6G 通感一体化：从愿景到实现

Thorsten Wild#、Artjom Grudnitsky#、Silvio Mandelli#、Marcus Henninger#、Junqing Guan#、Frank Schaich#
#诺基亚贝尔实验室斯图加特，70469 斯图加特 电子邮箱：{firstname.lastname}@nokia-bell-labs.com
提交至召开的专题会议“通信与雷达感知联合——迈向 *6G* 的一步”

arXiv:2305.01978v1 [eess.SP] 3 May 2023

摘要 —**通感一体化（ISAC）可能最早于 5G-A 阶段部署到蜂窝通信系统中，并必将在 6G 中实现。本文探讨通感一体化的用例、系统设计的关键技术构建模块及其解决方案和未解的研究问题。此外，我们介绍一种基于商用 5G 通信硬件、工作于毫米波频段并采用感知专用算法扩展的概念验证（PoC）。这种新型通感一体化概念验证可在同一频段内同时实现高速率通信和 OFDM雷达感知。文中展示了初步的行人检测结果，表明通感一体化在未来蜂窝网络中的可行性。这些结果还显示了系统可达到的感知距离，并根据概念验证系统通信硬件的稳定性，提供了有关可实现的距离估计精度的参考。**

一、引言

预计6G蜂窝通信将于2030年实现商用。其愿景的一个关键要素是构建连接不同世界的体系 [1]。这意味着在软件中呈现物理世界和生物世界，即数字孪生。数字孪生体能够发挥重要作用，尤其是在工业领域，可提升生产力、安全性和安保水平。每一代无线通信技术都采用了更大的带宽、更密集的网络、更强的处理能力和更多的天线。随着蜂窝通信系统在这些发展趋势下实现无处不在的部署，射频感知一体化正变得愈发重要，可扩展网络服务能力，并为数字孪生体提供来自环境的必要上下文信息。6G网络将成为传感器 [2]–[4],，充分发挥蜂窝系统在干扰管理、广域覆盖以及严格控制和调度运行等方面的优势。5G系统已具备主动定位能力 [5], ，定位参考信号可由用户设备（UE）或基站（BS）发送，后者也称为下一代基站（gNB）。此外，针对5G系统，3GPP标准化已确定通感一体化（ISAC）的潜在用例 [6], ，使系统能够检测未连接到网络的物体。已有大型公共资助项目，例如 [7], ，致力于在未来几年推动通感一体化技术与系统设计方面的协作。

本文从频谱和关键用例出发，探讨6G通信感知一体化。我们将介绍技术构建模块、现有解决方案和研究挑战，最后介绍一种新颖的实时通感一体化概念验证，该方案基于商用5G通信硬件，并结合专用感知处理单元。我们利用通信分离处理架构的接口进行感知，并采用经杂波消除和跟踪算法增强的正交频分复用（OFDM）雷达处理算法 [8],。在我们的概念验证中，即使通信服务持续运行，感知开销也可低至0%。我们展示了人体检测的示例结果，表明该方案能够实现一定的距离估计稳定性和精度。

II. 6G通信感知一体化基础概述

由于通信感知一体化具有集成特性，可以使用相同的频段和相同的载波同时实现通信与感知，因此通信感知一体化能够非常高效地利用频谱；此外，蜂窝系统的复用能力（例如基于 OFDM 波形的复用能力）可以在通信服务质量与即将引入的感知服务质量之间进行高效权衡。频谱选择决定了系统能力。5G 容量层位于所谓的 FR1（频率范围 1）频段，即低于 5 GHz 的频段，所使用的带宽最高可达 100 MHz。FR2 覆盖约从 24 GHz 起的毫米波频段，带宽最高可达 800 MHz；由于具有更高的距离分辨率，它对感知更具吸引力。对于 6G，主容量层“黄金频段”预计位于 6—14 GHz，可提供最高约 400 MHz 的带宽，因此对广域感知具有吸引力。为了重用 5G 的站点网格，我们可以预期采用约含 1024 个天线单元的 Massive MIMO 基站（相较于 FR1，可抵消覆盖方面的劣势），从而也能利用大尺寸天线孔径实现角度分辨率。较低 FR1 频段的重新规划和频谱共享也可能发生，但可用带宽将受到限制。这意味着，在 6G 中，我们可以将黄金频段和 FR2 毫米波频谱视为最有潜力率先引入感知的候选频段。载波频率为 >100 GHz 的亚太赫兹技术也正在 6G 领域受到广泛讨论，并且能够提供巨大的带宽。回顾 5G 的商业引入情况，由于覆盖能力更好，FR1 频段占据主导地位，而 FR2 频段相对次要。如果 6G 的部署首先由通信系统的商业需求驱动，那么可以推断，亚太赫兹感知在早期 6G 阶段可能同样不会发挥最主要的作用。

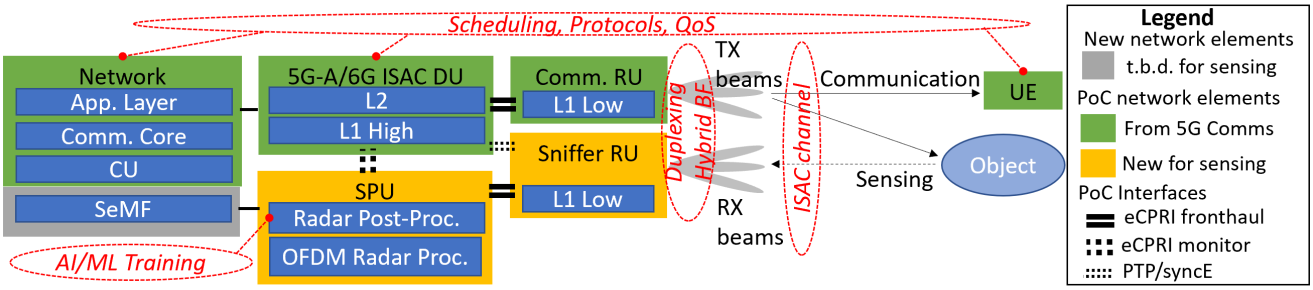


图1：系统概览　　w 包括我们的概念验证处理模块及相关研究挑战（红色）——单基地示例　　.

我们可以预期，关键的通信感知一体化用例将由与频率相关的部署场景驱动并得到促进。微蜂窝部署主要依赖FR2（以及作为替代方案或后续方案的亚太赫兹频段），将用于室内和热点区域。在工厂车间环境中，可以检测到行人、静态工厂物体或其他移动物体（例如机器人、自动导引车（AGV）和叉车）。这可以提升工业环境中的安全性。宏蜂窝部署将主导室外场景，其中黄金频段主要是感知所关注的关键频段。交通监控、高速公路入侵检测、道路安全、无人机/无人驾驶飞行器（UAV）入侵检测或跟踪，都是可能的用例示例。蜂窝网络能够提供基于基础设施的感知，而本地传感器从设备视角出发可能无法“绕过拐角进行观察”，因而会受到限制。

关于通信感知一体化（ISAC）的波形，前文提到的正交频分复用（OFDM）已在4G和5G通信系统中得到充分应用，并且在雷达领域也日益受到关注。因此，OFDM是利用同一载波频段复用通信与感知服务的一种颇具吸引力的选择。其唯一的缺点是峰均功率比（PAPR）较高。因此，例如在较高载波频率的情况下，通信系统可以采用单载波频域均衡（SC-FDE）作为替代方案，并利用与OFDM相同的频域感知处理方式。当然，其他波形替代方案（例如，将通信波形与调频连续波（FMCW）进行时分复用）也并未被排除，同样可以开展研究。

III. 技术构建模块

蜂窝系统可采用不同架构实现感知。如果感知处理位于基站（BS），系统的信令开销更低，对用户设备（UE）复杂度和电池功耗的要求也较低。位于基站的感知发射机可提供更大的覆盖范围（得益于更高的发射功率和更有利的部署位置）。单站感知需要近乎全双工的能力；通过将接收阵列稍作分离，并结合常规通信的时分双工（TDD）运行，可降低自干扰，正如我们将在第四节讨论的那样。此外，单站解决方案更易于利用数据辅助感知；若正在进行主动通信传输，这种方式有望避免感知开销。

感兴趣的感知方向。双基地感知可以避免这一问题，但需要接收感知实体静默传输，这会降低通信感知一体化系统的时间可用性，从而增加感知在通信系统基础上的额外开销。利用用户设备和基站也是一种双基地感知替代方案，但该方案要求感兴趣的位置有用户设备可用。

在我们的概念验证中，我们重点研究基于网络的单基地ISAC。图 1 展示了一个简化的端到端（E2E）系统概览（此外，还标出了我们所使用的概念验证接口和构建模块，具体如第 IV 节所述），其中采用了由射频单元（RU）、分布式单元（DU）和中央单元（CU）组成的基站拆分架构。如何提出得到业界认可的 ISAC 信道模型，使其能够在提供一定统计抽象程度的同时，有效模拟通信和感知性能，仍然是一个研究和标准化方面的挑战。目前，已达成共识的通信信道模型以统计方法为基础，可用于性能基准测试；但迄今为止，这些模型仍无法支持感知所需的特性，即在雷达散射截面参数的配合下实现完整的几何一致性。一种能够解决上述问题，并支持借助射线追踪辅助进行簇位置部署的 ISAC 统计模型，可能成为 3GPP 的一个有吸引力的发展方向，因此有必要在 Rel. 19 中对此进行研究，其中 [9] 中的第 8 章可作为研究起点。

要实现通信感知一体化（ISAC），射频前端设计必须考虑新的挑战，并重新审视那些已经得到充分研究的问题。全双工需要处理自干扰。我们通过使用独立的嗅探器 射频单元来接收反射信号，从而规避这一问题。借助适当的阵列设计和自干扰补偿机制，通信阵列和嗅探器可以作为子面板集成到单个射频单元中（或者，也可以基于 IV 中所述的分离处理接口，将二者布置得相距更远，以实现双基地／多基地工作）。请注意，在上行链路（UL）期间，可以使用两个阵列来提高通信模式的分集和信噪比（SNR）。另一个问题源于 FR2 甚至黄金频段中模拟和混合波束成形（BF）的存在。为了利用无线产品中实现的预定义波束网格码本获取环境的雷达图像，必须对角域进行适当的采样和插值。SARA [10]对此进行了处理，并定义了如何通过均匀采样实现阵列角度响应的无损重构。

在系统和共阵的离散傅里叶变换（DFT）波束空间及其对应的插值中。

在同一载波上同时调度通信信号和感知信号，带来了新的设计问题与机遇。通信调度器中的比例公平度量 [11] 应加以扩展，以纳入（i）传统通信业务和（ii）有待定义的感知服务质量（QoS）。5G 系统的端到端网络架构需要新增专用于感知的网络功能，我们可以将其称为感知管理功能（SeMF）。这一集中式功能负责汇总来自基站和用户设备的感知信息，并根据感知 QoS，为参与感知操作的小区提供高层资源分配管理。

随着 6G 成为 AI 原生空口，用于感知的人工智能/机器学习可利用现有的 AI 硬件加速，适用于目标检测和分类等任务；这些任务既可在基站本地执行，也可由 SeMF 集中执行。

IV. 概念验证架构

通信感知一体化架构的一个重要设计目标，是尽可能重复利用通信硬件来执行感知任务。OFDM 雷达方案 [8] 以频域发射（TX）参考信号和频域反射信号作为雷达处理链的输入。考察 5G 的可行功能拆分 [12], , 采用选项 7-2（在射频单元中执行快速傅里叶变换/快速傅里叶逆变换，并通过前传传输频域 IQ），即可在通信和感知中使用同类型的射频单元，并将分布式单元与射频单元之间的前传用作 OFDM 雷达处理的输入。

图 1 还展示了我们概念验证系统的架构。绿色的构建模块基于我们用作基础的商用 5G FR2 通信系统。为实现通信感知一体化，我们在该系统基础上扩展了以下组件：(i) 一个专用射频单元，称为 嗅探器，其类型与通信射频单元相同；(ii) 一台名为感知处理单元（*SPU*）的服务器，运行我们的实时 OFDM 雷达处理软件，以橙色标出。下一代基站射频单元工作在时分双工模式下（下行/上行比例为 4:1），而嗅探器始终处于上行模式，因此既能接收反射信号，也能接收来自用户设备的上行信号。

通信配置通过光纤上的增强型通用公共无线接口（25 吉比特以太网）传输同步、管理、控制平面和用户平面。DU 与 RU 之间的光纤上设有光纤分路器，使我们能够访问通信配置所用的发射波形和波束成形信息。嗅探器由 SPU 直接控制；SPU 切换波束，并请求通过控制平面接收无线资源，再通过用户平面接收反射信号的 IQ 数据。两台 RU 均通过光纤连接到公共同步源（5G 系统模块），并通过精确时间协议和同步以太网实现同步，使 gNB RU 与嗅探器之间的同步抖动达到 $\approx$40 ps。SPU 服务器硬件配备 25 吉比特以太网网卡，以便访问 gNB RU 和嗅探器的前传，并使 SPU 与 RU 同步到同一个精确时间协议源（5G 系统模块）。系统使用支持 CUDA 的 GPU 进行 OFDM 雷达处理和可视化。

SPU 处理链包括以下步骤：

- 参考信号与反射信号接收。接收并预处理来自下一代基站射频单元和嗅探器的增强型通用公共无线接口数据包。每个无线电帧都是一个 $N \times M$ 矩阵，其中 N 表示每个符号中的子载波数（SC）， M 表示无线电帧中的符号数。
- 信道计算。对反射信号和参考信号进行逐资源元素除法。
- 杂波消除。为了分离目标，必须去除由感知任务中不感兴趣的物体反射所产生的信号分量。系统校准期间，我们记录参考场景的信道，并在运行时将其从反射信号中减去。
- 距离/多普勒周期图计算。对信道执行 N 次快速傅里叶变换，然后对结果执行 M 次快速傅里叶逆变换。计算快速傅里叶变换和快速傅里叶逆变换结果中每个元素的平方幅值，从而得到二维周期图，其中包含已处理无线电帧的多普勒和距离信息。
- 峰值提取与插值。周期图中超过可配置阈值的元素可能是目标。其余元素通常会在距离域和多普勒域形成簇，这是由同一物体造成的。我们提取这些簇中的局部极大值，并据此构建目标列表（按元素值排序，该值对应接收功率）。
- 目标跟踪。检测到的目标可选择使用简单的卡尔曼滤波器（KF）进行跟踪。

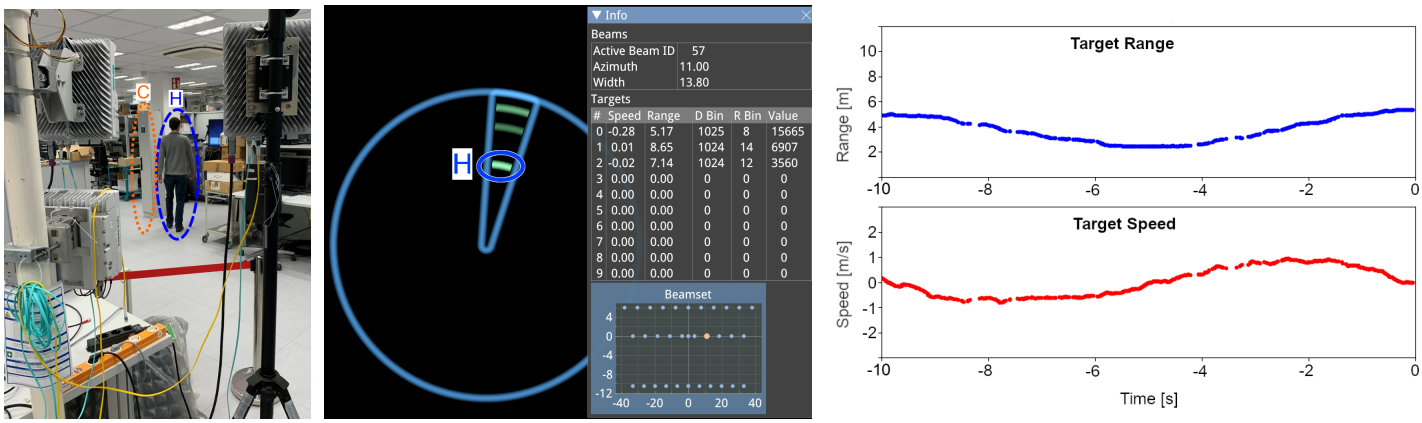
V. 首批结果

在实验室中使用上一节所述的系统，我们对一名行走中的人员进行跟踪。系统工作于 27.6 GHz 中心频率，带宽为 200 MHz，并采用 $\mu = 3$数字学（子载波间隔为 120 kHz，每帧包含 1120 个符号）。在本实验中，我们使用由 gNB RU 发送的测试信号（而非 UE 连接）；该信号使用无线电帧下行链路部分的全部子载波，并采用 16-QAM 调制。测试期间，波束保持静态（14° 半功率水平波束宽度）。两个 RU 均安装在约 1.9 m 的高度，gNB RU 与 Sniffer 之间的距离为 $\approx$40 cm。

图 2 展示了：(a) 场景照片；(b) SPU 的实时可视化“雷达视图”，其中人员对应于波束锥内的绿色弧线；以及 (c) 过去 10 秒内，经 KF 滤波的最强反射体（本实验中的人员）与 RU 之间的距离及其速度。

图 3 展示了杂波消除的效果——室内环境通常包含一些物体（例如金属柜和支撑柱 **C**），它们产生的反射比人体更强。通过杂波消除，可以去除这些反射体的影响，从而得到仅有目标**H**清晰可见的周期图。这使得将 OFDM 雷达结果用作输入的算法（例如目标跟踪）更加稳健。

在我们的首次实验配置评估中，对于距离为 $r_H^0 = 3$ m 的人体目标，测得的距离标准差为 $\sigma_H = 5$ mm；而对于距离约为 5.5m 的强杂波分量，测得的距离标准差为 $\sigma_C = 1$ mm，且此时尚未应用任何跟踪算法。



(a) 射频单元的照片（左上方为 gNB RU，右上方为嗅探器），拍摄方向为波束方向。(b) 经过峰值提取与插值后，由我们的 SPU软件实时生成的可视化结果。与人体**H** 对应的目标已突出显示。(c) 经过目标跟踪后，过去 10 秒内人体的距离和速度。

图 2：使用“行走的人”场景测试我们的集成通信与感知概念验证，其中人员**H** 朝着射频单元走去，随后又远离射频单元。杂波消除（突出显示主要杂波**C** ）已启用。

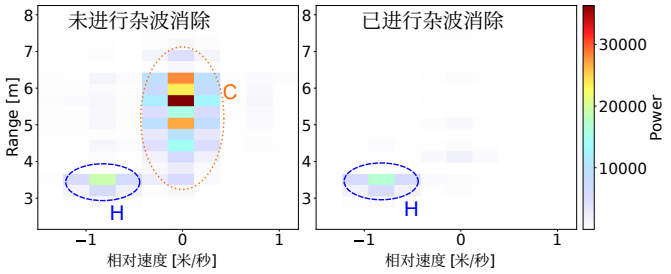


图 3：同一无线电帧在进行和未进行杂波消除时的周期图。杂波**C** 产生的反射远强于人体**H**。

已考虑。鉴于在人体 r_H^0距离处估计得到的信噪比为 $\gamma_H(r_H^0) = 10^{6.885}$，并假设自由空间路径损耗指数为$\eta = 2$，则对于采用本系统进行人体感知时，在一般距离 r 处所经历的信噪比可粗略表示为

$$\gamma_H(r) = \gamma_H(r_H^0) \cdot (r_H^0/r)^{2\eta} . \quad (1)$$

假设为了获得合理的谱估计性能，所需的最小信噪比（增益合并后）为 $\gamma_0 = 10^{1.7}$ [16], ，则可确定本系统进行人体感知时能够达到的距离为

$$r_H^* = \sqrt[2\eta]{\frac{\gamma_H(r_H^0)}{\gamma_0}} \cdot r_H^0 \approx 60\ m . \quad (2)$$

VI. 结论

本文探讨了蜂窝 5G-A 和 6G 系统中通信感知一体化的系统设计背景，介绍了技术构建模块、可选解决方案及研究挑战。随后，本文展示了一种新颖的概念验证实现及其结果，表明现有的毫米波 5G 硬件可为增添感知能力提供良好基础；借助适当的算法，不仅能够有效检测行人，还能将其与杂波区分开来。

致谢

本研究在 KOMSENS-6G 项目框架内开展，部分经费由德国教育与研究部通过资助编号 16KISK112K 提供。

参考文献

[1] H. Viswanathan 和 P. E. Mogensen，《6G时代的通信》，*IEEE Access*，第8卷，第57 063–57 074页，2020年。[2] C. De Lima、D. Belot、等，《6G系统中的融合通信、感知与定位：技术、机遇与挑战概述》，*IEEE Access*，第9卷，第26 902–26 925页，2021年。[3] Z. Wei、F. Liu、等，《面向多功能6G无线网络：融合感知、通信与安全》，*IEEE*通信杂志，第60卷，第4期，第65–71页，2022年。[4] T. Wild、V. Braun 和 H. Viswanathan，《超越5G和6G系统的通信与感知联合设计》，*IEEE Access*，第9卷，第30 845–30 857页，2021年。[5] M. Henninger、T. E. Abrudan、等，《采用离群值剔除的5G室内定位概念验证》，载于*2022 EuCNC*与*6G*峰会，IEEE，2022年，第249–254页。[6] 3GPP，《通感一体化可行性研究》，TSG SA，技术报告22.837，2023年，版本1.0.0（Rel. 19）。[7] *HEXA-X-II*项目，https://hexa-x-ii.eu/。[8] K. M. Braun，《移动通信网络中的OFDM雷达算法》，博士学位论文，2014年。[9] 3GPP，《0.5至100 GHz频率范围的信道模型研究》，TSG RAN，技术报告38.901，2023年，版本1.0.0（Rel. 17）。[10] S. Mandelli、M. Henninger 和 J. Du，《利用均匀阵列对角域进行采样与重构》，*IEEE*无线通信汇刊，2022年，在线提前发表。[11] H. SHI、R. V. Prasad、等，《无线网络中的公平性：问题、度量与挑战》，*IEEE*通信调查与教程，第16卷，第1期，第5–24页，2014年。[12] L. M. P. Larsen、A. Checko 和 H. L. Christiansen，《针对5G移动交叉传输网络提出的功能拆分综述》，*IEEE*通信调查与教程，第21卷，第1期，第146–172页，2019年。[13] *eCPRI*规范*V2.0*，http://www.cpri.info/downloads/eCPRI v 2. 0 2019 05 10c.pdf。[14] 《网络化测量与控制系统精密时钟同步协议的IEEE标准》，*IEEE*标准 *1588 2008*, -
[15] 《同步设备从时钟的定时特性》，*ITU-T*建议*G.8262/Y.1362 (11/18)*，
[16] B. A. Johnson、Y. I. Abramovich 和 X. Mestre，《MUSIC、G-MUSIC与最大似然性能崩溃》，*IEEE*信号处理汇刊，第56卷，第8期，第3944–3958页，2008年。DOI：10.1109/TSP.2008.921729。