每段信道生成时，均可以建模LOS和NLOS簇，刻画出与感知目标关联的多次反射和多次反射信道簇的信道特征。每段信道的簇时延、功率、角度等参数沿用3GPP TR 38.901小尺度建模流程生成。可以根据感知发送端、感知接收端的信道特征，以及感知目标移动导致的相位变化来整体生成感知发送端到感知接收端的信道系数。也可以分别生成感知发送端到感知目标、感知目标到感知接收端的信道系数，再将两段信道系数进行卷积生成最终的信道系数。不分段建模则是将感知发送端到感知目标之间的信道和感知目标到感知接收端之间的信道建模为一段联合的信道，将感知目标建模为单个或多个感知簇，感知簇的时延、角度信息根据感知目标的位置确定性生成。不分段建模仅考虑与感知目标关联的多次反射信道簇的信道特征（与感知目标关联的多次反射信道簇暂不考虑，或者采用随机生成的方法），也可视为分段建模方法的简化版本。

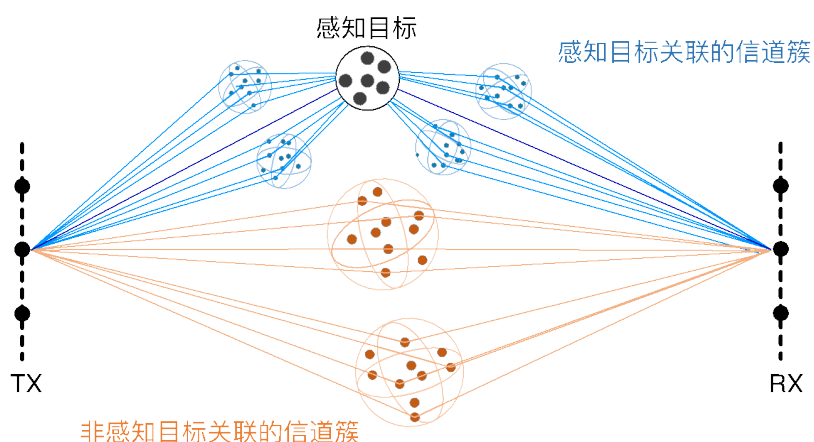


图5-1. 感知信道模型的分段建模思路示意图

非感知目标（例如环境杂波）关联的信道簇可以对非感知目标进行统计性建模，根据3GPP TR 38.901信道模型随机生成，也可以在环境中随机撒放若干个非感知目标，根据其3D位置生成关联的信道簇（生成方式可参考感知目标）。将感知目标关联的信道簇和非感知目标关联的信道簇进行合并，并叠加大尺度衰落，得到最终的信道系数。大尺度建模中的路径损耗建模与感知目标和收发节点位置以及感知目标RCS特征关联。其中，感知目标的RCS特征也可以体现在小尺度建模中对信道簇功率的影响。



5.2 样机验证

(1) 单基地测距测速通感一体化样机

一种典型的通感一体化业务是在通信的同时实现对无线信号传播环境中行人或其他移动物体的测距和测速。为了验证该业务的可行性，我们开发了单基地测速测距原型样机。该样机是一套基于OFDM的通感一体化系统。样机的硬件部分主要包括两个通用软件无线电外设(Universal Software Radio Peripheral, USRP)，如图5-2所示。其中，USR1为通信发射机，USR2为通信接收机，此外USR1也作为感知发射机和接收机。

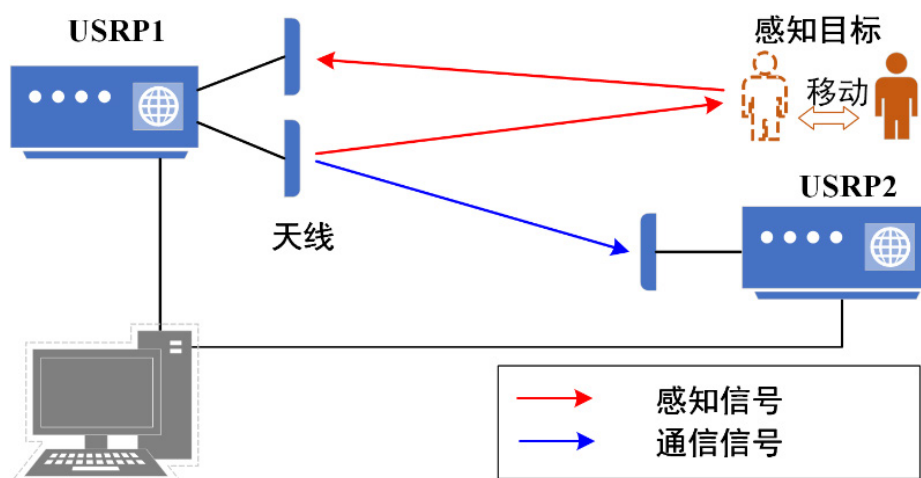


图5-2. 单基地测距测速通感一体化样机结构示意图

通信和感知信号的后处理由一台计算机完成。由于感知信号的发送端和接收端共用同一个射频模块和基带模块，因此该样机的感知模式类似于单基地雷达。为了抑制从发射天线到感知接收天线的直接路径的干扰，将这两根天线放置在适当的距离(以下测试中两根天线相距为0.8m)。行人和角反射器作为感知目标，其中角反射器固定在导轨的移动平台上。导轨平台的运动速度可根据试验要求设定，作为测试真值。图5-3展示了样机的实物照片。



图5-3. 单基地测距测速通感一体化样机实物照片

实际测试时中心频点为4 GHz，带宽400 MHz。样机基于收发天线隔离的单基地感知方式，实现了区域内目标的实时测距测速功能。我们将物理下行共享信道解调参考信号（Physical Downlink Shared Channel- Demodulation Reference Signal, PDSCH-DMRS）作为感知信号。在测试之前，需要对环境杂波信号进行采集便于在后期进行杂波抑制，实现静态目标检测。感知目标的测距和测速通过常用的二维快速傅里叶变换（Two-Dimensional Fast Fourier Transformation, 2D-FFT）[41]完成。在进行感知之前，系统对环境杂波进行记录，然后在执行感知业务时将环境杂波从距离-速度谱中减去。为了降低噪声的干扰，可以对静态杂波进行多次测量并取平均值。此外，通过在环境中布置一些距离精确已知的目标作为参考，消除了设备非理想因素导致的固定时延偏移。详细的信号处理流程，包括算法设计，可以参考文献[42]。

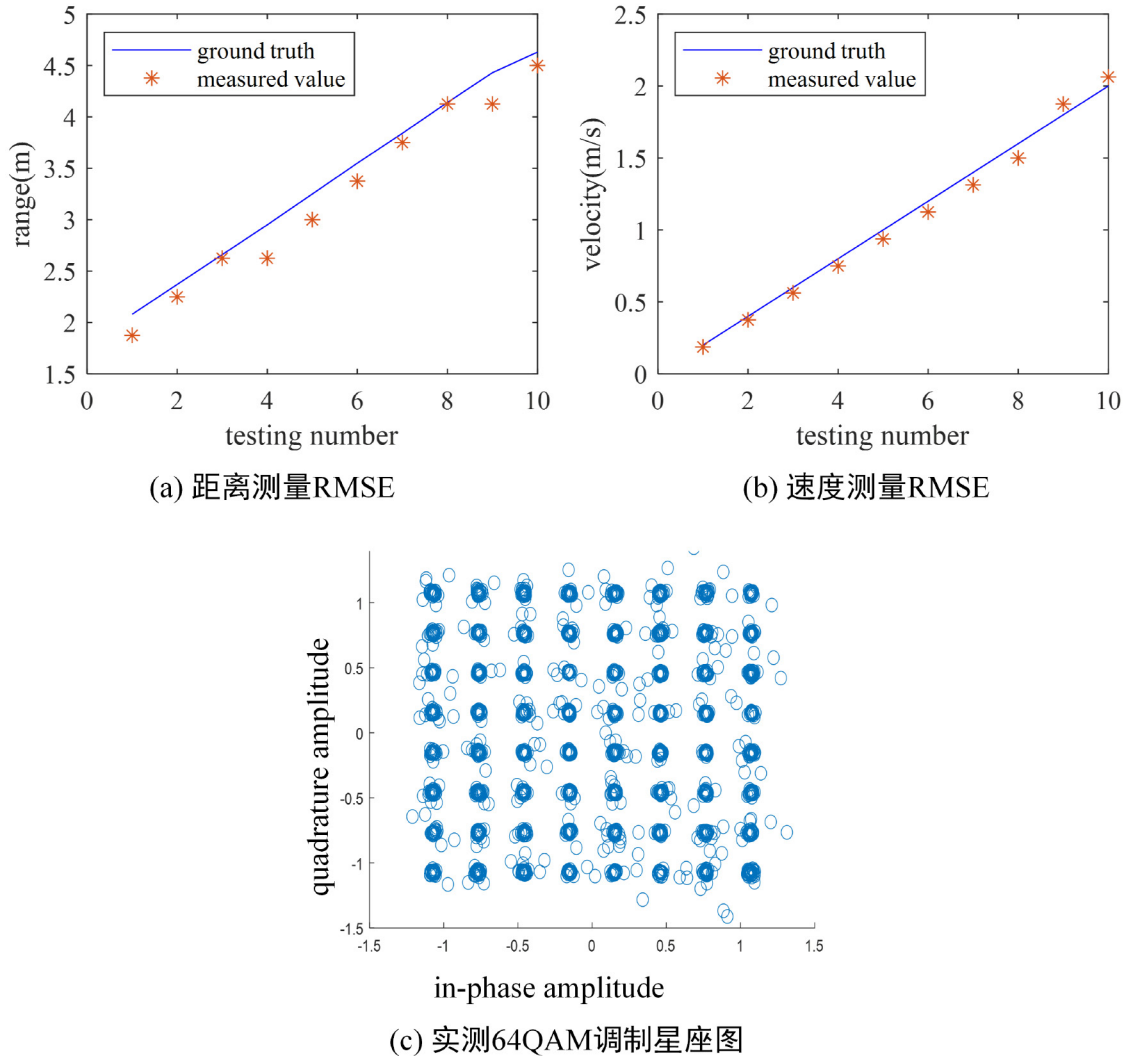


图5-4. 单基地测距测速测感一体化样机测试结果示例

该样机经过了IMT-2030（6G）推进组的认证测试。距离测量结果如图5-4（a）所示，测量距离的均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）约为0.1935m。在速度测量中，运动目标朝向感知接收机接收天线的速度在0.2m/s ~ 2m/s之间变化。速度测量结果如图5-4（b）所示，测量速度的RMSE约为0.0643m/s。此外，在进行目标感知的时候，通信也是同步进行的，图5-4（c）展示了实测64QAM星座图，实测通信吞吐量约为1.213Gbps，该结果与通信配置参数的理论预测相符。

(2) 双基地呼吸监测通感一体化样机

健康监测是通感一体化的一种典型应用场景，而健康监测中最常见的用例之一是呼吸感知。vivo通信研究院基于商用5G小基站和自研5G终端，开发了呼吸监测原型样机，能够在通信的同时实现人体呼吸频率监测。

由于人体胸腔运动，导致接收机侧获取的下行信道状态信息（Channel State Information, CSI）的相位也随着呼吸运动周期性变化。通过提取该相位变化，可以实现呼吸频率监测。实际环境中由于收发时钟的差异，通常存在频偏和相位噪声等非理想因素，会对基于CSI幅度或相位的呼吸监测性能产生影响。我们采用不同接收天线CSI商或共轭乘的方法消除上述非理想因素[43]。

基于5G系统实现的呼吸监测原型样机如图5-5所示。其中心频点为3.6 GHz，带宽为100 MHz。采用基站发送感知信号、终端接收感知信号的双基地感知方式。样机使用1根发射天线和4根接收天线，利用信道状态信息参考信号（Channel State Information-Reference Signal, CSI-RS）作为感知信号，其中CSI-RS发送周期为20 ms，频域密度为1，即1个物理资源块（Physical Resource Block, PRB）中包含1个用于承载CSI-RS的资源单元（Resource Elements, RE）。由于是复用5G系统下行参考信号进行感知，没有增加额外的感知信号资源开销，因此对通信速率无影响，可以正常进行上下行通信业务。

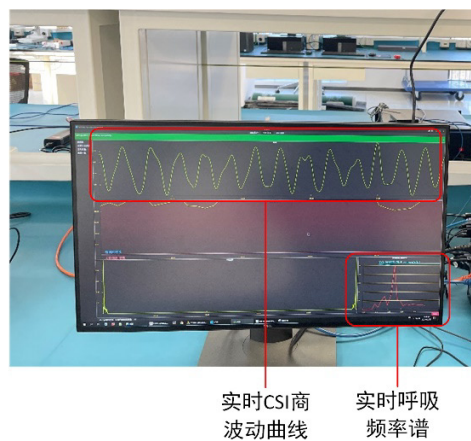


图5-5. 双基地呼吸监测通感一体化样机实物照片



终端获取频域信道响应原始数据后，进行了抑噪、离群值剔除、平滑滤波等预处理。然后，终端对数据在天线域和频域上进行筛选和合并，提取多普勒域信息，获得呼吸检测结果。如图5-6所示。

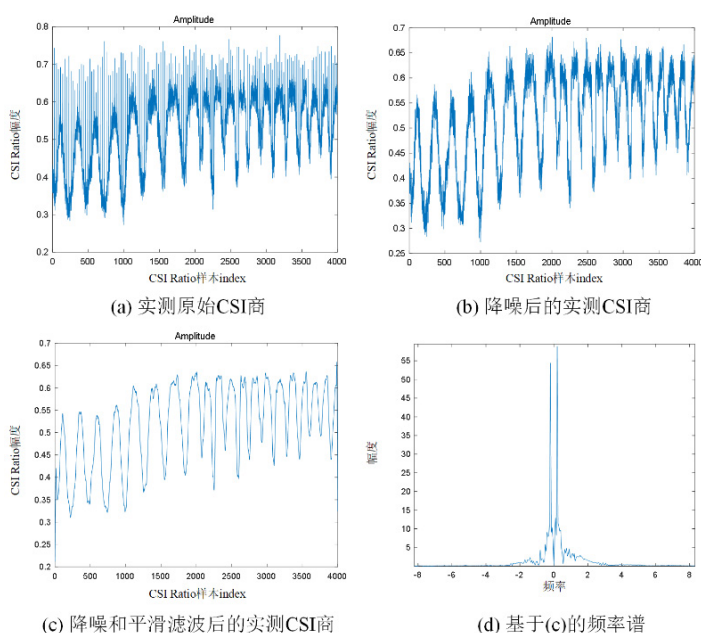


图5-6. 呼吸监测通感一体化样机实测数据处理结果示例

(3) 双基地多点协作轨迹追踪通感一体化样机

对移动目标的定位和轨迹追踪也是一种典型的通感一体化应用。网络可以通过多点协作感知的方式，实现行人、车辆、无人机等目标的轨迹追踪。为了验证双基地感知模式下多点协作感知的可行性，我们基于自研5G终端，搭建了轨迹追踪通感一体化样机。

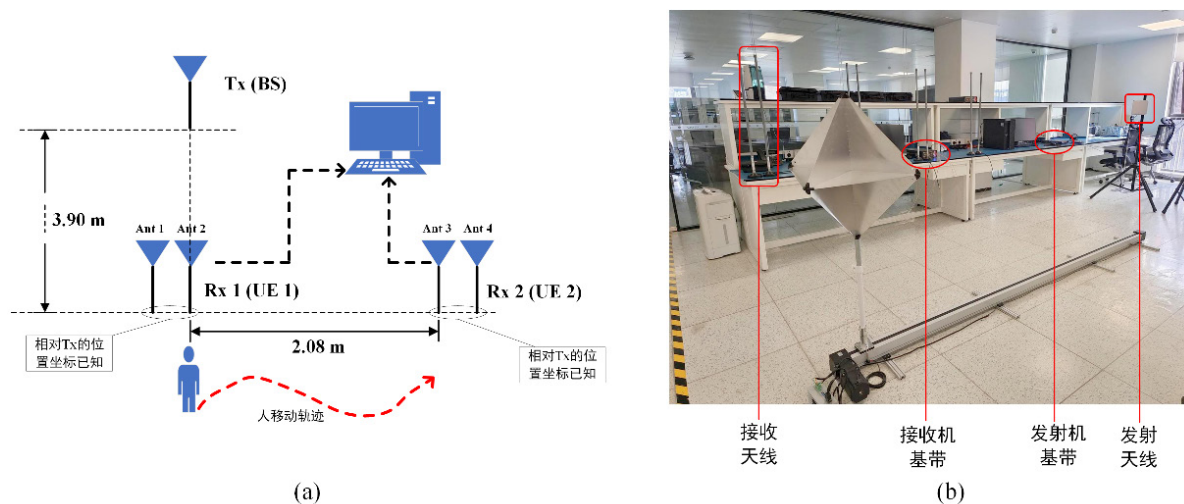


图5-7. 多点协作轨迹追踪通感一体化样机 (a) 系统框图 (b) 实物照片

多点协作轨迹追踪通感一体化样机采用1个8通道USRP设备，模拟基站发送感知信号，发送天线端口数为1，信号载频为4 GHz，带宽为100 MHz。同时，采用另1个8端口USRP设备，模拟2到4个接收终端（每个终端接收天线端口数为4个或者2个）。在实际测试中，至少两个接收端连续获取下行CSI。基于该下行CSI可获得经感知目标（人体）反射到达终端的动态反射径的多普勒频率。该多普勒频率值被发送到一台计算机上，计算机基于至少两个终端发送的多普勒频率值，结合各个终端接收天线、基站发射天线的位置坐标，计算得到目标的速度大小和方向，并进一步估计出行人运动轨迹。图5-7 (a)展示了整体系统框图（以两个接收终端为例），图5-7 (b)为样机的实物图片。

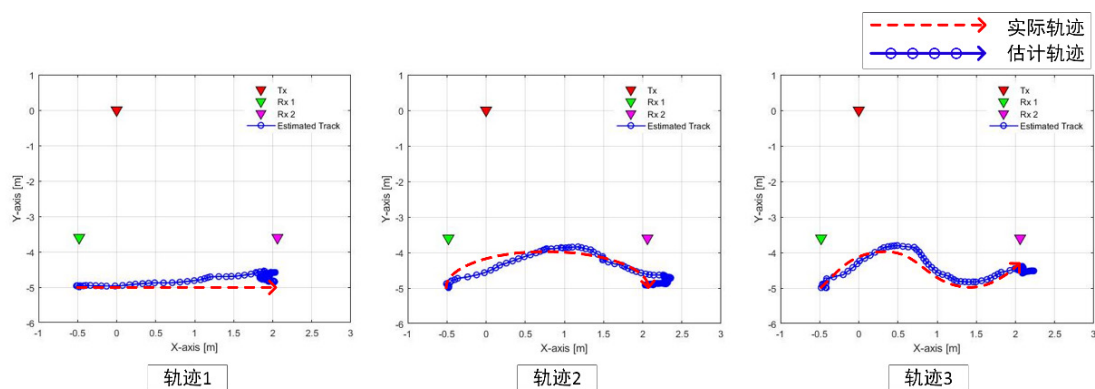


图5-8. 轨迹追踪结果示例

信号处理方面，使用了多重信号分类器（Multiple Signal Classification, MUSIC）估计动态反射径的多普勒频率。每次估计，使用了时域上连续50个CSI样本，CSI-RS周期为10 ms。在总共500 ms时间内，行人近似匀速运动。图5-8展示了行人不同移动轨迹的测试结果，其中红色曲线为行人真实走动轨迹，蓝色曲线为估计轨迹，可以看到估计轨迹可以与实际轨迹较好吻合。

由于收发两端是时钟是独立的，因此存在收发端本振频率偏差，引起载波频率偏移。该频偏与多普勒频偏叠加在一起，造成轨迹估计误差。在我们的样机中，分别测试了CSI商和基于参考径（例如LOS径）校准两种频偏消除方法，结果表明两种方法都能得到准确的多普勒估计值。在后续的研究中，我们将继续完善多点协作轨迹追踪通感一体化样机的通信功能，以及持续提升轨迹感知的精度和可靠性，实现终端上下行通信的同时，对环境中移动目标进行实时高精度定位和轨迹追踪。

06

第六章

结 束 语

相比前几代移动通信系统，预计6G系统的频段将更高，带宽将更大，同时具有更大规模天线和更密集的网络部署。通过通感一体化，6G在提供超强通信能力的同时，还可以提供高精度的感知服务。6G系统将原生支持通信与感知的一体化设计，通过通感一体化波形和信号设计、多频段协同感知、多天线通感一体化技术、多点协作感知、感知的链路自适应技术、通感一体化移动性管理、感知非理想因素的消除技术、感知安全隐私保护方案等关键技术，同时提升通信和感知的性能，降低感知带来的资源开销，支撑更加丰富的感知功能和场景。

参考文献

- [1] vivo, 数字生活2030+白皮书, 2020年10月
- [2] vivo, 6G愿景、需求与挑战白皮书, 2020年10月
- [3] vivo, 6G服务, 能力与使能技术, 2022年7月
- [4] ITU-R, "Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond," June 2023.
- [5] 3GPP TR 22.837, "Feasibility Study on Integrated Sensing and Communication", November 2022.
- [6] Ali, Anum, et al. "Leveraging sensing at the infrastructure for mmWave communication." *IEEE Communications Magazine* 58.7 (2020): 84-89.
- [7] Ali, Anum, Nuria González-Prelcic, and Amitava Ghosh. "Passive radar at the roadside unit to configure millimeter wave vehicle-to-infrastructure links." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 69.12 (2020): 14903-14917.
- [8] González-Prelcic, Nuria, Roi Méndez-Rial, and Robert W. Heath. "Radar aided beam alignment in mmWave V2I communications supporting antenna diversity." 2016 *Information Theory and Applications Workshop (ITA)*. IEEE, 2016.
- [9] Chen, Xu, et al. "Sensing-aided uplink channel estimation for joint communication and sensing." *IEEE Wireless Communications Letters* 12.3 (2022): 441-445.
- [10] D. Zhang, D. Wu, K. Niu, X. Wang, F. Zhang, J. Yao, et al. "Practical issues and challenges in CSI-based integrated sensing and communication." 2022 *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. IEEE, 2022.
- [11] Abdullah, Raja Syamsul Azmir Raja, et al. "Lte-based passive bistatic radar system for detection of ground-moving targets." *Etri Journal* 38.2 (2016): 302-313.
- [12] N. J. Willis, *Bistatic Radar*, Artech House, 1995.
- [13] Kingsley S, Quegan S. *Understanding radar systems*, 1999.
- [14] Huang, Yixuan, et al. "Constant envelope OFDM RadCom fusion system." *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2018 (2018): 1-15.
- [15] Chen, Lu, et al. "FDSS-Based DFT-s-OFDM for 6G Wireless Sensing." *Sensors* 23.3 (2023): 1495.
- [16] Kumari, Preeti, et al. "IEEE 802.11 ad-based radar: An approach to joint vehicular communication-radar system." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 67.4 (2017): 3012-3027.
- [17] Koslowski, Sebastian, Martin Braun, and Friedrich K. Jondral. "Using filter bank multicarrier signals for radar imaging." 2014 *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium-PLANS 2014*. IEEE, 2014.
- [18] Gaudio, Lorenzo, et al. "Performance analysis of joint radar and communication using OFDM and OTFS." 2019 *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. IEEE, 2019.
- [19] Jia, Wenkai, et al. "Integrated communication and localization system with OFDM-chirp waveform." *IEEE Systems Journal* 14.2 (2019): 2464-2472.
- [20] Costas, John P. "A study of a class of detection waveforms having nearly ideal range—Doppler ambiguity properties." *Proceedings of the IEEE* 72.8 (1984): 996-1009.
- [21] Han, Zhu, Husheng Li, and Wotao Yin. *Compressive sensing for wireless networks*. Cambridge University Press, 2013.
- [22] Li, Jian, and Petre Stoica. *MIMO radar signal processing*. John Wiley & Sons, 2008.
- [23] Zhuo, Yiwei, et al. "Perceiving accurate CSI phases with commodity WiFi devices." *IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications*. IEEE, 2017.

- [24] Zhang, J. Andrew, et al. "Integration of radar sensing into communications with asynchronous transceivers." *IEEE Communications Magazine* 60.11 (2022): 106-112.
- [25] Zhang, Ying, et al. "Multiple Doppler estimation based ICI elimination scheme in OFDM over high-mobility channels with LoS path." 2013 19th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC). IEEE, 2013.
- [26] Liu, Yuanwei, et al. "Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities." *IEEE communications surveys & tutorials* 23.3 (2021): 1546-1577.
- [27] Aubry, Augusto, Antonio De Maio, and Massimo Rosamilia. "Reconfigurable intelligent surfaces for N-LOS radar surveillance." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 70.10 (2021): 10735-10749.
- [28] Park, SangYoung, Hyo-Sung Ahn, and Wonpil Yu. "Round-trip time-based wireless positioning without time synchronization." 2007 International Conference on Control, Automation and Systems. IEEE, 2007.
- [29] He, Jiguang, et al. "Large intelligent surface for positioning in millimeter wave MIMO systems." 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring). IEEE, 2020.
- [30] Shao, Xiaodan, Changsheng You, and Rui Zhang. "Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Sensing: Applications and Design Issues." *arXiv preprint arXiv:2302.05864* (2023).
- [31] Tewes, Simon, et al. "IRS-enabled breath tracking with colocated commodity WiFi transceivers." *IEEE Internet of Things Journal* 10.8 (2022): 6870-6886.
- [32] Lazaro, Antonio, et al. "Car2car communication using a modulated backscatter and automotive fmcw radar." *Sensors* 21.11 (2021): 3656.
- [33] 韩凯峰, 刘铁志. "基于反向散射通信的车辆精准定位技术." *电信科学* 36.7: 107-117.
- [34] Lin, Yuancan, et al. "DropMonitor: Millimeter-level Sensing for RFID-based Infusion Drip Rate Monitoring." *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies* 5.2 (2021): 1-22.
- [35] Wei, Teng, and Xinyu Zhang. "Gyro in the air: tracking 3D orientation of batteryless internet-of-things." *Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. 2016.
- [36] Wang, Ju, et al. "TagScan: Simultaneous target imaging and material identification with commodity RFID devices." *Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. 2017.
- [37] Daskalakis, Spyridon, et al. "A printed millimeter-wave modulator and antenna array for low-complexity Gigabit-datarate backscatter communications." (2021).
- [38] R. Pan, D. He, K. Guan, X. Sun, D. Jiang and F. Qin, "Channel Measurement and Analysis for Human Exhalation and Inhalation in Living Room Scenario," 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring), Florence, Italy, 2023, pp. 1-5.
- [39] IMT-2020 (5G) 推进组, 5G-Advanced通感融合仿真评估方法研究报告, 2023-06.
- [40] 3GPP TR 38.901, Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz.
- [41] Zhou, Kainan, and Yong Huat Chew. "Performance of 2D FFT modulated signal over multipath fading channels." 2004 IEEE 15th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (IEEE Cat. No. 04TH8754). Vol. 2. IEEE, 2004.
- [42] Ding, Shengli, et al. "Integrated Sensing and Communication: Prototype and Key Processing Algorithms." *ICC Workshops-2023 IEEE International Conference on Communications Workshops*. IEEE, 2023.
- [43] Zeng, Youwei, et al. "FarSense: Pushing the range limit of WiFi-based respiration sensing with CSI ratio of two antennas." *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies* 3.3 (2019): 1-26.

缩略语

英文缩写	英文全称	中文
2D-FFT	Two-Dimensional Fast Fourier Transformation	二维快速傅里叶变换
3GPP	3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
5G	The fifth generation mobile communication systems	第五代移动通信系统
6G	The sixth generation mobile communication systems	第六代移动通信系统
CEF	Channel Estimation Field	信道估计字段
CE-OFDM	Constant Envelope-OFDM	恒包络正交频分复用
CSI	Channel State Information	信道状态信息
CSI-RS	Channel State Information-Reference Signal	信道状态信息参考信号
DFT-s-OFDM	Discrete Fourier Transform Spread-OFDM	离散傅里叶变换扩展正交频分复用
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	欧洲电信标准协会
FBMC	Filter-Bank Multi-Carrier	滤波器组多载波
FDSS	Frequency Domain Spectrum Shaping	频域赋形
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave	调频连续波
GBSM	Geometry Based Stochastic Model	基于几何的随机建模
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
ICI	Inter-Carrier Interference	子载波间干扰
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	电气电子工程师学会
ISI	Inter-Symbol Interference	符号间干扰
ITU-R	International Telecommunication Union-Radio communication Sector	国际电信联盟-无线通信部门
LFM	Linear Frequency Modulation	线性调频信号

英文缩写	英文全称	中文
LOS	Line Of Sight	视距
LS	Least-square	最小二乘
MIMO	Multiple Input Multiple Output	多输入多输出
MUSIC	Multiple Signal Classification	多重信号分类器
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
OOB	Out-Of-Band	带外
OQAM	Offset Quadrature Amplitude Modulation	偏移正交幅度调制
OTFS	Orthogonal Time Frequency Space	正交时频空
PAPR	Peak to Average Power Ratio	峰值平均功率比
PCC	Policy and Charging Control	政策和计费控制
PDSCH-DMRS	Physical Downlink Shared Channel-Demodulation Reference Signal	物理下行共享信道解调参考信号
PRB	Physical Resource Block	物理资源块
RE	Resource Elements	资源单元
SC-FDE	Single Carrier Frequency Domain Equalization	单载波频域均衡
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio	信干噪比
SNR	Signal to Noise Ratio	信噪比
STF	Short Training Field	短训练字段
UE	User Equipment	终端
Umi	Urban Micro	城市微蜂窝
VA	Virtual Array	虚拟阵列



版权信息：

本白皮书版权专属维沃移动通信有限公司（以下简称“vivo”）所有，并受法律保护。如需基于非商业目的引用、转载、传播或以其他方式合理使用本白皮书的全部或部分内容，应完整注明来源。违反前述声明者，vivo将追究其法律和商业道德之责任。