



网络协作通感一体化技术 白皮书

(2023 年)

中国移动通信集团有限公司

编制单位：中移智库、中国移动通信研究院、华为技术有限公司、中兴通讯股份有限公司、中信科移动通信技术股份有限公司、上海诺基亚贝尔股份有限公司、维沃移动通信有限公司、OPPO广东移动通信有限公司

前 言

面向 2030 年的 6G 网络将是通信、感知、计算、AI、安全、大数据一体融合的新一代移动信息网络，多维能力的一体融合将成为 6G 发展的重要趋势。通信感知一体化作为 6G 关键技术之一，将赋能网络从传递信息到感知世界扩展，推动社会走向虚拟与现实相结合的数字孪生世界，实现 6G 美好愿景。在未来，依托规模部署的移动通信网络构建高性能通感网络，可实现“一网两用”，即利用移动通信网络广覆盖、大连接的优势，在提供通信服务的同时实现全域、低成本高精度的感知，助力 6G 孕育全新应用场景和生态环境。作为“一网两用”的实现方式之一，通信感知一体化在低空经济、智慧交通、智能制造等领域有广泛应用前景，将带来巨大的经济效益和社会效益。

网络协作通感一体化是通信感知一体化的重要技术方向，其技术理念是以“网”为根基，通过多节点智能协作，以网强感，构建全域、全天候、高性能通感算智融合网络，为系统提供多维感知与连接能力，助力万物智联，支撑数字孪生、环境重构等新场景与新业务，推动垂直应用升级。

本白皮书首先分析了通信感知一体化的驱动力与应用场景，其次给出了通感融合的工作模式，然后分析了网络协作通感的挑战与关键技术，给出了高低频网络协作通感原型验证测试，最后对网络协作通感的未来发展趋势进行了展望。

本白皮书版权受法律保护，任何单位和个人转载、摘编、引用或其它方式使用本白皮书文字或者观点的，应注明来源。

目 录

1. 驱动力	1
2. 应用场景	3
3. 工作模式	4
4. 技术挑战	5
5. 关键技术	8
5.1 通感一体化系统模型	8
5.1.1 资源分配模型	8
5.1.2 干扰控制模型	9
5.2 协作节点高精度同步	10
5.2.1 时间同步	10
5.2.2 频率同步	11
5.2.3 相位噪声	12
5.3 多节点协作机制	13
5.3.1 协作通感多源信息融合	14
5.3.2 协作通感信号序列设计	15
5.3.3 协作波束管理	16
5.4 高精度感知算法	17
5.4.1 经典感知算法	17
5.4.2 超分辨感知算法	18
5.4.3 NLOS 环境下的感知算法	18
5.5 组网干扰管理	19
5.5.1 干扰控制条件	20
5.5.2 干扰特性分析	20
5.5.3 干扰控制方案	21
6. 原型验证	22
6.1 低频网络协作通感原型验证	22
6.2 高频网络协作通感原型验证	22
7. 总结与展望	23
缩略语列表	25
参考文献	27

1. 驱动力

从 1G 到 5G，传统移动通信网络不断发展，通信能力不断增强。5G 已经能够支持三大应用场景——增强型移动宽带（eMBB）、超大规模机器类通信（mMTC）以及低时延高可靠通信（URLLC）。6G 新场景、新业务如元宇宙、沉浸式扩展现实（XR）、全息通信、超能交通、工业物联网（IIoT）等，驱动传统通信网络向新一代移动信息网络加速转型。国际电联（ITU）在 2023 年 6 月发布了《IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书》^[1]（以下简称建议书），定义了 6G 的六大典型应用场景，分别为沉浸式通信、超大规模连接、极高可靠低时延、感知与通信融合、AI 与通信融合、泛在连接。其中，前三个场景为 5G 三大场景的增强，后三个场景为新场景拓展。为了满足不同场景下，通信、感知等能力的极致需求，6G 移动信息网络的性能指标体系将比 5G 更加全面。根据建议书，6G 的指标可以分为两种，即九大原有指标的量级提升和六大新指标的多维拓展。其中，原有指标包括峰值速率、用户体验速率、频谱效率、区域流量密度、连接数密度、移动性、时延、可靠性、安全隐私弹性；新指标包括覆盖、感知相关指标、AI 相关指标、可持续性、互操作性、定位精度。这些指标不是对单点技术的要求，而是对网络端到端的系统要求，并且可以总结为三类，即网络能力、网络效率和网络质量。这三类指标相互制约、相互联系，寻求三角均衡的最优解是实现 6G 网络整体最优性能的关键。

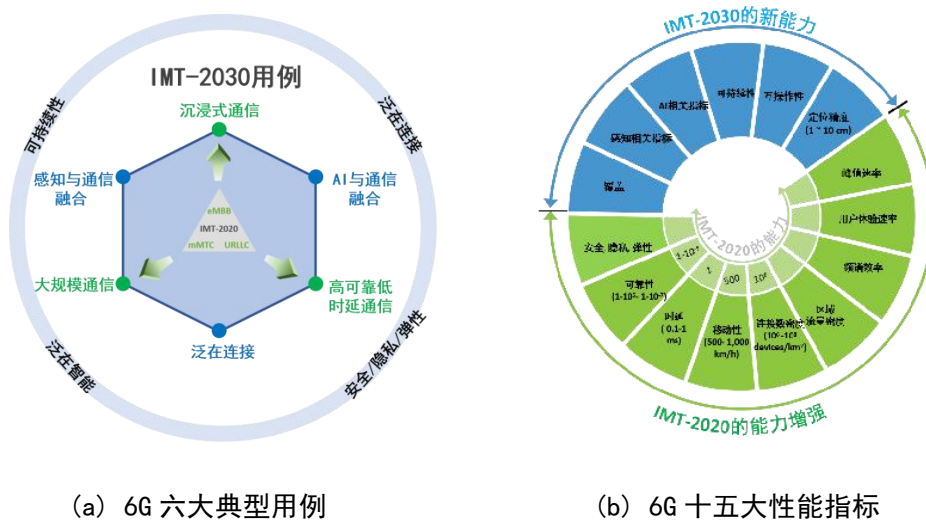


图 1 IMT-2030 6G 框架

在 6G 新场景和新指标体系中，通信和感知融合被认为是 6G 移动信息网络的重要技术特征，是实现信息服务全过程的重要环节。从业务需求来看，新场景、新业务例如低空经济、智慧交通、智慧工厂等要求网络提供泛在的高精度感知能力。从技术驱动来看，随着更高频段、更大带宽、超大规模天线技术的发展，通信与感知的可用频带重合、天线结构相似、数字信号处理模块相似，为通感融合提供技术可行性。4G、5G 时代已有感知的初步尝试，例如面向在网终端的定位功能。面向 6G，通感融合将进一步拓宽感知范围、业务范畴以及感知精度，实现从面向在网终端到非在网终端，从传统定位到识别、成像等新业务，从米级感知精度到亚米级感知精度的跃迁。

为满足全时空、全场景通信能力、感知能力的一体服务，通信感知一体化呈现出三大核心特征，即多要素共享、多频段协同、多节点协作^[2]。

（1）多要素共享

通信和感知可以共享无线射频资源、数字处理资源和信号处理过程。通过共享频谱、天线等射频资源，通信和感知能力能够集成于同一套无线设备。通过共享通用 CPU、加速器、GPU，以及未来存算一体芯片等异构计算资源，能够在—个计算资源池中加载不同软件，来实现通信服务、感知服务。通过共享空口协议、信号处理等，通感可以互相支持，共同提升性能。

（2）多频段协同

为实现全场景的通信和感知服务，6G 将是一个低、中、高多频段协同的全频谱系统。低频段深度覆盖，满足 Mbps 级基本通信需要，同时未来可以利用广域无源物联技术来实现对有标签设备的感知；中频段（Sub-10GHz 频段）主要用于连续覆盖、中高速通信（Gbps），以及粗颗粒度（米级）、广域范围的信息探测；高频（毫米波、太赫兹、可见光等频段）按需开启，进一步提升通信速率和感知分辨率（亚米级）。将多频段有机协同起来，可满足不同的通信和感知需求，支撑个性化业务。

（3）多节点协作

依托网络的优势，采用多节点智能协作即网络协作通感技术，可以在提升边缘用户体验的同时，实现探测目标的高精度感知。在利用多节点进行感知信号的接收和发送过程中，避免了单节点感知中的自干扰问题，降低对硬件自干扰删除

能力的要求，节约成本。此外，多节点感知信息可以联合处理，达到提升感知精度、扩大感知范围、增强感知连续性的效果，满足目标捕获和跟踪需求。

2. 应用场景

移动通信从传统通信功能到感知功能的拓展，是支撑千行百业数字化转型、实现 6G 新业务蓬勃发展的重要环节。通过“一网两用”，可充分利用移动通信网络规模和性能优势，低成本赋能网络泛在感知能力，提供更多优质服务以满足不同场景的需求^[3-5]。如图 2 所示。在智享生活方面，通感一体化可以服务智能家居（如家居控制、安防监控、行为监测等）、医疗健康（如呼吸及心率监测、太赫兹成像、光谱检查等）以及文化娱乐（如 XR 等）。在智赋生产方面，通感一体化可以推动智慧工厂、无人机以及车联网等产业的升级。在智焕社会方面，通感一体化可以助力环境监测（如降雨量/大气湿度测量、污染气体检测、空气质量监测等）、公共安全（如安检、电子围栏等）以及城市管理等。



图 2 网络协作通感应用场景

典型应用场景的特点如下：

（1）低空经济：低空经济前景广阔、快速发展，无人机已逐步进入大众生活，可以被应用于物流配送、农业灌溉、应急救援等。低空飞行亟需泛在的高精度感知能力破解安全监管难题。目前，深圳已经开放部分空域用于无人机飞行，提供快递外卖等服务。无人机市场需求大，但产业链和政策法规仍处于持续完善阶段，利用网络协作通感一体化系统可以对未经允许飞入空域的无人机进行检测

或对无人机的飞行路径进行管制，助力无人机低空经济的规模发展。

（2）智慧交通：通感一体化在车联网、自动驾驶、车流量监测等多方面发挥着重要作用。对于自动驾驶而言，由于其他车辆遮挡导致车载雷达存在盲区，通过协作通感节点获得“上帝视角”，为车辆提供更大的感知范围。道路路口的车流量同样可以通过网络中的节点进行感知监测，并对路口的交通指挥进行实时自适应动态调整。同时，利用感知信息，车联网系统可以更快速便捷地对车辆进行调度。在该场景下，通感一体化系统需要具备较强的目标分辨能力，即较高的角度、距离、速度分辨率。

（3）智慧工厂：在新型智慧工厂中，引入通感系统可以有效地获取非在网物品或设备的状态信息，实现全流程自动化生产操作。例如，通感系统可以识别出生产中存在缺陷的次品，并向联网的机器人发出行进与操作指示进行次品筛除，免去人工参与，提高生产操作效率。在该场景下，通感系统需要具备亚米级的定位能力，而在一些特殊的设备操作状态以及微小物品识别场景下，对感知精度的要求会更高。

3. 工作模式

通信感知一体化的工作模式可分为独立感知与网络协作感知两种，如图 3 所示。独立感知是指由单个基站进行感知，即单个基站发送感知信号到达目标，进而接收和处理目标反射后的感知回波信号，执行感知测量和估计。协作感知是指使用移动通信网络中大规模部署的节点进行协作与交互，一个发射节点复用通信参考信号作为感知信号并将其发射至覆盖区域内时，目标会将感知信号反射到多个方向。此时，附近多个接收节点可以在不同位置上接收同一目标的反射信号，在对各个接收信号进行数据融合处理后，可以实现类似于通信中空间分集接收处理增益，提升感知精度。

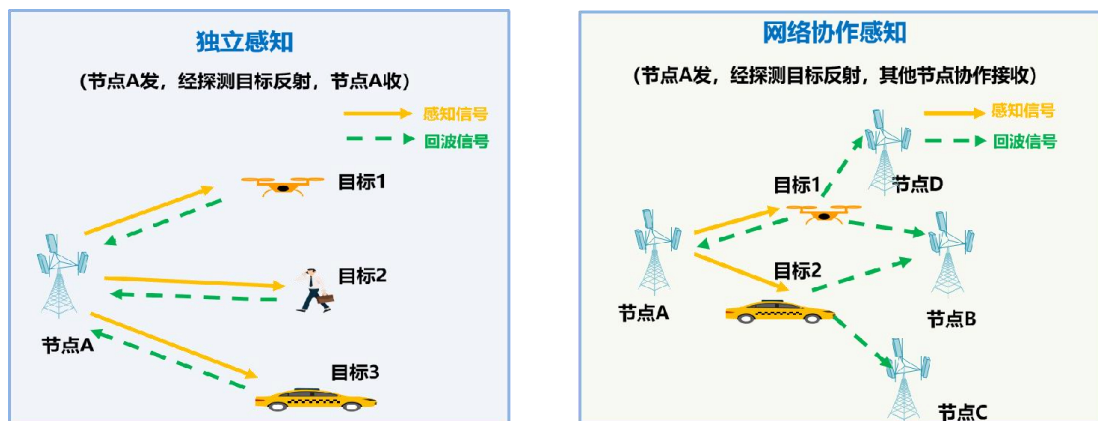


图 3 通感一体化的工作模式

与独立感知相比，网络协作感知具有如下技术优势：

（1）低成本实现全域覆盖。通过“一网两用”，充分利用网络中密集分布的大量节点，可实现感知功能的全域覆盖。由于发射与接收节点距离远，因此系统不受自干扰的影响，避免了额外增加感知接收机、改造硬件射频链路等复杂的工程实现问题。通过升级软件即可实现感知功能，有效降低实现成本与复杂度，提升网络效率；

（2）智能协作，感知精度高。网络协作感知中的多节点可以从不同的方向获得目标距离、多普勒相关的信息，获得空间分集增益，提升感知精度，进而提升网络能力；

（3）干扰协调，干扰程度低。无论是自发自收还是 A 发 B 收的工作模式，都不可避免地面临互干扰问题，影响感知信号的提取与处理。在网络协作通感系统中，可通过调度部分节点作为协作接收节点，达到提升感知精度和提升网络质量的双重效果。

4. 技术挑战

通感融合是 6G 的核心需求，但由于通信与感知源于两套完全不同的技术体系，两者实现目标、评价准则、性能边界均不相同，导致依托一张网实现通信与感知融合的挑战大、难度高。作为 6G 移动信息网络的重要技术特征，通感融合的难度在于解决网络效率与通感能力、网络质量之间的三角冲突，实现全局最优

的系统性创新，如图 4 所示。

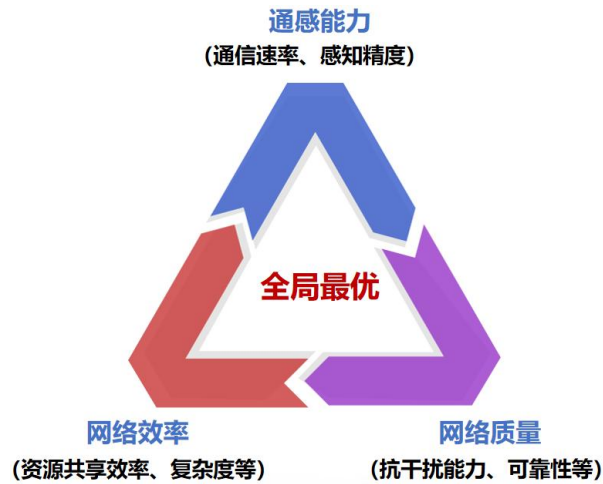


图 4 通感能力、网络效率、网络质量三角冲突示意图

通信和感知的资源共享程度可以分为高共享度、适中共享度和低共享度三个等级。在高共享度下，软硬件共享、信号全域共享，感知精度和覆盖能力不足，网络效率高、网络质量不足；在低共享度下，软硬设施不同、资源完全分立，通信能力、感知能力优异，网络效率低、网络质量良好。而在合理适中的共享度下，软硬件共享，信号在部分域分立，通感能力、网络效率、网络质量达到平衡。如何最优化通感资源共享策略，在保证网络质量的前提下实现通感整体性能最优，是通感一体化面临的技术挑战。此外，为推动网络协作通感从理论走向应用，还需要持续攻关基础理论、同步、多节点协作、干扰等关键挑战。

（1）挑战 1：通感性能折中理论亟待突破

通信和感知源于不同的技术体系，两者设计理念及性能评价体系存在差异。通感融合网络面临着资源配置灵活性、实时性要求高、有限资源下整体性能最优的挑战。如何在资源强约束下，设计灵活自适应的多维资源分配方法，实现通感整体性能最优，是亟待解决的问题，需要进一步研究资源强约束下的通感性能理论界推导、多维自适应通感资源分配技术、高效率高精度网络多节点协作技术、低复杂度多目标最优资源分配与检测技术^[6-10]等。

此外，信道建模理论也是网络协作通感一体化理论的重要组成部分，需要解决如何建模 NLOS 信道、如何精准建模不同特性的不规则目标下的回波信道、如何统一通信和感知的信道模型等核心关键问题。

（2）挑战 2：同步降低感知精度

对于网络协作感知而言，感知信号收发端节点间难以做到理想的时间同步、频率同步，从而在协作感知测量过程中引入时间偏差、频率偏差，进而产生额外的相位误差，导致感知测量误差。例如，当收发节点间存在 1ns 的时间同步误差时，将额外引入约 3m 的感知测距误差。因此，对于协作感知而言，其相较于通信有更严苛的节点同步精度需求。

（3）挑战 3：高性能、轻量化的多节点协作机制

多节点协作技术是实现感知精度进一步增强的关键技术，包含了低复杂度的多源信息融合、轻量化协作机制设计等方面。其中，多源信息融合核心问题是如何充分利用协作多节点的多维信息，从而最大化协作接收增益。轻量化协作机制方面，如何利用最小化的交互开销，实现多节点间的协同，从而实现多元化场景下的高精度感知与高速率通信，是需要进一步研究的问题。

（4）挑战 4：复杂网络下的高精度感知

在实际网络中，信号传输不可避免地经历各种障碍物（例如高楼、树木等），导致信号无法以视距（LOS）传播直接到达定位接收机。信号经过反射或折射等非视距（NLOS）传播到达定位接收机，会造成时延、角度、速度等感知参数测量不准确，进而影响感知精度。如何有效地识别出 LOS 和 NLOS 传播路径，以及如何消除/利用 NLOS 传播路径，对于提高网络协作通感能力十分关键。

（5）挑战 5：干扰控制复杂度高

通感融合网络的干扰问题具有全局性、时变性、类型复杂三大特点。全局性是指干扰广泛存在于整个网络，干扰控制需要协调全网节点，体量大；不同时刻的组网情况不同，导致干扰情况具有时变性，需要及时掌握组网情况，实时改变干扰控制策略；干扰类型多样，包括通信信号和感知信号间的互干扰、上行通信用户对感知接收基站的干扰、小区间的上下行干扰，以及杂波干扰等，如何识别干扰类型并针对性地有效抑制，是保证干扰管理效果的重要内容。

一方面，为协调降低系统干扰，需设计灵活的协作节点的选择及收发调度方案，在组网环境下该设计较为复杂。另一方面，网络协作通感的干扰模型与传统通信系统具有一定的差异性，干扰管理更加复杂。如何更好地兼顾通信与感知性能，设计低复杂度联合干扰管理方案值得进一步研究。

5. 关键技术

为构建性能全局最优的通感融合网络，网络协作通感需要构建基础理论系统模型、攻关高精度同步、多节点协作和干扰管理等关键技术。

5.1 通感一体化系统模型

为了利用移动信息网络实现通信感知一体化，需要构建结合网络的系统模型。本节围绕通感能力与网络效率之间、通感能力与网络质量间的核心矛盾，建立两个子系统模型。

5.1.1 资源分配模型

在网络协作通感系统中，设基站数目为 N ，通信信号和感知信号的总功率为 P ，总带宽为 B 。在时刻 t ，为第 n 个基站分配的通信信号资源如下：带宽为 $B_c(t, n)$ ，功率为 $P_c(t, n)$ ，该基站受到的干扰为 $I(t, n)$ 。则第 n 个基站在 t 时刻的信道容量为：

$$C_c(t, n) = B_c(t, n) \log_2 \left(1 + \frac{P_c(t, n)}{P_{\text{Noise}}(t, n) + I(t, n)} \right)$$

其中， $P_{\text{Noise}}(t, n)$ 为 AWGN 噪声功率。

在高斯信道下，通信的信道容量可以转换为估计理论中的等效 MSE^[11]，即

$$MSE_c(t, n) = 2^{-C_c(t, n)}$$

在时刻 t ，为第 n 个基站分配的感知信号资源如下：带宽为 $B_s(t, n)$ ，功率为 $P_s(t, n)$ 。则当采用正交频分复用（OFDM）波形的子载波间隔为 Δf ，单个符号功率为 ΔP 时，子载波数和符号数分别为 $N_{sc} = B_s(t, n) / \Delta f$ ， $N_{sym} = P_s(t, n) / \Delta P$ 。设感知参数变量为 η_n ，则感知的 MSE 下界（即 CRLB）为：

$$CRLB(t, n) = \left\{ - \sum_{b=0}^{N_{sc}-1} \sum_{p=1}^{N_{sym}} \mathbb{E} \left[\frac{\partial^2 \ln f(y_t^n[p, b] | \eta_n)}{\partial^2 \eta_n} \right] \right\}^{-1}$$

联合通信和感知的性能指标，为通信和感知分配不同的优先级（若通信的优先级因子为 α ，则感知为 $(1 - \alpha)$ ），建立如下通感一体化性能优化问题：

$$\begin{aligned}
& \min \quad \sum_n \alpha \text{MSE}_c(t, n) + (1 - \alpha) \text{CRLB}(t, n) \\
& \text{s. t.} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \\
& \quad \quad B_c(t, n) + B_s(t, n) \leq B \\
& \quad \quad P_c(t, n) + P_s(t, n) \leq P
\end{aligned}$$

.....

（时域、频域、空域、功率域等资源约束）

5.1.2 干扰控制模型

一个典型的网络协作通感系统模型如图 5 所示。在该系统模型中，节点 A 作为通感一体化发送端，其发出的下行通信信号由该小区内的用户 A 接收，用于数据通信。节点 A 也可以发送感知信号，经目标反射后，感知回波信号由节点 B 和节点 C 接收，用于联合感知。通过这一协作感知过程，可以将感知的收发端在空间上分离开，节点 A 仅需进行下行传输，而节点 B 和节点 C 工作在上行接收模式，规避了单站独立感知面临的全双工问题和自干扰问题。此外，当节点 B 和节点 C 工作在上行模式时，还可以与各自小区内的用户进行上行通信。

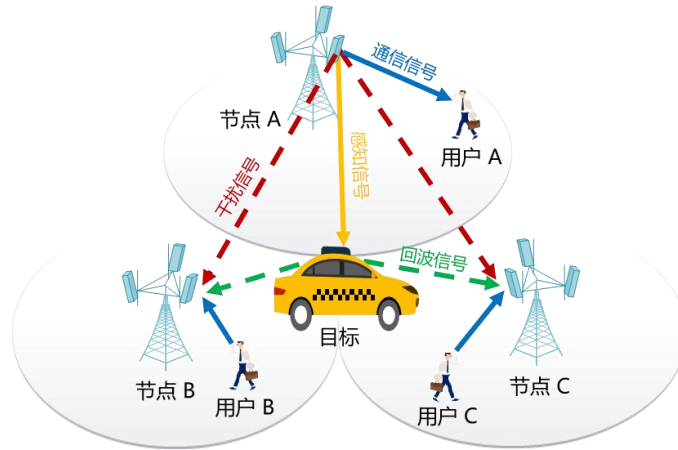


图 5 网络协作通感系统模型

在网络协作通感系统中，感知精度和通信速率将受到 SINR 的影响，以感知为例：

$$\text{感知精度} \propto \frac{\int_0^{T_s} \int_{-B_s/2}^{B_s/2} P_s(b, t) / PL_s(R_0) db dt}{P_{\text{Noise}} + \int_0^{T_s} \int_{-B_s/2}^{B_s/2} \left[\underbrace{\sum_{m=1}^M P_m(b, t) / PL_c(R_m)}_{\text{上行用户干扰}} + \underbrace{\sum_{k=1}^K P_k(b, t) / PL_c(R_k)}_{\text{小区间干扰}} + \underbrace{I_{\text{clutter}}(b, t)}_{\text{杂波干扰}} \right] db dt}$$

其中，分母部分给出了三种干扰，即上行用户干扰、小区间干扰和杂波干扰。 M 和 K 分别代表上行用户数目和干扰小区数目。值得注意的是，干扰小区包括邻近小区和远端干扰小区。

5.2 协作节点高精度同步

高精度同步技术是实现网络协作通感的关键基础，基站间的高精度同步包括时间同步、频率同步等。本小节将重点围绕时间同步、频率同步、相噪等方面展开介绍。

5.2.1 时间同步

协作节点间的时间同步误差对高精度测距性能造成影响。对于点对点时间同步，现有 3GPP NR 协议 TS 38.133 规定，站间同步精度约为正负 $1.5\mu\text{s}$ ^[12]，可造成约 450 米的距离测量偏差，无法满足高精度业务需求。对于网络时间同步，可通过基站直接授时或有线时间网络授时^[12-16]实现，上述两种方案实现的基站间时间同步误差分别约为 50ns 及 $1\mu\text{s}$ ^[17]，同样无法满足高精度测距需求。

尽管基站间高精度的时间同步较难实现，但可通过时间同步误差消除方案达到“零时间同步误差”的效果。如图 6 所示，一种双向时间同步误差消除方法，可有效消除同步误差的影响。实现步骤：第一步，节点 B 接收来自节点 A 发送的感知信号，并通过测量得到感知信号的传播时延为 $L_1 = T_1 + \Delta T$ ，其中， T_1 为实际传播时延， ΔT 为站间同步误差。第二步，节点 A 接收来自节点 B 发送的感知信号，并通过测量得到感知信号的传播时延为 $L_2 = T_2 - \Delta T$ ，其中， T_2 为实际传播时延。第三步，系统通过求平均 $L = (L_1 + L_2)/2 = (T_1 + T_2)/2$ ，得到与同步误差无关的时间参数：平均实际传播时延。此时，感知目标位于以节点 A、节点 B 为焦点， L 为长轴的椭圆上。此后，系统可通过几何关系对感知参数进行估算。例如：为实现目标定位，系统可更换多组发射节点及接收节点，重复第一步至第三步，得到多组椭圆，目标即位于多组椭圆的交点处。

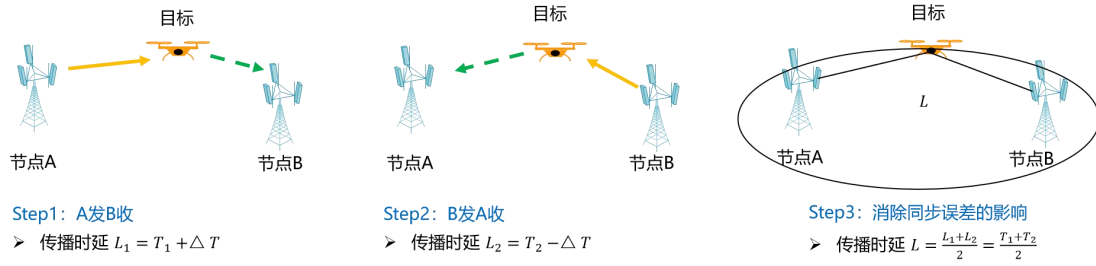


图 6 同步误差消除方案

此外，一种通过测量多径时间差避免节点间同步误差的测距方案如图 7 所示，节点 A 发射的通感信号分别通过直射径及经过感知目标的反射径到达节点 B。假设节点 A 与节点 B 之间直射径与反射径传播时延分别为 L_3 、 L_4 ，同步误差为 ΔT ，则直射径传播时延为 $L_3 = T_3 + \Delta T$ ，反射径传播时延为 $L_4 = T_4 + \Delta T$ 。将两个传播时延相减，可得到与同步误差无关的测量量到达时间差 $\Delta L = T_4 - T_3$ ，再根据目标与两节点之间距离的几何关系建立等式，可由 ΔL 计算出反射径的真实时延 T_4 。

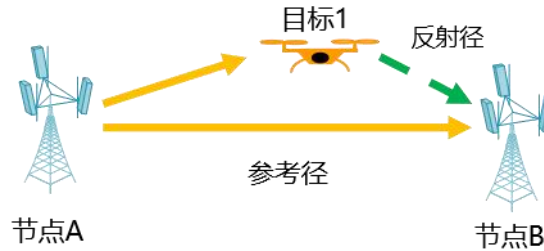


图 7 基于参考径的同步误差消除方法

5.2.2 频率同步

载波频率偏差主要来自两个方面，一方面是发射机和接收机的晶体振荡器之间存在的频率偏差；另一方面，由于发射机和接收机之间的相对运动以及信号传播环境中物体的运动产生多普勒频移，也会对发射机与接收机之间带来载波频率偏移，影响感知精度。上述频偏对系统的影响可理解为在接收机和发射机之间引入了一个时变信道，可使子载波间的正交性或采样点频域位置的准确性遭到破坏。当载波频偏为子载波间隔整数倍的时候，尽管子载波之间仍能保持正交，但是在频域上，采样点会发生偏移。当载波频偏不是子载波间隔整数倍的时候，在子载波之间会发生能量泄露，引入子载波间的干扰，破坏子载波之间的正交性。

频偏可通过基于训练符号的方式进行补偿，较经典的算法有 Schmidl&Cox 算法（S&C 算法）^[18]。S&C 算法训练序列时域结构如图 8 所示，通过使用两个训练序列，S&C 算法具有较高的估计精度，但是两个训练序列开销较大，降低了数据的传输效率。S&C 算法的频偏估计分为两部分，分别是小数倍频偏估计和整数倍频偏估计：

- 小数倍频偏（时域估计）：小数倍频偏估计只和第一个训练序列相关，如图 6 所示，时域上第一个训练序列的前后部分相同（可通过在偶数子载波上传输 PN1 序列，在奇数子载波上传输‘0’）。由于频偏的存在，在接收端，第一训练序列前后两部分对应的采样点存在相位差，可通过此相位差得到小数倍频偏。
- 整数倍频偏（频域估计）：整数倍频偏估计利用第二个训练序列的偶数位置数据和第一个训练序列的偶数位置数据之间的差分关系计算得出。对于第二训练序列，奇数子载波上传输 PN2 序列，偶数子载波上传输 PN3 序列，其中 PN3 与 PN1 具有给定的差分关系。当接收信号存在整数倍频偏时，接收到的频域数据相对于发送端会出现循环移位。因此，通过对 PN1 和 PN3 进行滑动相关，可以估计出整数倍频偏。

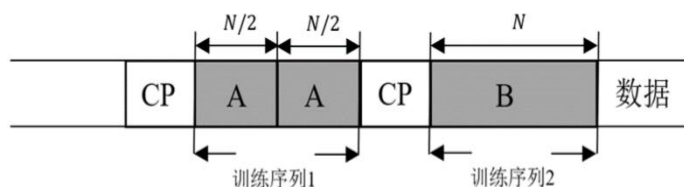


图 8 Schmidl & Cox 算法的训练序列时域结构

5.2.3 相位噪声

相位噪声是影响感知精度的重要因素之一，是指接收机的射频硬件在多种噪声的影响下，对输出信号带来随机的相位变化。不同于热噪声，相位噪声是乘性噪声，对实现高精度感知带来巨大挑战^[19]。

为了减轻相位噪声对感知精度的影响，可以采用更精密的射频器件，包括振荡器、锁相环、滤波器等，通过提升硬件性能的方式来降低相噪。除了硬件增强，还可以设计参考信号来估计公共相位误差（CPE），并利用 CPE 对接收信号进

行相位补偿。此外，还可以考虑配置更大的子载波间隔，来降低相位补偿的难度。更大的子载波间隔会使得 OFDM 符号时长变短，相位变化的相对速度变低，从而可以更高效地补偿相位。

为了更加准确地评估和补偿相位噪声，3GPP 定义了相位跟踪参考信号（PTRS）。在 OFDM 通信系统中，为了进行信道估计和相位噪声估计，需要将解调参考信号（DMRS）和 PTRS 放置在频域上，并在发送端进行 OFDM 调制之前对参考信号进行配置^[20]。PTRS 信号在发送端设计为频域低密度分布，时域高密度分布的形式，以便在频域上联合 DMRS 来估计相位噪声，并在时域上补偿相位误差^[21]。在通信感知一体化系统中，也可利用相似的方式进行相噪的估计与补偿。

5.3 多节点协作机制

多节点协作是获得协作通感空间增益、联合处理增益的有效途径，通过调度多节点、融合多维信息实现特定区域内目标的高精度、超分辨感知^[22]。协作的多节点可以在相对目标不同的角度、距离上接收目标的反射信号，其协作增益一方面在于减小随机误差带来的影响，单接收节点获得的到达角、距离、多普勒频率等目标测量量存在随机误差，多节点测量及融合可以消除随机误差的影响；另一方面，多节点协作可以利用多倍、多维的目标测量量进行定位。因此，多节点协作有助于提升目标定位精度。如图 9 协作定位结果所示，随接收节点数目增加，感知定位误差逐渐降低。同时，定位误差的降低速率随着接收节点数增加而减小，可以预见的是定位误差最终会逐渐收敛，可用于指导优化协作节点选择方案。

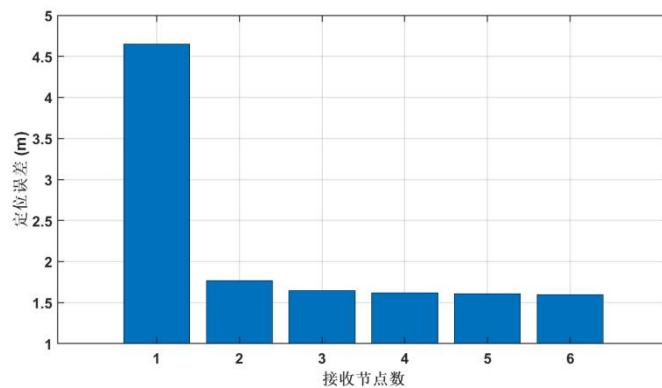


图 9 协作定位误差随节点数目变化曲线

5.3.1 协作通感多源信息融合

多节点协作的核心问题是如何融合处理协作多节点的多维信息从而最大化协作接收增益^[23]。总体来说，协作感知信号融合分为以下三种方式：

方式 1：软融合。“软融合”方式直接将接收信号或原始信道信息加权融合^[24]，包括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等。在软融合中，接收节点对接收信号不做任何处理，直接将原始信号发送给服务器，服务器按照一定权重进行叠加合并后再进行优化处理提取感知信息。由于软融合利用了原始信号或信道信息，没有引入额外的信号处理及其带来的误差，因此该方式可以获得全局最优解。然而，软融合的缺点也显而易见。首先，由于接收节点需要将原始信号发送给服务器，数据量大，占用传输资源多，需要采用低采样频率或截取信号等方式降低资源开销。其次，服务器需处理大量的原始信号，占用服务器大量的计算与存储资源，处理时延大。为了提升处理速度，可以考虑与人工智能融合方法，在前期神经网络训练阶段，通过部署大量用于训练的感知校准件，获得感知校准件反射信号作为训练数据。在实际感知时，将接收节点发送的接收信号输入神经网络从而快速得到感知目标位置。

方式 2：中性融合。“中性融合”方式是对感知测量量进行融合^[25]。首先，各个接收节点对各自接收到的反射信号进行处理，获得时延、角度、强度等感知测量量。接收节点再将上述测量量及其多维组合发送给服务器，由服务器进行数据融合。在中性融合中，部分计算步骤在分布式的接收节点处完成，有效降低了服务器计算负荷。另外，接收节点仅将若干个感知测量量发送给服务器，传输数据量小，降低了数据传输开销。然而，接收节点的信号处理引入误差，导致中性融合得到的定位结果误差比软融合定位结果误差大。另一方面，数据配对也是中性融合的重要步骤，服务器需要将不同接收节点上报的感知测量量进行配对，确定属于同一目标的所有测量量，而后进行数据融合。因此接收节点在上报测量量的同时，还需要额外上报参数，以指示目标信息，辅助服务器进行数据配对。

方式 3：硬融合。“硬融合”方式是对感知结果的直接融合。首先由每个接收节点对各自接收到的信号进行处理，利用各自测量的时延与角度信息获得感知目标的定位结果，再将定位结果发送给服务器，服务器只需要对所有定位结果进

行聚类并计算加权平均即可。在硬融合方式下，服务器计算开销最小，每个接收节点计算开销相比于第二级别略有增加且数据传输量最小，这是总体计算与传输量最小的一种融合方式。然而，由于每个接收节点计算目标位置的时候引入了由于带宽、噪音、盲区等方面带来的多个误差，硬融合定位的误差最大。为了降低硬融合误差，服务器需要根据每个接收节点的接收 SINR、盲区位置等对数据进行筛选，保留相对误差较小的数据进行融合。因此，硬融合仅适用于对定位精度要求低，服务器资源紧缺的情况。

综上所述，在算力资源与传输资源满足要求的前提下，软融合可达精度最优。相反，在资源紧张的情况下，可以牺牲一部分精度，使用硬融合的方式快速高效地获得感知定位结果。因此，多维信号融合方式的选择需要综合考虑服务器与接收节点的信号处理能力、感知业务精度需求等多方面因素。

5.3.2 协作通感信号序列设计

不同于复用数据信号进行感知的单基站独立感知场景，节点间协作感知的基础是收发节点相互已知感知序列，因此需考虑利用参考信号完成协作感知任务。一种方式为复用现有的 DMRS、信道状态信息参考信号（CSI-RS）等通信参考信号完成感知功能，可以提高系统的资源利用率，实现“零开销”感知。但由于时频资源及映射方式受限、通信目标与感知目标存在方位差异、感知覆盖范围与通信覆盖范围不同等原因，感知精度及通信性能均衡问题复杂，可能影响系统整体性能。因此，针对多节点协作感通感模式，需考虑进一步设计专用的感知参考信号。为支持多用户复用及多目标感知，降低组网通感时的互干扰水平，感知参考序列应具有自相关性较好、互相关性较差等特性。另外，协作通感信号序列的设计还应考虑接收的回波信号质量。根据雷达方程可知，感知回波信号的接收功率与距离的四次方成反比，同时与目标的散射特性有关，可能存在中远距目标感知的回波信号强度较弱的情况，导致无法正确进行信号接收和感知探测。然而，OFDM 波形峰值平均功率比（PAPR）较高，现有移动通信系统需要对功率放大器进行功率回退才能使功率放大器工作于线性区域，导致发送功率降低，直接影响感知回波信号强度，不易被检测。因此，若基于 OFDM 波形进行通信感知一体化系统设计，需尽可能采取低峰均比序列（例如 Zadoff-Chu 序列等）作为感

知序列，减少功率回退，增大发射功率，提升回波信号强度。

为满足协作感知覆盖范围的要求，基于 OFDM 信号实现协作感知的一体化系统，感知参考信号的循环前缀（CP）长度需要足以覆盖感知路径时延，由于感知目标位置未知，可能存在协作感知信号的多径时延大于 CP 长度的情况，导致严重的符号间干扰，感知性能恶化。一种解决方式是设计具有更长 CP 的感知符号，避免感知多径时延超过 CP 长度造成的符号间干扰。另一种方式是设计一种信号预处理方案，生成具备循环移位属性的新符号结构，在 CP 本身长度没有变化的情况下，使得等效 CP 变长，满足感知覆盖范围需求的同时兼容现有的帧结构配置与指示流程。另外，为了避免距离或速度估计出现相位模糊，需要根据感知距离及速度范围优化感知参考信号的时频映射方式。尤其在感知资源受限的情况下，可设计灵活的梳状排布方式，来满足不同的感知精度和感知范围需求。

5.3.3 协作波束管理

在网络协作通感系统中，为实现目标精准估计，需要协作节点间匹配收发波束。对目标的高精度感知通常可分为发现目标、跟踪目标两个阶段。在发现目标阶段，由于目标位置未知，通常需要进行全域波束扫描；在跟踪目标阶段，需要进行波束跟踪及波束切换过程，特别是在高速移动场景下，需进一步设计更为灵活的波束扫描、波束切换等机制，以降低波束扫描开销及切换时延。

在降低波束扫描开销方面，可采用两阶段波束扫描方法。如图 10 所示，在第一阶段，协作节点间通过宽波束扫描快速、粗略确定感知目标所在的大致区域。第二阶段，利用窄波束对该区域进行精细扫描，得到较强的回波信号，实现较高感知精度。另外，在高、低频协作场景中，设计低频波束宽、高频波束窄协同波束扫描方式，实现低开销的高精度感知。

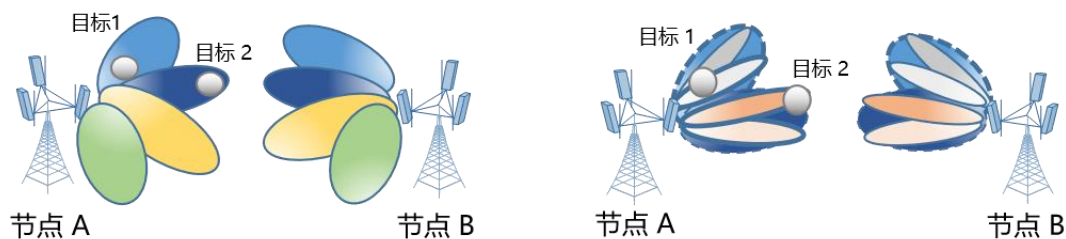


图 10 两阶段波束扫描方案示意图

在避免波束切换中断方面，可采用基于协作的感知辅助通信的波束管理方法，支持高速移动目标的连续跟踪。利用协作通感网络中节点分布广泛及信息共享特性，基于网络中节点运动状态与相对位置关系等共享信息，获取特定区域内波束特性，实现在不进行波束测量的情况下辅助预测下一时刻的最佳波束，从而降低波束管理中的测量与上报开销、减少切换时延、提高波束管理效率。

在降低感知开销与扫描时延方面，由于不同区域下感知分辨率存在差异性，为实现全域内均衡的感知精度，可针对不同的感知区域使用不同宽度的波束扫描。例如，在感知精度要求高的区域增加波束数量，采用细波束扫描；在感知精度要求低的区域减少波束数量，采用宽波束扫描。这种方法可以针对感知区域位置灵活调整波束宽度，在一定程度上降低总体扫描开销。

5.4 高精度感知算法

高精度感知算法是实现网络协作通感的关键。在实际网络中，需要结合算法性能、资源开销、复杂度等因素优化设计感知算法，实现通信与感知性能的最优。此外，NLOS 环境引入感知误差，如何实现 NLOS 环境下高精度感知需要进一步研究。

5.4.1 经典感知算法

基于 OFDM 波形进行通信感知一体化设计，实现对目标物体的感知，是目前通信感知一体化研究的技术路线之一，可最大程度降低对通信系统的设计和硬件的影响，具有更好的产业可实现性。在多个接收节点的 OFDM 信号联合处理时，可利用周期图法得到感知目标的位置信息^[6]。除了周期图法，文献[9-10]利用信号 - 噪声子空间分离的方法，可以得到目标物体的距离、速度、角度等信息。文献[8]提出了一种自适应算法，从感知精度、通信性能、计算复杂度三方面对算法展开分析，试验结果表明，单独使用一种算法无法同时实现感知精度、复杂度及通信速率的最优，可通过灵活选取或切换算法，实现感知性能与复杂度较好的折中。

5.4.2 超分辨感知算法

为提升感知分辨率及干扰抑制能力，进一步利用感知回波信号中信息的稀疏特性，结合压缩感知算法原理，构造高维稀疏转换矩阵及目标向量，优化欠定线性逆问题的方式重构感知信号^[26-27]。该方式突破奈奎斯特采样定律，通过随机采样获取信号的离散样本，以从较少的测量值中还重构原始信号，以在占用少量时频资源的情况下，实现与时频资源全带宽占满相同的感知效果。通过算法仿真验证可知，该算法具有抗干扰能力强、超分辨率等特征。同时，通过增加稀疏转换矩阵字典的维度，可进一步提升感知分辨率，但在一定程度上增加了算法的计算复杂度。未来将进一步考虑将该超分辨感知算法与信号子空间重构算法相结合以进一步降低算法复杂度。

5.4.3 NLOS 环境下的感知算法

受到复杂的信号传播环境的影响，在发射节点、目标和接收节点之间可能存在树木、建筑物等障碍物，使得感知信号发生反射、折射及绕射，沿多条路径到达接收节点。多条路径上的感知信号幅度、时延、相位不同，将给感知信号的正确解析带来挑战，进而使感知结果出现很大的误差。对 NLOS 效应的处理分为三个阶段，即 NLOS 识别、NLOS 消除及 NLOS 利用。

NLOS 识别是解决 NLOS 效应的前提，主要依赖于信号传播的各个特征，包括接收信号强度、多径传播时延特性等^[28]。根据这些特性，可以将接收到的信号分类为 LOS 或 NLOS。在已有的研究中，基于深度学习的方法和基于距离、基于角度、基于到达时间差等统计方法都被应用于 NLOS 识别中。深度学习算法能够自适应地学习和提取特征，具有强大的拟合能力和泛化性能^[29]。基于统计的方法包括基于距离、基于角度和基于到达时间差等。具体地，基于距离、角度和到达时间差的方法主要是通过测量信号的强度或相位差来估计距离，通过测量信号的到达角度来估计信号的角度，通过测量信号的到达时间差来计算信号的传播路径，从而判断是否为 NLOS 传播^[30]。尽管已经有很多研究致力于 NLOS 识别，但仍存在一些挑战需要进一步探讨和研究。比如，如何提高算法的鲁棒性和适应性、如何设计高效且实时性好的算法等。

NLOS 消除技术根据不同的方法分类，可以分为基于模型的方法和基于学习的方法。基于模型的方法利用信号传播的几何特性进行 NLOS 识别和消除。例如，通过对接收信号强度、到达角度或到达时间差等参数进行测量，判断是否存在 NLOS 路径，并进行消除^[31]。基于学习的方法利用神经网络等深度学习模型进行 NLOS 识别和消除。例如，利用卷积神经网络对接收信号进行特征提取，并分类为 LOS 或 NLOS，然后根据分类结果进行消除。然而，现有的方法仍存在一些不足和需要解决的问题。比如，大多数方法仅考虑了单一路径和简单场景，而在复杂环境中可能存在多条 NLOS 路径。未来可以考虑不同场景中多路径传播情况下的 NLOS 消除方法。

随着国内外学者对 NLOS 效应研究的深入和信道估计技术的发展，NLOS 可以被利用以实现对环境的感知和对定位的增强。文献[32-35]研究了同步定位与地图构建（SLAM）技术，将多径分量（MPC）反射体视为虚拟发射机（VT），可以将到达接收机的每个信号分量视为来自实体发射机或 VT 的 LOS 信号，从而实现多路径联合定位。文献[36]中的实验结果表明，采用主被动联合感知的 SLAM 可以将墙体探测完整，并准确找到目标位置。在这些方案中，虽然 VT 的位置取决于环境且可能未知，但可以通过多点接收等方式将其估计出来。此外，对于非墙体、非镜面反射的散射体等，文献[37-39]给出了利用 NLOS 的方法：由于散射体往往距离大规模天线阵列较近，散射体可以认为处于近场条件，而待感知目标处于远场条件，利用球面波特性，可以估计出散射体的位置和速度，进而对目标进行感知。

5.5 组网干扰管理

大规模部署的分布式网络节点为实现网络协作通感提供基础支撑，协作感知需要采用动态上下行配置方式，这将额外引入上下行交叉链路干扰、小区内上行通信用户干扰等^{[24],[40-42]}。如图 11 所示，对于协作感知模式，节点 1 和节点 2 的时隙配置需要考虑不同的上下行配置，与感知信号的收发过程、感知区域及感知精度要求有关。此时，对于通信用户而言，受到的干扰主要来自下行基站与目标通信用户之间的链路。对于协作感知接收基站而言，受到的干扰主要来自其他感知发射基站、下行通信基站，相比通信用户，感知信号干扰更加强烈。因此，在

采取协作感知模式时，网络需要尽可能避免上下行交叉链路干扰等对一体化性能的影响，以同时满足网络的感知需求与通信需求^[43]。

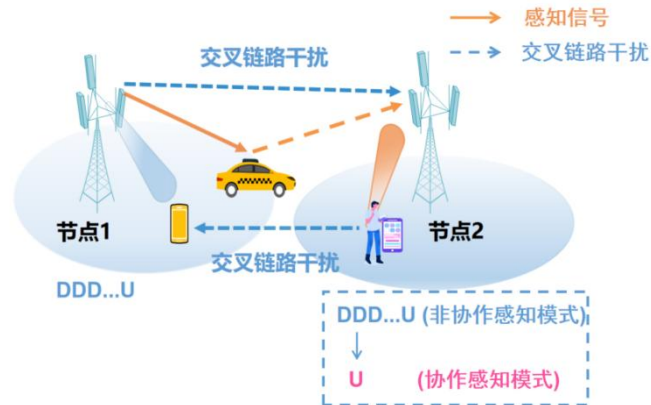


图 11 上下行交叉链路干扰

5.5.1 干扰控制条件

为保障信号成功检测，需满足干扰强度低于干扰上限，干扰上限=回波信号强度+模数转换器（ADC）动态范围，其中 ADC 动态范围的取值与系统硬件参数相关。然而，在实际组网环境下，对于协作接收基站会受到小区内上行通信用户、其他感知发射基站、下行通信基站等干扰，其干扰强度可能超过干扰上限，此时需进行必要的干扰控制才能确保信号成功检测。在此基础上，为实现更高的感知精度，干扰控制程度可进一步提升。

5.5.2 干扰特性分析

图 12 给出典型低频网络协作通感系统中的站间干扰特性系统级仿真结果。宏蜂窝（UMA）场景下，考虑网络对典型感知目标如无人机（RCS=0.01）进行感知。典型低频基站配置包括：载频 2.6GHz、带宽 100MHz、发射功率为 52dBm、ADC 动态范围约为 60dB。根据干扰上限的计算公式，可得其干扰上限约为 -8.71dBm。图 12 表明，当不考虑干扰管理时，90%概率下协作接收基站受到的干扰强度达到约 -6.45dBm，超出 -8.71dBm 的干扰门限，导致感知任务失败。当对邻扇区进行干扰控制后，协作接收基站受到的干扰强度下降了约 41.34dB，满足感知信号成功检测的基本要求。为实现更高精度的感知，可进一步提高干扰控

制能力，但如何实现低开销干扰控制与高精度感知间的折中有待更深入的研究。

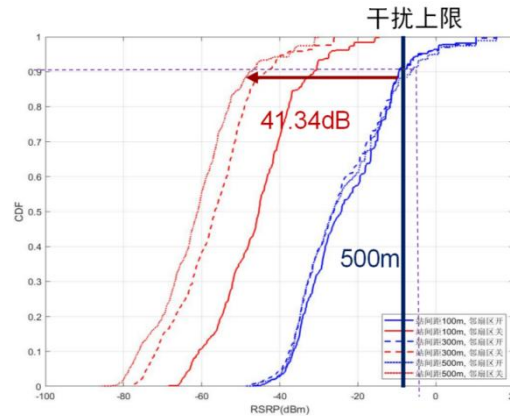


图 12 互干扰强度 CDF 曲线图

5.5.3 干扰控制方案

为保障感知信号成功检测并满足感知性能需求，可从时-频-空-功率域设计干扰控制方案。图 13 给出不同干扰协调因子下的感知精度（干扰协调因子为 0dB 表示不进行干扰协调，干扰来源为其他小区的通信信号）。可以看出，不同站间距下，随着干扰协调因子降低，系统干扰变小，测距 RMSE 显著降低。

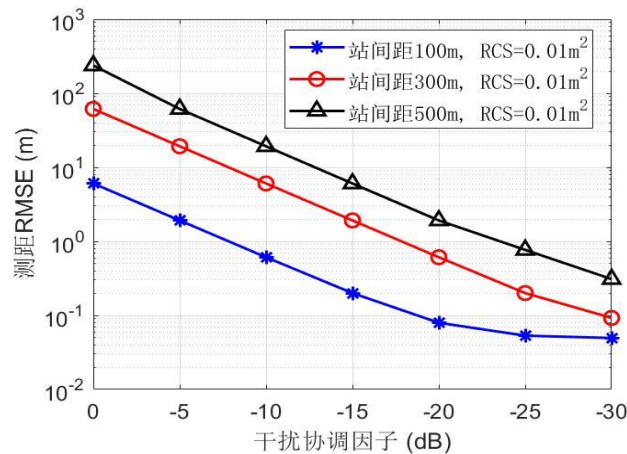


图 13 测距 RMSE 与干扰协调因子关系曲线图

综合上述分析与仿真可知，基站间干扰影响网络协作通感系统的性能，需要进行干扰管理来提升感知精度。其中，来自同站址两邻扇区的干扰尤为强烈。为保障感知信号的成功检测，对同站址邻扇区的干扰管理是非常有必要的。此外，对干扰基站进行不同程度的干扰管理，可使感知性能在显著范围内变化。因此，

在实际应用中，在保障信号成功检测的基础上，有必要进一步对其他干扰基站进行适当的干扰管理，以满足不同场景下的不同感知需求。

6. 原型验证

6.1 低频网络协作通感原型验证

当前产业界低频网络协作通感一体原型样机采用 4.9GHz 频段，100MHz 带宽，已完成交通、无人机等场景的测试验证。测试采用的通感算一体化系统包含发射、接收两个站点，通过信号联合设计和硬件共享等手段，实现通信、感知、计算功能的一体化设计。在进行信息传递的同时，对目标设备、事件或环境等进行检测、跟踪、识别、成像等。

实测结果显示，低频网络协作通感一体原型样机在无人机场景下最远感知距离达到 2000m，感知距离精度达到米级，可满足低空无人机监管业务需求。在交通场景下真实道路环境最远感知距离达到 1000m，感知距离精度达到亚米级，感知角度精度达到 1 度，感知速度精度达到 0.2km/h，可满足高速公路稀疏场景车流量监管等业务需求。



图 14 低频网络协作通感原型样机无人机、交通探测场景

6.2 高频网络协作通感原型验证

当前产业界高频网络协作通感一体原型样机利用毫米波大带宽提升其感知性能，采用 26GHz 频段已完成交通、无人机等场景的测试验证。测试利用通信

感知一体化技术，实现单 AAU 通信和感知信号的发送和接收，感知的同时通信终端可对发送信号进行单独接收。通过通感一体化系统对低空无人机和交通场景进行实时感知、监测、通信和控制，并且同步实现信息的端到端计算处理，能够提供无人化、沉浸式和数字孪生等感知-通信-计算高度耦合业务。

实测结果显示，在无人机场景下，高频网络协作通感一体原型样机可达到 1000m 的最远探测距离，感知距离精度达到亚米级，可应用于远距离无人机入侵检测、低空安全管理等场景。交通场景下可实现感知范围 1000m，亚米级距离精度，车道级分辨率，0.1km/h 速度精度，可应用于交通安全管理、辅助自动驾驶等场景。



图 15 高频网络协作通感原型样机交通探测场景

7. 总结与展望

6G 时代，通信能力、感知能力将融合共生，各种业务之间的信息协同和流程将高度耦合，不同功能之间的互助互惠、不同模块的联合优化、不同网络节点的协同组网，将极大提升网络协作通感系统的整体性能。本白皮书分析了通信感知一体化的驱动力与应用场景，提出了“多要素共享、多频段协同、多节点协作”三大核心特征。本白皮书重点介绍了“网络协作通感”技术理念及其技术优势，依托“网络”优势，网络协作通感可提供全覆盖、全天候、低成本泛在感知与连接能力。结合“网络+融合”发展趋势，本白皮书分析了网络协作通感面临的挑战以及关键技术。最后，本白皮书给出了低频和高频网络协作通感的原型验证结果。

面向未来，6G 网络协作通感仍需要加强跨域技术的融合创新、持续攻关，进一步研究和突破网络协作通感系统基础理论、关键核心技术、系统平台构建与原型验证等，同时希望进一步汇聚产学研各方力量，推动开展标准化、产业及应用培育等工作，助力低空经济、智慧交通、智慧工厂等行业快速发展。

缩略语列表

缩略语	英文全名	中文解释
AAU	Active Antenna Unit	有源天线单元
ADC	Analog-to-Digital Converter	模数转换器
AI	Artificial Intelligence	人工智能
AR	Augmented Reality	增强现实
AWGN	Additive White Gaussian Noise	加性高斯白噪声
CDF	Cumulative Distribution Function	累积分布函数
CP	Cyclic Prefix	循环前缀
CPE	Common Phase Error	共相位误差
CPU	Central Processing Unit	中央处理器
CRLB	Cramér Rao Lower Bound	克拉美罗界
CSI-RS	Channel-State Information Reference Signal	信道状态信息参考信号
DAC	Digital-to-Analog Converter	数模转换器
DMRS	Demodulated Reference Signal	解调参考信号
eMBB	Enhanced Mobile Broadband	增强移动宽带
GPU	Graphics Processing Unit	图形处理器
IIoT	Industrial Internet-of-Things	工业物联网
IMT	International Mobile Telecommunications	国际移动通信
ITU	International Telecommunications Union	国际电信联盟
LDPC	Low-Density Parity-Check	低密度奇偶检验
LOS	Line-Of-Sight	视距
mMTC	massive Machine Type Communications	大规模机器类通信
MPC	Multi-Path Component	多径分量
MSE	Mean Squared Error	均方误差
NLOS	Non-Line-Of-Sight	非视距
NR	New Radio	新无线电
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
PAPR	Peak to Average Power Ratio	峰值平均功率比
PTRS	Phase Tracking Reference Signal	相位跟踪参考信号
RCS	Radar Cross Section	雷达截面积

RMSE	Root Mean Squared Error	均方根误差
SINR	Signal to Interference-plus-Noise Ratio	信干噪比
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping	同步定位与地图构建
UMA	Urban Macro cell	宏蜂窝
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communication	超可靠低时延通信
USRP	Universal Software Radio Peripheral	通用软件无线电外设
VT	Virtual Transmitter	虚拟发射机
XR	Extended Reality	扩展现实
1G	1st Generation wireless systems	第一代移动通信技术
3GPP	3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
4G	4th Generation wireless systems	第四代移动通信技术
5G	5th Generation wireless systems	第五代移动通信技术
6G	6th Generation wireless systems	第六代移动通信技术

参考文献

- [1] ITU-R, DRAFT NEW RECOMMENDATION, Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond[R]. 2023
- [2] Yin H., Huang Y., Han L. et al., Thoughts on 6G integrated communication, sensing and computing networks[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2023, 53(9): 1838-1842
- [3] IMT-2030(6G)推进组, 通信感知一体化研究报告（第二版）[R]. 2022
- [4] 中国移动, 2030+愿景与需求报告[R]. 2019
- [5] VIVO, China Telecom, China Mobile, et al., 通感一体化系统架构与关键技术[R]. 2023
- [6] Ma L., Pan C., Wang Q., et al., A downlink pilot based signal processing method for integrated sensing and communication towards 6G[C]//Proceedings of 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5
- [7] Han L., Jin J., Wang Q., et al., Performance Trade-off for a Novel Integrated Localization and Communication System[C]//Proceedings of 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring), Florence, Italy, 2023: 1-7
- [8] Wang Y., Zhang X., Ma L., et al., 6G 通信感知一体化网络的感知算法研究与优化[J]. 通信学报, 2023, 44(2): 219-230
- [9] Wang Y., Jin J., Ma L., et al., A sensing-based cooperative position scheme for perceptive mobile network towards 6G[C]//Proceedings of 2022 IEEE 22nd International Conference on Communication Technology (ICCT). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6
- [10] Zhang X., Jin J., Ma L., et al., Pilot-Based Delay and Doppler Estimation in 6G Integrated Communication and Sensing Networks[C]//Proceedings of Wireless Communications and Signal Processing, IEEE press, 2022:478-482
- [11] 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, 2015, 64(2): 464-474
- [12] 3GPP, Requirements for support of radio resource management[S]. 3GPP TS 38.133, 2021
- [13] Zhang J. A., Wu K., Huang X., et al., Integration of Radar Sensing into Communications with Asynchronous Transceivers[J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(11): 106-112
- [14] Hamed E., Rahul H., Abdelghany M. A., et al., Real-time distributed MIMO systems[C]//Proceedings of ACM SIGCOMM, 2016: 412-425
- [15] Xie N., Zhang L., and Wang H., Phase synchronization at target in MIMO radar[C]//Proceedings of IEEE ICC, 2014: 37-41
- [16] Scharrenbroich M. and Zatman M., Statistical MIMO radar experimental results[C]//Proceedings of IEEE Radar Conference, 2014: 617-622
- [17] IEEE, IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems[S]. IEEE Std 1588-2019 (Revision of IEEE Std 1588-2008), 2020: 1-499
- [18] Schmidl T. M. and Cox D. C., Robust frequency and timing synchronization for OFDM[J].

- IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(12): 1613-1621
- [19] Ma L., Jin J., Lou M., et al., On the Hardware-Limited Sensing Parameter Extraction for Integrated Sensing and Communication System Towards 6G[C]//Proceedings of 2023 IEEE 23rd International Conference on Communication Technology (ICCT), accepted.
- [20] 顾双双. 5G 系统中相位噪声估计与补偿算法研究[D].北京: 北京邮电大学,2019
- [21] 安宇宁. 毫米波移动通信测试仪器相噪及带内频响补偿技术研究[D]. 山西: 中北大学, 2023
- [22] Chen Y., Wei P., Zhang H., et al., Direct Target Joint Detection and Tracking Based on Passive Multi-Static Radar[J]. Remote Sensing, 2023, 624(15)
- [23] Xie L., Song S., Eldar Y. C., et al., Collaborative Sensing in Perceptive Mobile Networks: Opportunities and Challenges[J]. IEEE Wireless Communications,2023, 30(1):16-23
- [24] Leyva L., Castanheira D., Silva A., et al., Two-stage estimation algorithm based on interleaved OFDM for a cooperative bistatic ISAC scenario[C]//Proceedings of 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring), Helsinki, Finland, 2022
- [25] Kanhere O., Goyal S., Beluri M., et al, Target localization using bistatic and multistatic radar with 5g nr waveform[C]//Proceedings of 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference: (VTC2021-Spring), 2021: 1-7
- [26] Berger C. R., Demissie B., Heckenbach J., et al., Signal Processing for Passive Radar Using OFDM Waveforms[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(1): 226-238
- [27] Wu M. and Hao C., Super-Resolution TOA and AOA Estimation for OFDM Radar Systems Based on Compressed Sensing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(6): 5730-5740
- [28] Zhou J., Li W., Jiang S., NLOS Identification and Ranging Error Mitigation for UWB Signal[C]//Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). IEEE, 2022: 1-5
- [29] Zhang X., Xu J., An Indoor NLOS Identification and Extraction Algorithm Based on Multi-dimensional Data Correlation[C]//Proceedings of 2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE, 2023: 1-5
- [30] Li Z., Tian Z., Zhou M., et al., An accurate and robust environment sensing algorithm for enhancing indoor localization[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). IEEE, 2018: 244-249
- [31] Shi Q., Liu L., Zhang S., Joint Data Association, NLOS Mitigation, and Clutter Suppression for Networked Device-Free Sensing in 6G Cellular Network[C]//Proceedings of 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2023: 1-5
- [32] Gentner C., Jost T., Wang W., et al., Multipath assisted positioning with simultaneous localization and mapping[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(9): 6104-6117
- [33] Witrisal K., Meissner P., Leitinger E., et al., High-accuracy localization for assisted living:

- 5G systems will turn multipath channels from foe to friend[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2016, 33(2): 59-70
- [34] Yang J., Wen C. K., Yang X., et al., Multi-Domain Cooperative SLAM: The Enabler for Integrated Sensing and Communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(1): 40-49.
- [35] Amjad B., Ahmed Q. Z., Lazaridis P I., et al., Radio SLAM: A Review on Radio-Based Simultaneous Localization and Mapping[J]. IEEE Access, 2023
- [36] Yang J., Wen C. K., Jin S., Hybrid active and passive sensing for SLAM in wireless communication systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(7): 2146-2163
- [37] Yin X., Wang S., Zhang N., and Ai B., Scatterer localization using large-scale antenna arrays based on a spherical wave-front parametric model[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(10): 6543–6556
- [38] Lu S., Liu F. and Hanzo L., The Degrees-of-Freedom in Monostatic ISAC Channels: NLoS Exploitation vs. Reduction[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(2): 2643-2648
- [39] Zhao T., Li J., Yang W. et al., Joint Estimation on the Reflector Velocity and Normal Direction Through NLoS Echo Signals[C]//Proceedings of 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring), 2023, pp. 1-7
- [40] Pucci L., Matricardi E., Paolini E., et al., Performance analysis of a bistatic joint sensing and communication system[C]//Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), IEEE, 2022: 73-78
- [41] Sakhnini A., Guenach M., Bourdoux A., et al., A cramer-rao lower bound for analyzing the localization performance of a multistatic joint radar-communication system[C]//Proceedings of 2021 1st IEEE International Online Symposium on Joint Communications & Sensing (JC&S), IEEE, 2021: 1-5
- [42] Li R., Xiao Z., and Zeng Y., Beamforming towards seamless sensing coverage for cellular integrated sensing and communication[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 2022: 492-497
- [43] Zhang X., Han L., Han Z., et al., Interference Analysis for Collaborative ISAC Networks[J]. Communications of HUAWEI RESEARCH, accepted

