

面向人机物融合的泛在信号感知计算

关键词：人机物融合 泛在信号感知

谢鹏瑾 王继良
清华大学

在白雪公主的童话故事里，王后可以随时随地对着魔镜询问白雪公主的情况。而如此神通广大、随时能够对人进行感知的魔镜只是童话中的想象。如果我们想要在现实生活中获得一面“魔镜”，是否有可能呢？随着物联网技术的发展，无处不在的感知不再只是概念。近些年的研究发现，物联网环境中广泛存在的 Wi-Fi 信号、声音信号、光信号以及其他的无线信号等，除了完成他们的“本职”工作外，都可以用来实现感知的功能。与此同时，物联网中各种移动和边缘设备又为这些信号的处理和计算提供了方便的平台，支持我们利用泛在信号实现感知的目的。通过泛在信号感知构建起来的“魔镜”拥有无处不在的感知能力，成为物联网的重要愿景，也是面向人机物融合应用的重要基础。

感知是人机物融合应用的基础

除了基于传感器感知外，利用物联网泛在信号进行感知是物联网感知的重要手段。我们所在的团队一直从事物联网相关研究，最初专门部署了大规模无线传感器网络对环境进行感知。在对网络进行部署、维护和改进的过程中，我们发现专门的传感器网络部署确实能够满足特定领域的感知需求，但大规模网络的部署和维护都带来了不小的开销。同时，人机物融合的环境中感知需求更为复杂，完全

基于传统传感器的感知方式无法满足人机物融合场景应用中复杂多样的感知需求。

随着物联网技术的不断发展，出现了一种新的可能性。我们日常接触和使用到的物联网设备日渐丰富，从智能手机、智能手表、智能手环到智能电视、智能音箱等。这些设备的普及为用户提供了多种多样的物联网服务，同时这些设备也具备丰富的产生信号和处理信号的能力，在使用的过程中将各种不同的信号引入了我们的生活环境。这些广泛存在于环境中的信号，例如无线射频信号、声音、光、视频信号等，称为泛在信号。近些年的研究发现，如果泛在信号能够很好地利用起来，可以实现很多使用专门传感器无法有效支持的感知需求，与基于传感器的感知高效互补，全面地支撑人机物融合环境下的应用实现。

泛在信号感知

利用物联网场景下的泛在信号，能够为人机物融合下的物联网感知提供重要基础。由于环境中设备的多样性，泛在信号也是多种多样的，包括 Wi-Fi、蓝牙、LoRa 等设备产生的无线射频信号，具备扬声器的设备（如手机、电视和音箱等）发出的声音信号（包括超声波），各种光源发出的可见光信号等。通过采用合适的方法来分析这些泛在信号，探究外

界环境和信号之间的关联关系,使得这些信号可以“额外”具备感知的功能。

无线感知

无线感知是近年来物联网感知的研究热点。总体来说,无线感知是利用感知目标对无线信号的影响,通过分析无线信号的变化来推理感知目标情况。一般来说,我们最常见的、也最“离不开”的无线信号是 Wi-Fi 信号,人们常说的“你挡住我的 Wi-Fi 了”,其实就是一种最简单的利用无线信号感知人体存在的方法。当然挡住了 Wi-Fi 这一说法其实并不精确,实际上无线信号在空间中传播时,除了沿视距路径传播,发送端发出的无线信号还会通过多个反射路径到达接收端。一般情况下,接收端收到的为不同路径到达信号的叠加,这一现象被称为多径传播。当感知目标发生变化(例如有人移动了或者做了某一个动作)或者环境发生变化(例如环境中障碍物、家庭环境布局发生了变化)的时候,这些变化会对多径信号产生影响,导致通常所说的信道的状态产生变化,进而导致在接收端叠加的信号产生变化。

在 Wi-Fi 感知中经常使用信道状态信息(Channel State Information, CSI)作为感知的主要信息来源。

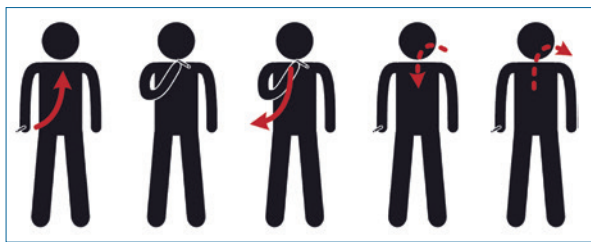


图1 进行抽烟动作时人体的姿态改变

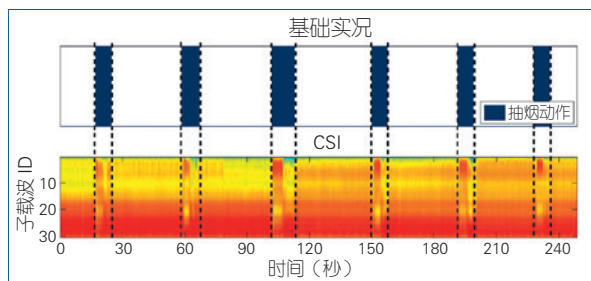


图2 抽烟动作对 Wi-Fi CSI 的影响

通过获取 Wi-Fi 信号中丰富的信道状态信息,可以用于动作识别和人体定位等不同感知需求,近些年出现了很多相关的研究工作。例如可以利用 Wi-Fi 的 CSI 信息进行抽烟动作的识别。如图 1 所示,抽烟过程中人体会产生连续的姿势状态变化,进而对经过人体反射的 Wi-Fi 信号产生影响。信道状态信息会随着人体抽烟的动作产生有规律的变化,如图 2 所示,抽烟动作发生时, Wi-Fi 的各个子载波的信道状态发生相应的变化,这些信号的变化为我们进行人体感知提供了基础。

Wi-Fi 信号几乎无处不在,为无处不在的感知提供了重要基础。同时 Wi-Fi 信号可以穿过各种障碍,甚至能够实现隔墙感知。近年来大量的研究工作表明 Wi-Fi 信号感知还可以实现运动动作识别、摔倒检测、人体定位等功能。通过对特定动作对应的信号特征进行学习,还可以支持多种多样基于感知的应用,例如睡眠检测、呼吸检测、Wi-Fi 跳舞毯等。然而 Wi-Fi 感知依然存在一些局限性,目前能够直接采集并提供 Wi-Fi CSI 给开发者的设备还非常有限,并不适用于所有广泛的物联网终端。Wi-Fi 有限的带宽也给高精度的感知带来了根本的限制。利用 Wi-Fi 信号 CSI 进行动作感知经常依赖于大量的样本学习,缺乏通过信号特征推断感知目标的有效模型,无法高效识别没有学习过的动作。在同时识别较多的动作种类时,或者当环境发生变化时,感知识别准确率会下降。如何解决这些问题是 Wi-Fi 感知走向实用的关键。

除了 Wi-Fi 信号,其他的无线信号也能够有效地支撑无线感知工作。例如特殊调制的高带宽的调频连续波(Frequency-Modulated Continuous-Wave, FMCW)无线信号,能够有效地提取信号的频率偏移或相位偏移等,具备更高精度的定位和感知的能力,这种信号一般需要专门的设备来产生和处理。毫米波(即波长为毫米的电磁波)目前也有了不少的实验平台和产品,其提供的高带宽也天然具备提供更高精度感知的能力。不过由于毫米波的高频率,使得其传播距离和穿透性也大大降低。用于远距离无线通信的低功耗广域网信号(如 LoRa)也可以

进行定位和感知,最近也出现了一些这方面的探索。LoRa 信号本身的远距离传输特性,使得 LoRa 感知具备较大范围的感知能力,但是感知精度受到其低带宽的限制,如何在实际中做到高精度的感知仍然是需要解决的问题。

声波感知

跟 Wi-Fi 信号类似,声音信号可以在大量物联网设备上产生和处理。现有的智能设备普遍具有扬声器和麦克风,可以作为声音信号的发送和接收装置用于产生和处理(超)声波。声音信号的传播速度远远低于电磁波信号,信号的采样频率也更低(例如一般手机上为 48 kHz),这使得声音信号更加适合在物联网设备上进行处理。通过分析声波信号的特征可以实现对物体的定位、追踪和感知等,一般常用的信号特征有声音的强度、频率和相位等,不同感知方法都在探索如何精准测量这些信号特征。例如基于多普勒效应的测距中,当声音接收端相对于声源移动,多普勒效应会导致接收到的信号频率发生偏移。测得信号频率的偏移则可以计算出设备移动的速度,进而计算设备移动的距离。基于调频连续波雷达的方法可以把所接收信号的频率差转化为信号传播的时间差,进而计算出距离的变化。通过计算目标移动过程中相位的变化,也可得到设备移动的距离。在一维测距和定位的基础上,可以通过设置多个信号源实现二维和三维的定位和追踪。我们在 2018 年提出了一种方法,利用声音信号的相位变化实现设备三维定位,参考了游标卡尺的测距原理,通过结合相邻两组窗口进行声音采样数据分析,可以实现在线性时间内亚毫米级别精度的定位和追踪效果。消除复杂的频率分析和过长的信号窗口,显著降低追踪延迟开销,同时实现了毫米级别的定位和追踪精度。

声音信号的产生和处理相对方便,定位和感知过程中计算相对简单,定位和追踪精度高。现在大部分物联网和移动设备都具备产生和处理声波的能力,基于声音信号能够产生丰富的感知应用。为了避免对人产生干扰,声音信号感知可以使用人耳听

不到的高频声音信号。另一方面,声音信号在空气中传播衰减较快,使得声音定位的范围受到限制。声音信号穿墙能力较弱且受多径效应影响较大,大部分工作都需要依赖视距路径才能取得较好的效果。

可见光感知

最近,基于可见光信号的感知也受到了广泛的关注。现在有很多光源(如 LED 等)支持可见光信号调制,通过对可见光信号的调制可以使其携带信息。利用物联网设备上常见的光强传感器、光电二极管或相机等可以采集到可见光信息,接收端通过分析光信号中携带的信息,实现定位、追踪和姿态感知的目的。常见的可见光中能够提取到的信息有光强度、颜色、偏振信息等。例如可以通过调制 LED 光源,使其向不同的方向发送不同强度或不同频率的光或对多个光源进行不同的光信号调制,在空间中产生特别的光线分布模式。接收端可以根据采集到的光线特征来推断光源所处的位置,实现对位置的感知。

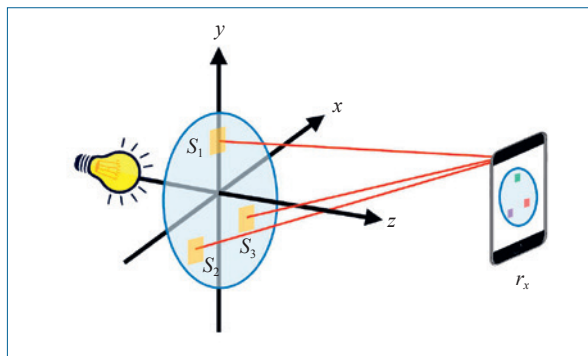


图3 基于光学标签和相机的定位示意图

即使不对光源进行主动调制,也可借助光学材料改变光的物理性质实现定位效果。例如可以通过光学材料对光源进行改造,使其发出的光呈现一定的空间特征。我们也设计了一种由偏振片和双折射晶体组成的可见光定位标签。该标签不使用电池和芯片,具备显色偏振的物理属性,会由于入射光方向不同而发生显色改变。通俗地说,从不同角度观察标签会得到不同颜色。如图3所示,通过捕捉到标签颜色可以计算出相机相对于标签的角度。基于

多个标签组合,根据到达角定位原理可以计算出相机和标签组合的相对位置。将标签组合贴到物体后,还可以利用相机对物体进行定位和追踪。

可见光信号为泛在信号感知提供了更多的可能性。可见光信号感知有很多优点,例如不会受到无线信号的干扰、光源普遍存在等。跟其他信号比,很多基于可见光信号感知方法的限制是感知设备和光源间不能有遮挡。另外,一些现有方法仍需要对光源进行硬件改造,要在真实场景中应用可见光感知技术,需要考虑这些实际的限制。

不同方法特点

表1展示了使用不同的泛在信号感知在一般条件下的特点比较。

感知范围 感知范围受信号发射功率和信号在空气中衰减模型的影响,不同信号支持的感知范围有所区别。由于声音为机械波,其覆盖范围一般小于电磁波信号,但仍然可以满足一般家庭房间级别的感知需求。在感知范围不够大时,可以通过部署多组设备来满足感知范围需求。LoRa信号展示了更大的感知范围可能性,不过其实际效果仍需要更多的研究。

感知精度 声波信号一般来说可以带来非常高的感知精度。基于电磁波的信号,例如Wi-Fi、毫米波、LoRa信号等射频信号的感知精度通常由信号带宽决定。高带宽信号如毫米波信号通常具备较高的感知精度,但其高频率也导致了感知范围的减小。

视距路径 信号绕射和穿墙能力决定了信号是否能沿非视距路径传播。光信号无法绕过障碍物和穿过墙壁,基于可见光的感知方法无法支持非视距

路径的感知场景。声音信号和毫米波信号的方法大多依赖于视距路径的信号传播模型进行感知。Wi-Fi和LoRa信号可以绕过障碍物,能够支持非视距路径感知。

设备要求 对声波信号的采集和处理可以在大部分物联网设备上实现,其余信号需要专用的信号发送和接收设备。Wi-Fi信号理论上可以在大部分支持Wi-Fi的设备上实现收发,目前在实际场景中仍然需要专门的网卡或者处理设备。

对人影响 泛在信号感知的一个重要要求是尽量减少对人的影响。许多基于可见光的感知方法需要调制光源,一般可以通过提高频率等方法使人感知不到,不过在某些调制方法或场景中,人能够感知到信号的影响。基于声波信号感知通常会采用超声波信号,但是由于实际硬件限制(例如手机麦克风)和调制方法的影响,实际使用中我们发现在部分情况下人会听到声波信号。可以看到,不同泛在信号感知方法具备不同的特点和限制,在使用中需要根据实际需要进行选择。

应用和挑战

基于泛在信号可以实现对人的动作、位置和行为的感知,实现对物体的定位和追踪,有着广泛的应用前景。例如在老年人的监护环境中,通过无线感知能够做到对老年人的全天候监护。通过动作感知,在发生危险(如老年人跌倒)时能够迅速地进行报警。同时通过对人的行为、动作和移动规律的感知,为老年人身体状况监测提供基础。注意,这一切都不需要专门的传感器,也无须为老人佩戴任

表1 各种泛在信号感知的特点

	感知范围	感知精度	视距路径	设备要求	对人影响
Wi-Fi	★★★★	★★★	不要求	支持CSI提取的Wi-Fi信号处理设备	无
声音信号	★★	★★★★	通常要求	麦克风、扬声器	视信号频率和调制方法
可见光	★★★	★★★	通常要求	LED、可见光感知设备、摄像头	视信号的调制方法
毫米波	★★★	★★★★	通常要求	毫米波收发设备	无
低功耗广域网信号(如LoRa)	★★★★★	★★	不要求	低功耗广域网收发设备	无

何专门的设备,对人不会产生任何额外的影响。利用声音信号的感知能力,智能音箱可以识别和追踪说话人的位置,实现更加丰富的应用。通过可见光标签,可以对传送带上的产品、超市货架的商品进行高精度的定位和追踪,进而实现产品自动分拣、购物兴趣挖掘等。泛在信号感知为人机物融合场景提供了丰富的信息输入,有效支持人机物融合应用的实现,带来了新的发展机遇。

另一方面,泛在信号感知在未来的发展中仍然面临一系列挑战。

感知维度 目前基于泛在信号的感知还主要集中在位置和动作感知等,这些感知信息满足了很多应用的需求,但仍然还有许多感知信息无法有效地获取到。如何进一步利用泛在信号实现更多维度的感知将会是未来研究的重要目标。

感知精度 在实际应用中泛在信号的感知精度仍然需要进一步提高,特别是在真实场景中噪声干扰更多,感知目标也更为复杂,导致了实际感知精度降低,如何进一步提高感知精度是需要解决的重要挑战。

场景普适 许多泛在信号的感知工作在可控的实验场景下能够达到较好的感知效果。在面对不同的外界环境、感知场景和感知目标时,需要能够有效适应不同感知应用的需求,在环境、场景和目标发生变化时仍然能够实现稳定精确的感知。

部署成本 泛在信号感知希望不依赖专门部署的设备,仅借助物联网场景普遍存在的信号收发处理设备,就可以实现无处不在的感知。在很多已有的工作中,感知信号的收发和处理仍需要专用设备,增加了大规模应用时的部署成本,应进一步考虑如何利用大量边缘和物联网设备等实现感知功能。

隐私问题 我们处在一个泛在信号无所不在的时代,泛在信号感知不需要像传统感知一样基于专用传感器,因此感知覆盖的场景和范围得到了极大的拓展,也会对人的隐私造成一定影响。另外一方面,如何防止信号被滥用也是需要注意的问题,例如基于声音信号的感知在使用麦克风采集信号的同时,也会采集到用户讲话的声音,造成隐私暴露的

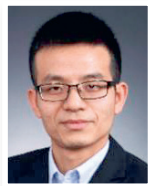
风险。

随着泛在信号的使用日渐广泛,更多感知维度的发掘,更稳定和更高精度的感知模型的出现和发展,泛在信号感知在人机物融合中将会展现更大的潜力。“仰以观于天文,俯以察于地理,是故知幽明之故”,古人相信用眼来观察事物,感知世界而“知幽明之故”,当时的人们应该没有想到,现在我们眼睛看不到的周围,存在着无数的信号,它们也用自己的方式观测着这个世界。 ■



谢鹏瑾

清华大学软件学院博士生。主要研究方向为物联网泛在信号通信和感知。
xiepengjin@gmail.com



王继良

CCF 专业会员。清华大学软件学院副教授。主要研究方向为物联网、低功耗广域网、移动计算。
jiliangwang@tsinghua.edu.cn

CCCF 征集专题选题

“专题”是 CCCF 最受读者欢迎的特色栏目之一,通过业界顶级专家撰稿,对前沿技术论题全面而深入的阐释,使读者了解计算机领域前沿动态。

专题采取邀稿、投稿相结合的组稿方式。CCCF 编辑部持续向业内专业人士广泛征集专题选题暨特邀编辑。如果您对本领域的科学技术有深入的研究和实践积累,并能组织本领域专家撰写一组高水平的专题稿件,希望您能提出选题计划,担当起此选题特邀编辑的职责,为计算机科学技术的传播和发展尽一份力量。

读者也可提出您感兴趣的选题建议。

联系: cccf@ccf.org.cn