恒定模量波形在以物联网为中心的集成传感和通信中的应用

Tian Han, Shalanika Dayarathna, Rajitha Senanayake, Peter Smith,
Aryan Kaushik, Alain Mourad, Richard A. Stirling-Gallacher, Jamie Evans

arxiv:2506.21078v1 中译本

摘要—集成传感和通信（ISAC）被认为是支持物联网等应用场景的关键技术，其中通信和传感都发挥着重要作用。多载波波形，如正交频分复用（OFDM），由于其高通信数据速率和良好的时带宽特性而被视为 ISAC 的良好候选者。然而，它们的高峰均功率比（PAPR）值会导致性能下降或系统复杂度增加。这可能会使 OFDM 不适用于在电源、系统复杂性、硬件尺寸或成本方面资源不足的物联网应用。本文提供了以物联网为中心的恒定模波形设计，利用单位 PAPR 的优势，在资源受限场景中更为适用。更具体地说，考虑了几种单载频频率和/或相位调制波形。基于雷达模糊函数、带宽特性、数据速率和通信接收机复杂度等性能指标，对其雷达传感和通信性能进行了全面讨论。

Index Terms—**集成传感与通信，联合通信和雷达，峰均功率比**

I. 介绍

A. 标准化状态

高质量的通信和广泛的感知是下一代无线网络的关键。它们为一个数据驱动的世界奠定了基础，在这个世界中，所有部分都是相互连接、被感知并配备了智能。近年来，传感与通信（ISAC）这两种长期以来分别设计和开发的功能的和谐融合，吸引了学术界和工业界的大量研究关注。

标准化在下一代无线网络中为 ISAC 发展一致框架方面发挥着至关重要的作用，在此框架内学术界和工业界可以共同工作。最近，行业已经开始为国际电信联盟无线电通信部门（ITU-R）的 2030 年国际移动通信（IMT-2030）制定愿景，面向第六代无线通信技术（6G）。ISAC 已经成为这一愿景中的一个热门主题，并因此被采纳为 ITU-R IMT-2030 [1] 的六个使用场景之一。这种兴趣是过去十年在基于正交频分复用（OFDM）的无线电雷达感知研究中取得进展的结果，成功将射频频段（RF）感测引入电气和电子工程师学会（IEEE）802 标准，并对第三代合作伙伴计划（3GPP）中的定位框架进行改进。这项定位工作是 5G 新无线（NR）的一部分，旨在实现厘米级定位以满足某些垂直行业的需求。在 ITU-R IMT-2030 采纳 ISAC 之后，在 2023 年底，欧洲电信标准化协会（ETSI）启动了一个关于 ISAC 的行业规范组（ISG），任务是简化 ISAC 预标准研究并为其在 6G 标准中的规定铺平道路 [2]。同时，3GPP 技术规范小组服务和系统方面工作组 1（SA1）启动了一项关于 5G-Advanced 中 ISAC 用例的可行性研究 [3]。随后，在 2024 年晚些时候，3GPP TSG 无线接入网络工作组 1（RAN1）开始一项专注于扩展技术报告（TR）38.901 中的 3GPP 基准信道模型的研究项目以支持 ISAC，并为在 5G-Advanced 和 6G 版本中规定 ISAC 铺平道路。在 2025 年 3 月举行的 3GPP 6G 研讨会期间，ISAC 被确认为行业向 3GPP 提出的将在即将发布的第 21 版（2028-2029）[4] 中规定的主题之一。除了标准制定组织正在进行的工作外，各种重要的工业协会也开展了并发表了关于重要 6G ISAC 用例的广泛预标准化工作。这包括 5G 汽车协会 [5]、5G 连接产业和自动化联盟 [6] 和 one6G [7]，他们在工业和/或自动车辆场景中提出了各种使用案例，并详细介绍了他们的假设、功能和性能要求。

在 6G 框架的发展中，大规模和可持续的物联网（IoT）被认为是移动用户的关键使用服务之一。ISAC 能够非常好地满足可持续性方面的要求，因为它支持传感和通信操作之间共享频谱和硬件资源。这反过来又使新兴的物联网应用得以实现，如车联网通信、远程 sensing、能源管理等。

B. 波形设计

为了实现通信和感知功能的完全集成，仍然存在一些未解决的开放性挑战，包括重要的联合波形设计问题。

在通信中，目标是从一个地方可靠地将数据传输到另一个地方。因此，通信波形调制信号的相位、频率和幅度（或它们的组合），以承载信息。在感知中，尤其是在雷达感知中，目标是检测目标并估计目标的距离、速度和其他物理状态信息。因此，雷达波形被设计成具有良好的自相关特性，以便更好地利用接收的回波来感知环境。通信和感知的集成需要对新的波形进行联合设计，使其能够同时执行这两种功能。

已经采取了多种方法来解决这个联合波形设计问题 [8]。感测（或雷达）中心的方法侧重于将信息嵌入传统的雷达波形中，包括线性频率调制（LFM）、跳频或多输入多输出（MIMO）波形。通信中心的设计集成了

Tian Han, Shalanika Dayarathna, Rajitha Senanayake and Jamie Evans are with the Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Melbourne, Australia (e-mail: tian.han1@unimelb.edu.au, dayarathnashalanika@yahoo.com, {rajitha.senanayake, jse}@unimelb.edu.au).

Peter Smith is with the School of Mathematics and Statistics, Victoria University of Wellington, New Zealand (e-mail: peter.smith@ecs.vuw.ac.nz).

Aryan Kaushik is with the Department of Computing and Mathematics, Manchester Metropolitan University, UK (e-mail: a.kaushik@mmu.ac.uk).

Alain Mourad is with InterDigital Europe Ltd, UK (e-mail: alain.mourad@interdigital.com).

Richard A. Stirling-Gallacher is with Huawei Technologies Duesseldorf GmbH, Germany (e-mail: richard.sg@huawei.com).

雷达感知功能到现有的通信系统中。示例包括设计基于 IEEE 802.11 框架的前导码以及使用诸如正交频分复用（OFDM）或正交时频空（OTFS）等多载波波形进行感测。从零开始设计的波形不依赖于现有的雷达或通信波形。这些设计通常被制定为优化问题，考虑了通信和感知性能指标，并在时间、频率和/或空间域之间分配资源。可以观察到，现有方法中时频资源分配在解决联合波形设计问题中起到了重要作用。例如，跳频雷达波形每个时间段使用一个子载波，而不同时间段的频率是不同的。因此，整个波形占据较大的带宽，导致高范围估计分辨率。然而，其多载波对应物可以在保证相同大带宽的同时实现更高的数据速率。此外，多载波系统允许通过调整用于传输数据和设计用于感测的子载波部分来在通信和雷达性能之间进行权衡。这些是正交频分复用（OFDM）被认为是非正交多址接入（ISAC）一个重要候选者的一些主要原因。

最近的工作集中在多载波波形，如正交频分复用（OFDM），作为一种有效的高传输速率方法，在所需的功率和计算能力可用时。然而，许多 6G 系统可能没有足够的资源在电源、成本和尺寸方面来支持先进的多载波技术及其相关的电路和组件。例如，一些现有的系统，如蓝牙和长距离无线电（LoRA），以及由 6G 引入的新应用，如雷达物联网（IoR）、智能可穿戴设备和无线雷达传感器网络，需要低功耗、低成本的设备 [9]。因此，对于利用高频段的此类应用推荐使用单载波调制和低峰均功率比（PAPR）波形 [10]。鉴于恒定包络调制仅需简单的低成本电路，并且以最高效率点运行功放，它在低功耗系统中是理想的，因为在这种系统中能量效率和成本超过了频谱效率。因此，在这项工作中我们专注于适合联合雷达和通信的恒定模波形设计。

C. 贡献

本工作的贡献概述如下。

- 我们提供了一个关于使用低 PAPR 波形的益处的全面讨论。我们还介绍了雷达和通信的关键性能指标。
- 我们介绍了多种常模频率和/或相位调制波形。还讨论了这些波形的性能。
- 我们提供了大量的数值示例，以根据引入的性能指标对基于常数模波形进行全面比较。

II. 关键绩效指标

在本节中，我们首先从雷达和通信的角度讨论在 ISAC 系统中具有低峰均功率比（PAPR）的重要性。然后，我们介绍了用于评估恒模 ISAC 波形的雷达和通信性能的指标。

A. 低 PAPR 的重要性

在雷达系统中，高平均发射功率对于实现更大的接收信噪比 (SNR) 从而实现更大的探测范围至关重要。这要求用于雷达系统的高功率放大器被设计成在饱和区或接近饱和区工作，以实现最大的输出功率效率。另一方面，在饱和点附近工作的功率放大器会导致非线性行为。这与放大器退避要求相结合，表明峰值功率与平均功率之比或 PAPR 需要较低，以实现高效性能。因此，调频连续波 (FMCW) 雷达信号和许多其他确定性雷达波形，如 chirp、Barker 和 Polyphase 码，通常具有单位 PAPR 值，使其具有很高的功率效率。任何偏离该单位 PAPR 的行为都会导致相关主瓣内的能量损失，从而降低峰值响应水平并导致雷达中的检测损失 [11]。

类似地，通信接收器的检测效率对信号处理环路中使用的非线性设备敏感，原因是频谱再生引起的。因此，由于输入信号中的高 PAPR 导致的非线性失真降低了发射机功率放大器的效率。这是通信系统的一个重要缺点，因为需要高精度的数模转换器来解决这一问题 [12]。例如，在 OFDM 系统中，高 PAPR 可以产生诸如带外和带内失真的问题。带外失真由于相邻信道泄漏比增加而影响邻近频道用户性能，而带内失真则因高误差矢量幅度而影响接收器性能。因此，低 PAPR 是资源受限的 ISAC 应用中的一个重要属性。此外，高 PAPR 导致电池消耗增加，使得 IoT 和 IoR 设备中要求的 10 年电池寿命变得不切实际 [9], [13]。

尽管多载波波形由于高 PAPR 而受到关注，作为 ISAC 波形因其高数据率而获得了显著的关注。因此，也提出了不同的 PAPR 减少技术，例如线性化电路，以降低 ISAC 系统的性能下降 [12]。然而，此类解决方案需要额外的电路开销和增加复杂度。这反过来会增加设备成本或由于 OFDM 信号失真 [14] 而降低误码率（BER）性能，使得它们不适合低成本、低复杂性和低功耗应用。例如，现有的应用程序如蓝牙、LoRA 和 IoR 在电源、尺寸和成本方面没有足够的资源来容纳具有复杂 PAPR 减少技术的多载波调制。相比之下，恒定 PAPR 波形简化了天线和射频组件的设计过程，从而提供了更好的性能与简化的 RF 组件、减小尺寸和重量以及更低的成本等优势，使其成为能量效率和成本优于频谱效率的应用的理想选择。

B. 雷达感知性能

雷达波形的性能可以通过局部准确度和全局准确度来衡量。专注于延迟-多普勒平面的主要瓣，我们可以分析局部准确度。它通过延迟分辨率和多普勒分辨率来测量。多普勒分辨率由信号的整体持续时间决定，并且如果波形的时间长度保持不变，则其也保持恒定。另一方面，雷达的延迟分辨率直接与脉冲压缩系统下的雷达信号的均方带宽相关。均方带宽越高，延迟分辨率就越高。因此，我们考虑均方带宽来评估雷达局部性能。专注于延迟-多普勒平面的其余部分，我们可以分析雷达感应的全局准确度。它描述了在杂波存在下目标检测的准确性，并且可以通过误警率和漏检概率来测量。当发射功率保持不变时（正如本文讨论的所有波形的情况），给定阈值下的漏检概率几乎是相同的。另一方面，误警率取决于接收到信号的能量分布。使用一种重要的雷达分析工具——模糊函数 (AF)，可以利用峰值副瓣电平 (PSL) 对其进行评估，定义为 AF 中最高副瓣峰的幅度与主瓣峰的幅度之比。如果 PSL 较低，则会减轻附近目标的遮蔽效应并降低误警率。因此，我们考虑 AF PSL 来评估雷达全局准确度。

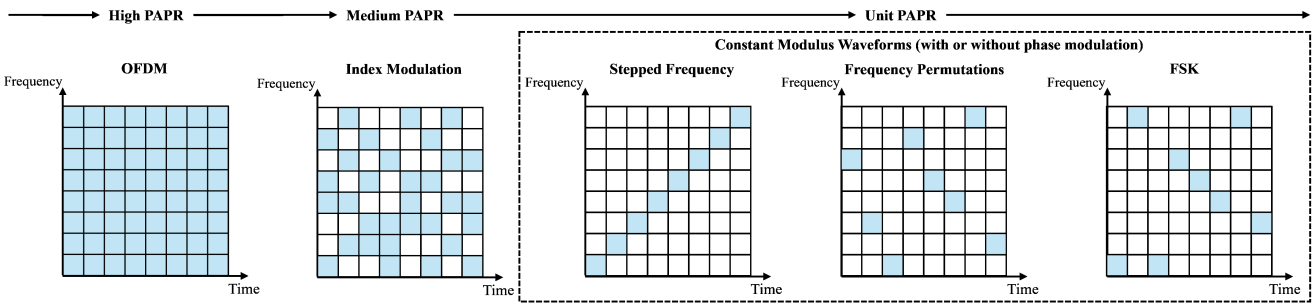

图 1. 具有不同 PAPR 值的 ISAC 波形。

C. 通信性能

从通信角度来看，性能可以通过吞吐量/数据速率、可靠性和实现可行性来衡量。请注意，通信数据速率取决于信道，并且在不同的通信信道之间可能会有很大差异。鉴于本工作的范围仅限于不同波形的回顾，我们考虑的是在完美信道下可达到的最大可能数据速率，而不是关注在不同通信信道下的数据速率。因此，我们考虑每个子脉冲可以传输的比特数，而不考虑信道，以评估每种波形的通信数据速率。我们还注意到，通信的可靠性完全取决于信道，并且作为性能指标，在本工作中并未予以考虑。在实现可行性方面，本文所考虑的所有常模波形的通信发射机都可以使用现有的 OFDM 指数调制（OFDM-IM）架构来实现。然而，如第 III节所述，通信接收器结构取决于特定方案和所考虑的数据调制技术。因此，我们考虑通信接收器的计算复杂度以评估每种波形的实现可行性。更具体地说，我们使用常用的 $\mathcal{O}(\cdot)$ 复杂度除以子脉冲数作为每个子脉冲的复杂度衡量标准。

III. 恒模波形

A. OFDM 与单载波波形

虽然多载波波形如 OFDM 通常被认为是 ISAC 的良好候选者，但在本文中我们考虑恒定模波形，因为其单位基带 PAPR 特性在物联网应用中的重要性。与 OFDM 相比，恒定模波形在每个时隙使用单个载波频率而没有任何幅度调制，如图 1所示。虽然基于 OFDM 的方案通常无法实现单位 PAPR，但这些恒定模波形也可以被视为 OFDM-IM 的特殊情况，在这种情况下，每个时隙只选择一个子载波。

B. 固定频率模式的波形

传统分步频率波形，如图 1中虚线矩形左侧的时间-频率块所示的具有所有可用频率线性模式的波形，提供了对波形带宽 [8, Chapter 7] 的确定性控制。虽然线性分步频率（LSF）波形因它们的 AF 中的大斜边脊而导致高 PSLs，但科斯塔斯编码分步频率波形考虑了精心设计的频率排列以最小化 AF PSLs。相移键控（PSK）可以独立应用于每个时间槽（或子脉冲）来嵌入数据，这对其雷达性能几乎没有影响 [8, Chapter 7]。由于使用固定频率模式，数据率和通信接收器仅适用于纯 PSK。

C. 频率可变的波形图案

数据调制也可以通过频率调制来实现，例如，使用所有可能的频率排列而不是特定的一个 [8, Chapter 7]。一个示例频率排列由图 1虚线矩形中间的时间-频率块给出。这种方案保持了对波形带宽的确定性控制，而 AF PSL 会随着频率模式的变化而变化。基于排列的数据率取决于总波形数，这等于子脉冲数的阶乘。最优通信符号检测器使用高效的匈牙利算法，其在最坏情况下检测波形中所有符号的复杂度与子脉冲数的立方成正比。仔细选择的频率排列子集。可以用来改进雷达性能或减少通信检测错误概率，尽管这会导致数据率下降。基于频率排列的数据速率可以通过加入每子脉冲独立 PSK 来提高，对雷达性能影响很小。然而，它给最优通信符号检测器引入了额外的复杂性。

为了降低这种复杂性，如图 1中虚线矩形最右侧的时间-频率块所示，已经考虑了独立的子脉冲频率移键控（FSK）[8, Chapter 7]。这允许频率重复，这意味着波形带宽的确定性控制丢失，但有助于速率和复杂性的降低。相位调制也可以被纳入到 FSK 方案中，既可以使用 PSK [8, Chapter 7] 提高数据率，也可以通过专门设计的相位序列 [15] 减少 AF PSLs。对于后者，每个频率序列的相位序列是通过求解一个目标函数为 PSL 的优化问题获得的。请注意，在有相位序列的情况下，子脉冲之间的独立性不再存在。在本文中，通信接收器使用高效的次优非相干检测器。该检测器具有与最优 FSK 检测器相同的复杂度，但误码率略有增加。

请注意，第 III-B节和第 III-C节中提到的大部分结论都来自 [8, Chapter 7]，除了相位优化部分，该部分内容来自 [15]。详情请参阅这两份材料。

为了提供关于频率和相位调制方案选择的一般指导，使用频率置换允许与固定频率模式相比实现更高的数据率同时保持对波形带宽的确定性控制。然而，它引入了可变的 AF PSLs（非散射损耗）以及较高的通信符号检测复杂度。使用 FSK（频移键控）降低了通信接收机的复杂度并实现了比置换更高的数据率，但带宽会根据频率模式变化。此外，将 PSK（相移键控）与所有提及的频率调制方法结合可以进一步提高数据率而对 AF PSL 和带宽的影响较小，同时增加了通信接收机的复杂性。请注意上述讨论是概括性和定性的，因为没有指定波形参数则无法进行定量分析和比较。因此在第 IV节中，基于数值示例提供了详细的性能对比。

IV. 性能比较

在本节中，我们根据第 II节提到的性能指标，全面讨论了第 III节中提及的所有信号方案的通信和雷达性能权衡。图 2到图 5比较以下方案的通信和雷达性能，所有方案均具有 $L = 64$ 个子脉冲：(1) 四相移键控（QPSK）调制的 LSF 波形，(2) QPSK 调制的科斯塔斯频率编码波形，(3) 频率置换，(4) QPSK 调制的频率置换，(5)64 进制 FSK，(6) 最小化 PSL 的 64 进制 FSK，以及 (7)64 进制 FSK 和 QPSK 调制波形。对于所有方案，我们考虑带限矩形函数作为子脉冲成形函数，在带限前的时间域宽度为 T，带限频率为 $B = 1/T$。所有方案之间相邻频率的间隔是 $\Delta f = 1/T$。这些波形参数的选择确保了所有方案的整体带宽和占用的时间持续时间相同，从而导致相对公平的性能比较。

由于对所有考虑的信号方案进行一些雷达性能指标的理论分析不可用，因此基于每种方案使用一千个波形实现的蒙特卡罗仿真数值评估这些雷达性能指标。所有雷达指标的经验均值由图例中标记所示的垂直轴值表示。如果某个方案的特定雷达指标取决于数据，则使用箱线图可视化其统计信息，并且边框颜色与相应的标记相同。如果两种方案在某一通信指标上具有相同的性能，它们的箱线图会稍微水平偏移以避免重叠，并用虚线指向横轴上的同一值。在每个图中，我们使用带有文本“最佳”的箭头指向表示最期望性能的角落。

图 2和图 3展示了归一化到子脉冲宽度 T 的均方根带宽，相对于两个通信性能指标的变化。尽管这里没有展示，通过 Matlab 模拟实现的通信检测器的平均运行时间遵循与我们在数值实例中提出的接收机复杂度相同的顺序。使用跳频序列（包括线性模式和科斯塔斯码）以及频率置换导致了独立于特定传输波形选择的稳定的延迟局部精度。两种 PSK 调制的跳频方案的数据率和接收机复杂度仅取决于 PSK 调制阶数，即 4，结果是在所有讨论的方案中具有最佳的复杂度和最差的数据率；而使用置换则导致了第二低的数据率和相对较高的符号检测器复杂度。将 PSK 引入置换显著提高了数据率而不影响稳定的延迟局部精度，但它进一步增加了已经很高的检测器复杂度。仅 FSK 方案和相位优化的 FSK 方案具有比基于置换方案更低得多的检测器复杂度和相对高的数据率。结合 PSK 与 FSK 导致了所有方案中最大的数据率以及适度的接收机复杂度。然而，独立子脉冲频率调制引入了无法控制的延迟局部精度，这在三个箱线图的离群值中显示了出来。我们观察到带有相位调制的基于 FSK 的方案与没有相位调制的情况具有相似的均方根带宽性能。这是因为初始相位项对基于 FSK 波形的均方根带宽的影响可以忽略不计，除非在罕见情况下大多数子脉冲具有相同的中心频率。

图 4和图 5绘制了 AF PSL 与两个通信性能指标的关系。在所有考虑的信令方案中，PSK 调制 LSF 方案具有最大的平均 AF PSL。这是由 LSF 波形的 AF 的巨大对角脊引起的，而相位调制为 PSL 引入了较大的方差。相比之下，PSK 调制科斯塔斯编码方案具有无方差的最低 AF PSL，这得益于科斯塔斯码的时间-频率相关性完美的属性。仅使用 FSK 的方案也由于次脉冲独立频率调制而具有较大的平均 AF PSL 和较大方差。使用频率置换略有减少了经验值和 AF PSL 的方差。在 FSK 和置换中引入 PSK 调制会降低它们的平均 AF PSL。同时，大多数 PSK 调制 FSK 和置换方案的 AF PSL 值集中在一起，这可以通过较小的四分位间距和胡须之间的距离来展示。最小化 PSL 的 FSK 具有非常接近科斯塔斯且方差很小的极低平均 AF PSL，归功于优化问题的解决方案。

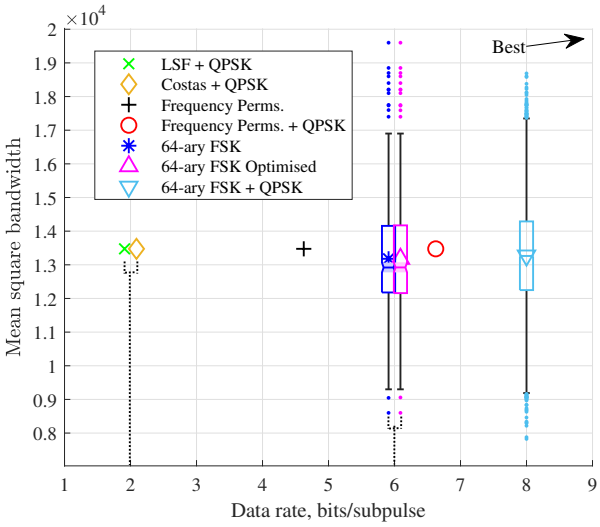

图 2. 正态化平方 RMS 带宽与比特/亚脉冲数据速率的箱线图，针对七种恒定模 JCR 信号方案。请注意我们在图 2至图 5中使用 perms. 作为排列的缩写。

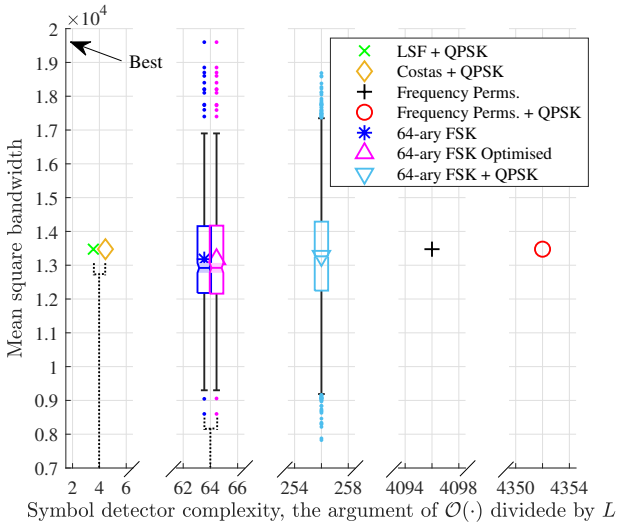

图 3. 归一化平方 RMS 带宽的箱线图与七种恒模 JCR 调制方案的每个子脉冲符号检测器复杂度平均值的关系。

总结来说，在所有考虑的方案中，如果希望获得最高的数据速率、相对较低的通信检测复杂度和适度的 AF PSLs，而均方根带宽的变化无关紧要，则应结合使用 FSK 和 PSK。仅使用 FSK 可以实现更低的符号检测复杂度，并且具有类似的 AF PSL 和 RMS 带宽性能，但这会降低数据速率。对 FSK 进行基于相位的 PSL 抑制无法稳定均方根带宽，但它会导致极低且稳定的 AF PSLs 以及与仅使用 FSK 相同的低符号检测复杂度和数据率。如果希望获得相对较高的数据速率、相对较低且

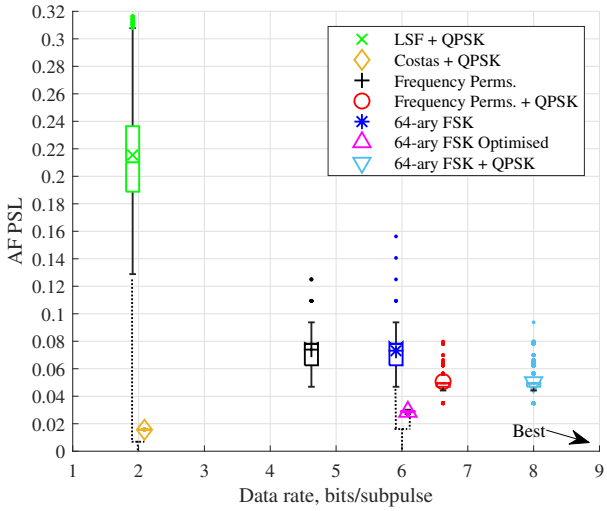

图 4. AF PSL 与比特/子脉冲数据率的箱线图，适用于七种恒模 JCR 信号方案。

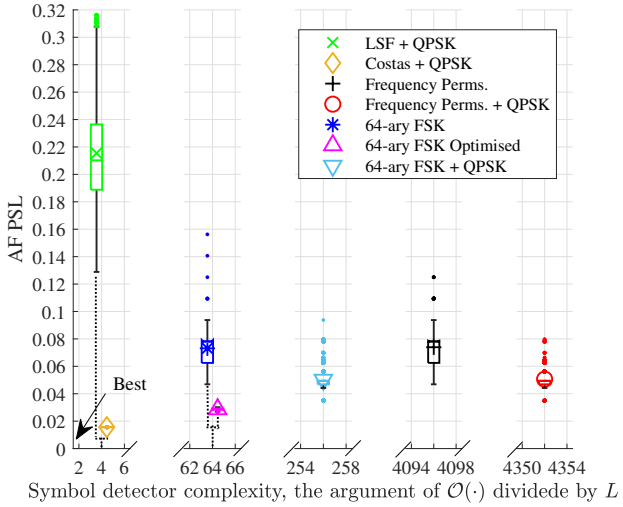

图 5. AF PSL 的箱线图与七种恒模 JCR 信号方案的每个子脉冲符号检测器复杂度平均值的对比。

稳定的 AF PSLs，并在数据调制下具有不变的 RMS 带宽，则应选择 PSK 调制频率置换，尽管它的符号检测复杂度最高。仅使用置换会导致相同的稳定均方根带宽以及更低的检测复杂度（虽然它是第二高），通过略微牺牲 AF PSL 并降低数据率到中等水平来实现。相位调制线性步进频率和科斯塔斯方案也具有稳定的 RMS 带宽。请注意，基于科斯塔斯的方案具有最低的 AF PSL 而线性方案具有最高的 AF PSL，但它们的通信性能相似，即最低的检测复杂度但也是最低的数据率。

V. 结论

ISAC 被认为是物联网应用中的关键技术，其中通信和传感都扮演着重要角色。由于典型物联网应用中资源限制，包括电力、系统复杂性、硬件尺寸或成本，多载波波形如 OFDM 由于高 PAPR 可能不太合适。为此，本文讨论了基于频率和/或相位调制方案的各种单载波 ISAC 波形，包括频率置换、FSK 和 PSK。这些波形具有单位 PAPR，因此在能量效率和成本优于频谱效率的应用中是理想的。根据 AF PSL、带宽特性、数据速率和通信接收器复杂性对它们的传感和通信能力进行了全面讨论。提供了数值示例以详细比较它们的性能。

参考文献

[1] IMT towards 2030 and beyond (IMT-2030), ITU-R, 2023, Accessed: May 10th, 2025. [Online]. Available: https://www.itu.int/en/itu-r/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2030/pages/default.aspx

[2] ISAC, ETSI ISG ISAC, 2025, Accessed: May 1st, 2025. [Online]. Available: https://www.etsi.org/committee/isac

[3] 3GPP TR 22.837 V19.4.0 - Study on Integrated Sensing and Communication, 3GPP, 2024, Accessed: May 1st, 2025. [Online]. Available: https://portal.3gpp.org/Specifications.aspx?q=1&releases=194

[4] Defining 6G Networks: A TelecomTV Special Series, TelecomTV, 2025, Accessed: May 10th, 2025. [Online]. Available: https://www.telecomtv.com/content/6g-report-series/the-next-steps-towards-6g-networks-52956/

[5] Study on integrated sensing and communication (ISAC) for C-V2X application, 5GAA, 2025, Accessed: May 13th, 2025. [Online]. Available: https://5gaa.org/study-on-integrated-sensing-and-communication-isac-for-c-v2x-application/

[6] Use Cases and Requirements for Integrated Sensing and Communication (ISAC) in Connected Industries and Automation, 5G-ACIA, 2024, Accessed: May 5th, 2025. [Online]. Available: https://5g-acia.org/whitepapers/use-cases-and-requirements-for-integrated-sensing-and-communication-isac-in-connected-industries-and-automation-2/

[7] 6G Technology Overview, one6G, 2024, Accessed: May 1st, 2025. [Online]. Available: https://one6g.org/resources/publications/

[8] K. Aryan, Ed., Integrated Sensing and Communications for Future Wireless Networks: Principles, Advances and Key Enabling Technologies, 1st ed. Elsevier, Jan. 2025.

[9] O. B. Akan and M. Arik, “Internet of radars: Sensing versus sending with joint radar-communications,” IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 9, pp. 13 – 19, 2020.

[10] R1-165016: Potential for system level gains with low PAPR waveforms, 3GPP, 2016, Accessed: Jun. 14th, 2024. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/dynareport?code=TDocExMtg–R1-85-31662.htm

[11] F. D. Palo, G. Galati, G. Pavan, C. Wasserzier, and K. Savci, “Introduction to noise radar and its waveforms,” Sensors, vol. 20, no. 18, p. 5187, 2020.

[12] T. Jiang and Y. Wu, “An overview: Peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM signals,” IEEE Trans. Broadcast., vol. 54, no. 2, pp. 257 – 268, May 2008.

[13] I. B. F. De Almeida, L. L. Mendes, J. J. Rodrigues, and M. A. Da Cruz, “5G waveforms for IoT applications,” IEEE Commun. Surv. Tutor., vol. 21, no. 3, pp. 2554 – 2567, 2019.

[14] Y. Wan et. al, “PAPR-degraded secure OFDM-WDM-PON based on chaotic set-partitioned SLM,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 33, no. 24, pp. 1387 – 1390, 2021.

[15] T. Han, P. J. Smith, U. Mitra, J. S. Evans, and R. Senanayake, “Can FSK be optimised for integrated sensing and communications?” IEEE Trans. Wirel. Commun., 2024, submitted for publication. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2405.00945