SkinSense：利用运动传感器实现高效的人体基于振动的通信

Raveen Wijewickrama*德克萨斯大学圣安东尼奥分校 美国
raveen.wijewickrama@utsa.edu

Sameer Anis Dohad
walla*印度理工学院达尔瓦德分校 印度
180020033@iitdh.ac.in

Anindya Maiti
俄克拉荷马大学 美国
am@ou.edu

Murtuza Jadliwala 德克萨斯大学圣安东尼奥分校 美国
murtuza.jadliwala@utsa.edu

Sashank Narain 马萨诸塞大学洛厄尔分校 美国 sashank_narain@uml.edu

arXiv:2303.06037v1 [eess.SP] 7 Feb 2023

摘要

移动和可穿戴设备近年来日益普及，这重新凸显了对可靠且隐蔽的通信侧信道的需求，以支持秘密/PIN共享、共处证明和用户身份验证等应用。蓝牙/BLE和近场通信等现有短距离无线电技术虽然成熟且可靠，却容易遭到窃听、干扰和/或其他干扰，因此不太适合作为隐蔽通信侧信道。本文设计并实现了*SkinSense*，这是一种基于振动的通信协议，利用人体/皮肤作为通信介质，在用户随身携带的移动设备和可穿戴设备之间建立低带宽、隐蔽的通信信道。*SkinSense* 采用一种新颖的频率调制技术，将比特编码为振动脉冲，并使用基于频谱图的方法，对感测到的运动数据（对应于编码后的振动脉冲）进行解码，以重建传输的比特。*SkinSense* 利用人体受试者参与者收集的数据，针对多种运行参数、硬件配置和通信设置进行了全面评估。实证评估结果表明，在我们的定制硬件设置中，*SkinSense* 能够实现最高达 6.6 比特每秒的稳定带宽，误比特率低于 0.1，并可用作实用的通信侧信道。

关键词

泛在通信、侧信道、可穿戴设备

1 引言

过去几年，智能可穿戴设备的普及速度显著加快。智能手表、健身手环、智能眼镜和智能鞋等价格低廉的设备，为用户提供了智能手机之外的多种额外功能。除了少数能够独立运行的智能可穿戴设备外，绝大多数智能可穿戴设备都与用户随身携带的配对移动设备（如智能手机）配合使用。目前，移动设备（智能手机）与配对智能可穿戴设备之间的通信，主要通过蓝牙/BLE、近场通信和 Wi-Fi 等短距离无线电技术实现。尽管这些技术已经相当成熟，并且能够在移动设备之间实现可靠通信，但无线电信号容易遭到窃听、干扰和/或其他干扰，从而导致通信中断、隐私泄露，或两者兼有。在涉及这些设备的多种使用场景和应用中，确实需要可靠且隐蔽的非无线电通信侧信道。例如，可以使用低带宽的非无线电协议，将短小的秘密代码或个人识别码从智能手机快速、安全地发送到智能腕戴设备，以自动启动并建立高带宽、安全的无线电信道，例如蓝牙或 WiFi。除了秘密共享之外，具备这种带外通信侧信道还可为其他多种安全应用带来便利和实用性，例如证明设备共址和用户身份验证。近期一些关于替代体域通信信道的提案提出，利用光学 [6, 7] 和声信号 [10, 17]，在移动设备之间传输低带宽消息。然而，这类通信信道并不可靠，在存在噪声或环境条件不理想时往往表现不佳，而且不够隐蔽（即很容易被检测到） [27]。

该方向上的其他方案使用振动马达作为发射器，通常将其嵌入移动设备中，为用户提供触觉反馈 [15, 20, 25, 26]。在这类技术中，细粒度运动传感器（例如加速度计和陀螺仪，这些传感器也存在于大多数现代移动设备中）被用作接收器 [22]。Hwan 等人 [15] 率先提出，将振动马达与加速度计配对，以建立一种协议，实现放置在同一（坚硬）表面上的两部智能手机之间的低带宽通信。Roy 等人 [26] 随后提出了一种名为 Ripple 的方案，该方案提升了带宽并增强了安全性。Kim 等人 [16]提出，将智能手机用作定制医疗设备的振动发射器，并以植入皮肤下的加速度计作为接收器。之后，Sen 和 Kotz [29]提出使用智能戒指作为振动发射器，与配备加速度计的物联网设备进行通信；然而，要使其方案正常工作，发射器（智能戒指）必须与接收器（物联网设备）直接接触，才能确保通信可靠。

在这项工作中，我们受到这些早期研究工作的启发，探索利用振动马达和加速度计构建通信协议的可行性，使用户手持的两台移动设备（例如智能手机和腕戴式

* 这些作者对本研究的贡献相同。

设备）能够通过人体/皮肤这一底层物理介质传播振动信号。鉴于现代移动设备（如智能手机和可穿戴设备）始终与人体/皮肤接触，且预先配备了振动马达和运动传感器，这种通信技术无需特殊设置或硬件即可自然部署。此外，由于用户自身的人体/皮肤充当通信信道，该方案天然隐蔽，并能抵御简单的窃听。

尽管此前已有研究提出基于振动的通信技术，但要构建一种利用沿人体皮肤／身体传播的振动、能够抵抗噪声和动作干扰且易于部署的通信系统，仍需开展更多研究与实验，而这正是本研究试图实现的目标。为此，主要挑战包括：确定如何调制振动，使其能够通过人体皮肤／身体有效传播；以及如何在身体动作多变的情况下，高效地利用加速度计感测这些振动。此外，个体之间固有的解剖学差异和生物力学差异也会影响通信信道的效率。因此，在设计此类通信技术时，我们的主要要求是：(a) 对人体／皮肤中固有的振动噪声和解剖学差异具有**鲁棒性**，(b) 能够满足低带宽通信需求的**数据速率**，以及 (c) 在**移动性** 条件下（例如乘坐车辆出行时）仍能实现可靠通信。

本文的主要贡献是设计、实现并评估一种新颖的基于振动的通信协议，称为*SkinSense*。该协议利用人体／皮肤作为通信介质，在用户手持的移动设备和可穿戴设备之间建立低带宽、隐蔽的通信信道。我们通过*SkinSense*展示了这种方案的可行性和性能：既采用定制硬件配置，以便灵活操控各种硬件和协议参数，从而进行全面评估，也采用消费级设备。通过收集来自不同人体受试者的数据，我们在不同／变化的运行参数和通信设置下，对*SkinSense*进行了全面评估，

包括发射器与接收器之间的距离、设备方向、环境噪声、采样率、通信方向以及运动传感硬件（加速度计与陀螺仪）。此外，我们还深入分析各种 *SkinSense* 设计参数对通信性能和错误率的影响，通过实证评估其易受声学攻击或振动声（SoV）攻击的漏洞，并研究其能量需求。最后，我们系统地将*SkinSense*的性能与文献中的其他方案进行比较，并开展一项小规模用户研究，以了解最终用户对使用此类通信侧信道的感知和偏好。

2 背景

现在，我们简要介绍与所提出的通信协议相关的一些背景信息。

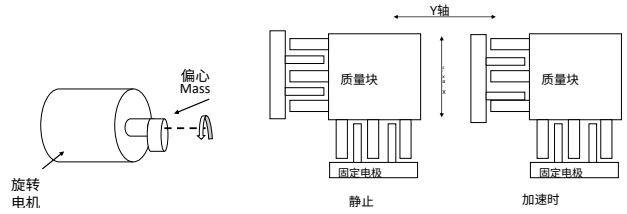


图 1：（a）ERM电机和（b）电容式加速度计的结构。

2.1 振动马达

振动马达是一种机械装置，它利用不平衡金属块的运动产生振荡或振动 [12]。现代移动设备（如智能手机和智能手表）大多内置此类马达，用于向用户提供触觉反馈或通知。振动马达主要有两种类型：(i) 偏心旋转质量块（*ERM*）电机，以及 (ii) 线性谐振致动器（*LRA*）电机。ERM电机由直流电驱动，并采用非对称质量块（图 1a），该质量块在旋转时会偏心运动 [28]。通过改变输入直流电压，可以控制振动的振幅和频率；随着电压升高，两者都会增大 [1, 26]。另一方面，LRA电机由磁线圈推动质量块上下移动以产生振动，并通过弹簧增强振动。LRA由精确的交流电流驱动，以达到弹簧的谐振频率，从而将振动马达的振幅和频率限制在非常狭窄的范围内。Huang 等人 [14]指出，与仅适用于简单二进制编码的LRA电机相比，ERM电机更适合需要对振动信号进行复杂编码的应用。因此，本研究采用基于 ERM 的直流无芯马达。

马达控制。 脉冲宽度调制（或 *PWM*）是一种通过将输入电信号有效地分割成离散部分来降低负载所消耗平均功率的技术，常用于控制大多数移动设备中的振动马达等惯性负载 [3, 19]。在脉冲宽度调制中，通过以快速且可变的频率开启和关闭电源与电机之间的开关，来调节供给电机的电压（和电流）的平均值。换言之，脉冲宽度调制可通过向电机提供一系列电脉冲或“开启-关闭”信号来控制其运行。通过改变这些脉冲的宽度来控制电机功率，进而改变施加到电机上的平均直流电压。最终，脉冲宽度调制能够在不改变电源电压等级的情况下，更精确地控制电机，这非常适合对电机振动进行信号编码。正如后文第 3.3 节所述，我们根据通过运动传感器采集的振动信号所获得的反馈，选取一定范围的脉冲宽度调制值来控制电机。

2.2 加速度计

加速度计用于测量设备相对于周围环境的加速度或速度变化。大多数现代移动和可穿戴设备都配备了微-

电磁式（或微机电系统） [9, 32] 加速度计，可支持从简单的步数统计到复杂的活动识别等应用 [31]。目前使用的微机电系统加速度计主要有两种：（i）压阻式加速度计，以及电容式加速度计 [11]。压阻式加速度计由连接到压电晶体上的质量块构成。当加速度计发生振动或移动时，质量块本身保持不变，而晶体会根据加速度的方向和大小受到压缩或拉伸。电容式加速度计（图 1b）由悬置在两块极板之间的质量块构成，其中一块极板固定，另一块则可在加速度计外壳内移动。当加速度计发生振动或移动时，极板间距会随加速度成比例变化，从而导致电容发生变化 [33]。由于体积更小且能够测量低频运动，大多数现代设备都配备了电容式加速度计 [9]。加速度计会沿三个轴输出原始测量值，其中重力分量作用于指向地面的轴。消费级移动设备中常见的另一种运动传感器是陀螺仪；与加速度计不同，陀螺仪测量设备的角速度。在第 4 节中，我们将使用加速度计和陀螺仪传感器，对所提出的通信协议进行比较评估。

2.3 振动的力学

振动是一种机械振荡，指物体围绕平衡点 [24]，在两种状态或位置之间反复来回运动。振动分为两种：自由振动和受迫振动。自由振动由外力短暂地向物体传递能量而产生（例如，拨动一次吉他弦）[24]。相比之下，受迫振动是持续施加于物体上的周期性外力（例如，反复推动游乐场的秋千）。振动可以用两个参数完整描述，即频率和振幅。振动频率描述振动物体运动的快慢，而振幅是物体振动时的最大位移，也就是振动的强度。物体振动时，其粒子会受到振动能的扰动；振动能从物体的一处传播到另一处，这种传播也称为振动波（图 2）。这些波在物体（或介质）中的传播效果取决于其分子结构（例如密度）。如果物体的分子排列紧密，则其刚度较高（例如木材或钢材）。与刚度较低的介质（例如靠垫）相比，这类物体或介质更善于传递振动波，使振动波传播得更远、更快、持续时间更长 [4]。振动波具有特定的波长（γ），即波上两个相邻波峰（最高点）之间的距离。当波从一种介质传播到另一种介质时，尽管波长会发生变化，频率却保持不变 [24]。这定义为 $v = f\gamma$，其中 v 是波的速度，f是波的频率。因此，从某个源头产生并传递到物体/介质中的振动波，其速度和波长可能会根据物体的刚度而变化。

在这项工作中，我们尝试利用智能手机等手持设备产生的振动来设计一种通信机制，使振动波得以传播并通过握持手持设备的手部皮肤传递至接收器。以往关于基于振动的通信方案的研究采用了木桌等物体作为传输介质 [26]。这些研究实现了非常高的数据速率和准确率，主要是因为木材刚度高，是振动波的良好传播介质。相比之下，人体皮肤刚度较低，会吸收更多振动，因此不太适合作为振动波的传输介质 [1]。因此，设计一种依靠振动波经人体皮肤传播的基于振动的通信方案，要困难得多。既有研究表明，振动波通过人体皮肤传播的情况与振源的振动频率相关；与振源的中间频率相比，在低频和高频下振动衰减更快（即振动无法传播到更远的距离）*[21, 30]*。由于我们的工作考虑的是手持设备与腕戴设备之间的通信场景，佩戴时两台设备之间自然会存在一定距离（该距离取决于手持设备的电机位置，范围为 15 cm 至 2 cm），当佩戴在手，了解并分析这种振动衰减以及振动频率的影响，对于设计有效的通信框架至关重要。为了确定这些有助于设计*SkinSense*的中间频率，我们进行了正弦扫描测试，具体说明见第3.2节。

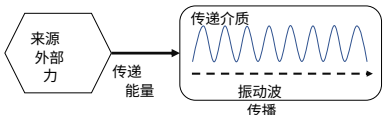


图2：振动能从源传播到介质。

基于前面对振动力学的高层次讨论，我们现在正式说明如何利用电机（例如 ERM电机）产生的振动，通过作为介质的人体皮肤发送振动波（或信号）。ERM电机产生的离心力表示为：

$$F = mr\omega^2$$

其中，F表示力（单位为 $Newtons$），m 表示偏心质量的质量（kg），r表示偏心质量的半径（$meters$），ω 表示角速度（电机转速），单位为 $rads/sec$ [24]。由于 m和 r 是电机的物理属性，无法更改，因此只能通过调节角速度 ω来改变电机产生的离心力。ERM电机的振动频率和振幅无法独立改变，且两者都会随输入电压线性增加。ERM电机的转速与施加的电压成正比，因此，如第 2.1 节所述，可通过脉冲宽度调制（PWM）调节电压来改变振幅/频率。如前所述，设计有效的皮肤通信方案，第一步是确定一组中间频率，使其能够以人体皮肤为介质，从手持设备良好地传输到腕戴设备。为了调制一组频率，我们采用基于PWM的技术，然后使用这些

不同频率对数据进行编码，具体内容将在第 3 节中详细介绍*SkinSense*。

3 系统

下面介绍*SkinSense*的设计及其他技术细节。首先概述系统架构，然后介绍通信协议的设计细节。接着介绍编码（调制）和解码（解调）算法的技术细节，并概述我们在实现*SkinSense*时采用的不同硬件配置。最后，介绍评估中使用的人体受试者数据和性能指标。

3.1 系统概述

图 3 展示了 *SkinSense* 的高层概览：它利用用户的手（具体而言是皮肤组织）作为通信信道，实现手持设备与腕戴设备之间基于振动的通信。我们考虑半双工通信信道，即手持设备和腕戴设备均可充当发射器和接收器，但信息在同一时间只能沿一个方向传输。此外，我们假设进行通信的设备位于同一只手上，但它们无需彼此发生物理接触。需要从手持设备传输至腕戴设备（或反向传输）的消息，首先通过第 3.3.1 节所述的编码（或调制）算法编码为振动信号流。随后，发射设备上的振动马达发出这些振动信号，信号经由手部皮肤组织传递至接收设备。接收设备的运动传感器记录这些振动，并使用第 3.3.2 节所述的解码算法对编码后的消息进行解码。



图 3：*SkinSense* 通信协议。

3.2 发射器设计

经过多轮迭代和初步研究，我们最终确定了传输算法。在研究过程中，我们仔细考察了振动如何通过人体皮肤传播，以及加速度计能否捕捉到振动。首先，我们希望探究能否识别或区分多个振动频率并用于数据编码，这样便能显著提高通信协议的带宽（相比只使用单一频率编码方案）。具体而言，我们分析了由电机产生并经由.....传播的不同频率振动，

皮肤上的振动会被加速度计捕捉到。在确定了彼此清晰分离的特定可操作频率后，我们的下一个目标是尽可能缩短振动时间，即单次振动的持续时间

脉冲（开启时间）以及两个振动脉冲之间的间隔（关断时间）。同时，为了进一步提高带宽和数据速率，我们还发现，通过可靠地确定振动的开启时间和关闭时间，时域数据编码也可以与基于频率的编码结合使用。接下来将介绍选择工作频率和时间调制的具体细节。

3.2.1 确定可用频率。为了确定并表征发射器电机可工作的频带范围，使接收器的加速度计能够对振动信号产生明显不同的响应，我们进行了正弦扫描测试 [26]：测试电机在脉宽调制值为 20（低）至 240（高）的范围内运行，并分析接收器处相应的加速度计信号。

我们观察到，加速度计捕获的频率响应在 PWM 60 附近达到峰值，并从 PWM 100 附近开始衰减（参见图 4）。基于这一观察，我们确定电机在 PWM 60 左右达到谐振频率。简单的开启或关闭二进制编码机制只需要电机有一个工作频率，但这会限制使用振动进行编码的数据量。确定可用频率范围为 PWM 20–100 后，我们进一步仔细分析了具体要使用哪些 PWM 频率。在频率分析中，我们仔细观察了从 20 到 100、每次递增 10 的各个 PWM 的频率响应。随后，我们发现 PWM 20、30、60 和 100 与相邻 PWM 的干扰最小，因此将它们作为 *SkinSense* 实现中最终采用的 PWM 参数。

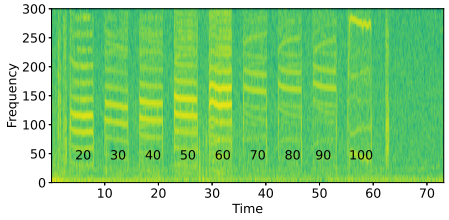


图 4：PWM 20 至 100 的频谱图。

3.2.2 基于时间的调制。接下来，我们研究了缩短振动的开启时间和关闭时间以进一步提高数据速率的可能性。为此，我们分析了在一系列开启时间值和关闭时间值下，利用加速度计信号推断振动开启时间窗口和关闭时间窗口的准确程度。这些开启时间和关闭时间会受到一种称为振铃效应 [26],的现象影响：切断电机电压后，振动可能会在介质中持续一段时间才会完全消退。选择关闭时间时，我们需要特别选取能容纳前一个振动脉冲残余振动的数值，确保下一个振动脉冲不受其影响，从而避免解调时出现误差。我们测试了 150–1000 毫秒范围内的关闭时间，能够清楚地区分 250 毫秒、500 毫秒、750 毫秒和 1000 毫秒的关闭时间值。低于 150 毫秒的数值过短，会导致连续振动脉冲之间产生干扰。因此，

在不影响总体准确率的情况下，我们在算法实现中选择 150 毫秒和 300毫秒作为关闭时间窗口值。确定合适的关闭时间值后，我们再确定开启时间窗口值，即振动马达在单个窗口内保持开启的时长。与关闭时间分析类似，我们测试了 250–1000 毫秒范围内的开启时间，之后又测试了低于 250 毫秒的开启时间值；然而，低于 250 毫秒的数值过短，无法在加速度计信号中准确识别。因此，在不影响总体准确率的情况下，我们将 250 毫秒和 500 毫秒固定为实现中的开启时间窗口值。本分析所用的完整硬件配置详见第 3.4.1 节。由于不同马达类型的共振频率可能不同，且不同加速度计类型的灵敏度也可能不同，因此可能需要单独分析，以确定每种马达-加速度计组合的最佳参数。

3.3 通信算法

SkinSense 采用基于脉宽调制的频率调制技术，将比特编码为振动脉冲；并采用基于频谱图的方法，对感测到的运动数据（对应于振动脉冲）进行解码，以重建传输的比特，具体如下。

3.3.1 编码算法。 传输算法以待传输的比特序列为输入，并输出一系列参数（PWM 值、开启时间和关断时间），供振动马达使用。PWM 值用于衡量施加到电机上的电压，而电压又控制其频率。开启时间表示振动马达开启的毫秒数（毫秒）；关断时间则表示两个连续振动脉冲之间的毫秒数。通过独立调制这三个参数，我们能够将比特串作为一系列持续时间和频率各异的振动进行传输。

SkinSense 目前使用四种 PWM 值（20、30、60、100）、两种开启时间（250 毫秒、500 毫秒）和两种关断时间（150 毫秒、300 毫秒）进行调制，如前文第3.2节所述。因此，我们能够使用 PWM 值编码 $log_2 4 = 2$ 比特，使用开启时间值和关闭时间值分别编码 $log_2 2 = 1$ 比特。为了使用上述设置和参数集传输比特序列，我们需要将其划分为4位字。然后，按如下方式对每个4位字进行编码：该字的前两位使用四种

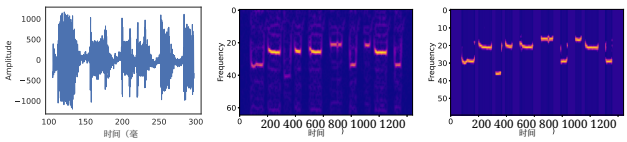
PWM 值，第三位使用两个开启时间值之一，第四位使用两个关闭时间值之一。在消息传输结束时，我们附加一个导频序列，以提高解码准确率。

3.3.2 解码算法。 解码算法以接收器感测到的原始加速度计数值为输入，并输出解码后的比特序列。解码算法包含以下步骤：

(1) 频谱图计算：对原始信号进行滤波和归一化。(2) 峰值检测：提取编码参数。(3) 符号分离：分离符号，以识别编码的 PWM 值、开启时间值和关闭时间值。

(4) 基于导频序列的映射与解码：为每个 PWM 值、开启时间值和关闭时间值生成对应的比特，从而解码消息。

频谱图。 在解码过程中，首先计算原始加速度计时间序列数据样本的频谱图。本质上，频谱图是一个矩阵，用于表示加速度计信号在不同频率（即频谱）下随时间变化的强度；换言之，矩阵中的每个位置都对应一个频率和时间点。也就是说，时间序列数据从时域转换到频域（使用快速傅里叶变换，窗口大小为 128 个样本，重叠为 124 个样本）。为减少噪声的影响，我们从频谱图中滤除所有低于 40 *Hz* 的频率。这些频率低于我们的工作频带，主要对应于人手中可能存在的低频噪声。图 5 展示了去除这些噪声前后的频谱。随后，我们对生成的频谱图进行均值和方差归一化，以消除可能存在的任何恒定偏差。



(a) (b) (c)

图 5：（a）原始加速度计信号；（b）滤波前的加速度计信号频谱图；（c）去除噪声后的频谱图。

峰值检测。 为了确定编码过程中使用的 PWM 值，我们利用振动频率与 PWM 相关这一事实。通过准确确定这些频率，我们可以估算 PWM 值。我们发现，对于大多数 PWM 值，都有两个频率具有显著的能量。这一点可以从图 4 中观察到：每个 PWM 对应的两条颜色最深的黄色带表示这两个频率。它们代表通过手传播的振动中最显著的两个泛音（泛音是指信号[5] 中高于最低频率的任何频率）。由于存在两个显著的泛音，为了得出任意时刻的振动频率，我们的算法会检测频谱图中最显著的两个峰值，并计算这两个泛音频率的平均值，以近似估算传输频率。然而，对于较高的 PWM 值（例如 100），我们发现只有一个泛音包含大部分能量。为了处理这种情况，算法会比较最显著的两个峰值的频率；只有当第二显著峰值的量级与最显著峰值相同时，才会计算两个频率的平均值。否则，算法在频率估计时只采用最显著峰值的频率。

符号分离。 根据前述峰值检测过程，我们得到一个向量（记作 y），其中包含每个

算法1符号分离算法。

输入： $y[]$
输出： $ONTimes[]$, $OFFTimes[]$, $PWMS[]$
初始化： $ONTimes \leftarrow []$, $OFFTimes \leftarrow []$, $PWMS \leftarrow []$, $startTimes \leftarrow []$, $endTimes \leftarrow []$, $i \leftarrow 0$
遍历 i <=length(y) **执行**
  如果 ($y[i] >= 0$ 且 $y[i+1], y[i+2], y[i+3] = 0$) **则**
    $endTimes.append(i)$
  结束如果
  如果 ($y[i] >= 0$ 且 $y[i-1], y[i-2], y[i-3] = 0$) **则**
    $startTimes.append(i)$
  结束 if
结束 for
$ONTimes[] \leftarrow endTimes[] - startTimes[]$
$j \leftarrow 0$
对于 j <=length($ONTimes$)**执行**
  如果 ($ONTimes[j] < 200$) **则**
    $ONTimes.remove(j)$
  结束条件判断
结束循环
$OFFTimes[] \leftarrow startTimes[1:(length(startTimes) - 1)] - endTimes[0:(length(endTimes) - 1)]$
$k \leftarrow 0$
对于 j <=length(开启时间)**执行**
  $PWMs[j] = mean(y[startTimes[j]: endTimes[j]])$
结束循环

时间窗口检测到的频率。在没有振动的时间窗口中，频率设为0。随后，我们采用以下启发式方法，以开启时间、关闭时间和脉冲宽度调制的形式分离出传输符号。首先，使用符号分离算法（算法1）计算每次振动的首个和最后一个时间窗口。然后，利用这些信息计算开启时间、脉冲宽度调制和关闭时间。为消除短时脉冲噪声的影响，我们丢弃开启时间小于 200 毫秒的符号。之所以进行此筛选，是因为根据我们为传输选定的开启时间值，传输符号可能的最短时长为 250 毫秒，这意味着开启时间小于 200 毫秒 的情况属于噪声。

基于导频序列的映射与解码。 如前所述，每条消息后都会附加一个导频序列，以提高检测时的准确率。由于种种原因，例如用户的手的频率响应、精确的佩戴方向、手表的松紧程度，以及电机加速和减速所需的时间，每次使用通信系统时，接收参数都可能存在相当大的差异。因此，我们在解码过程中使用此导频信号来测量传输参数中的偏移量，并据此进行调整。导频信号由以下开启时间、关断时间和 PWM 值序列组成：开启时间值：[250,500,250], 关断时间值：[150,300], PWM 值：[20,30,60]。

这些涵盖了我们系统中用于传输信息的大多数参数。在接收器端，该导频序列首先经过基于频谱图的滤波、基于峰值检测的频率估计，随后进行符号分离，以识别导频序列中使用的参数。这些获得的值
随后将其用作映射，以解码实际消息。我们从导频序列开始，其中导频序列的估计参数集中每个值 p_i^{pilot} 都被映射到原始参数集中的相应值 q_i。利用这些信息，符号分离算法的输出随后按以下方式映射到相应参数：对于传输消息的估计参数集 PWM^{msg} 中的每个估计参数 p_i^{msg}，如果 $p_i^{msg} < mean(p_j^{pilot}, p_{j+1}^{pilot})$，则将 p_i^{msg} 映射到 p_j^{pilot}；否则，p_i^{msg} 映射为 p_{j+1}^{pilot}。例如，对于导频序列的 PWM 值，符号分离算法可能会输出以下数值：24、35、66。现在，由于我们知道导频序列只能包含 PWM 值 20、30 和 60，且其出现顺序已知，因此将这些估算值分别映射到对应的 PWM 值。然后，对于实际消息，如果某个估算的 PWM 值为 27，则按照上述方法将其映射到导频序列的估算值 24；该值对应于原始编码参数值中的 PWM 20。对其他参数集 ON^{msg} 和 OFF^{msg} 也采用相同的步骤。最后，根据映射后的符号分离输出所获得的每组 PWM、开启和关闭值组合，重建 4位字，从而解码消息；也就是说，一个字的前 2 个比特根据 PWM 值确定，而第三和第四个比特则分别根据开启时间值和关闭时间值确定。

PIN传输示例。 图6通过一个实际示例展示了前述 *SkinSense* 算法：首先将一个4位PIN编码为振动模式（由开启、关闭和脉宽调制参数组成），然后进行传输。接着，根据振动脉冲，利用接收到的加速度计信号生成频谱图，以检测相关的开启、关闭和脉宽调制参数，并据此成功解码并输出原始 PIN。

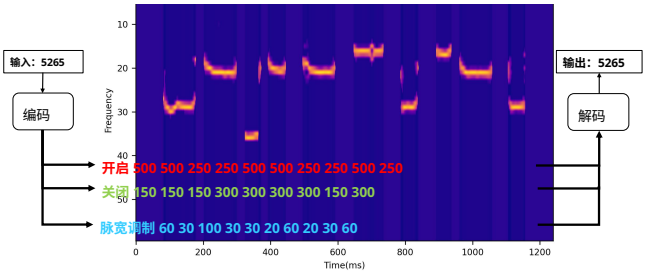


图6：PIN的编码与解码。

3.4 实现硬件

为了全面评估*SkinSense*，我们实现了两种不同的硬件配置。为了详尽研究各种细粒度的发射器和接收器参数对性能的影响，我们首先在定制硬件设置中实现并评估*SkinSense*（第3.4.1节）。随后，为了在真实环境中评估*SkinSense*，我们实现了一套消费级硬件设置（第3.4.2节），其中包含市售移动设备和腕戴式设备。

3.4.1 定制硬件设置。我们通过构建定制设备来实现这一配置，这些设备与商用设备上的发射器和接收器十分相似，

例如商用手持设备（如智能手机）和腕戴设备（如智能手表）。在此配置中，我们分别使用 Arduino Uno 和 Nano 开发板控制发射器和接收器。作为发射端的振动马达，我们使用一台 ERM电机（16000 转/分钟），通过 L298 电机驱动器连接到 Arduino Uno 开发板 [8]，，并由一块 12V（容量为 5安时 ）铅酸电池供电。我们使用 12V 电池为电机供电，以延长实验运行时间。不过，由于电机的工作电压范围为 1.5V 至 3V，因此也可以轻松使用两节（1.5V）AAA 电池为其供电。我们通过 5VUSB 输入为 Arduino Nano 开发板（接收设备）供电。为了制作定制手持设备原型，我们使用一个消费级智能手机壳（图 7b），并将振动马达安装在其上。为了制作定制腕戴设备原型，我们使用 Sony Smartwatch 3 腕带（拆下智能手表部分，见图 7b）来安装运动传感器。对于这两种定制设备，我们都使用 MPU6050 GY-521 MEMS 运动传感器，其中包含一个三轴加速度计和一个三轴陀螺仪。运动传感器还通过 Arduino Micro-SD 卡适配器（采用 SPI 模式）连接到 Micro-SD 卡，以便记录数据。如前所述（第 2 节），我们使用 PWM 技术控制振动马达的运行。将数据写入 Micro-SD 卡时，运动传感器的采样率为 700 Hz。为了评估反向通信（即从腕戴设备到手持设备），我们将两种定制设备上的电机和运动传感器互换。

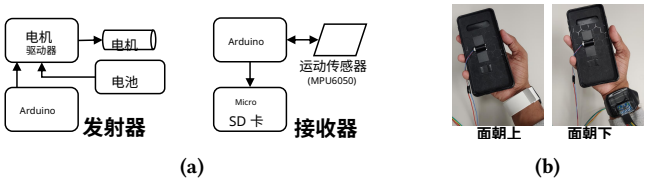


图 7：（a）定制硬件架构；（b）腕戴设备的佩戴方向。

3.4.2 消费级硬件设置。在此设置中，我们使用 Nokia 6（2017）智能手机作为手持设备，并使用 Sony Smartwatch 3 作为腕戴设备。Sony Smartwatch 的最高采样率仅为 200 Hz，而使用定制硬件设置时，我们能够达到 700 Hz 的采样率。此外，在这些设备上，Android API 只能控制电机的振动振幅，无法控制频率。与 Roy 等人 [26], 类似，我们研究了通过调制振幅来编码数据的可能性。然而，如前所述，由于消费级智能手表加速度计的采样率有限，我们无法仅凭加速度计数据准确区分不同的振幅。因此，由于我们依靠多个频率来编码数据，这实际上限制了在这些设备上完整实现 *SkinSense* 通信协议。

3.5 人体受试者数据收集

我们使用从真实环境中的人体受试者收集的数据，对*SkinSense*进行了全面的实证评估。

环境中人体受试者收集的数据，对<style i d='1'>SkinSense</style>进行了全面的实证评估。在数据收集研究中，我们从大学校园招募了13名年龄在18至29岁之间的参与者。研究参与者将定制腕戴设备佩戴在一只手腕上（由参与者自行选择），并将定制手持设备（图7b）握在同一只手的掌心。在这一设置下，我们采用所提出的基于振动的方法，在各种不同的环境／设备设置和算法参数下，实现了手持设备与腕戴设备之间二进制数据的双向传输。

在第一种实验设置中，我们评估腕戴式设备的两种不同佩戴方向对通信方案性能的影响。第一种佩戴方向是腕戴设备朝上，沿前臂（或手腕）顶部佩戴；第二种佩戴方向是腕戴设备朝下，沿手腕底部佩戴（见图 7b）。由于不同用户可能偏好以不同方向佩戴腕戴设备，而且腕戴式设备的佩戴方向会影响手腕／前臂上振动马达和加速度计的位置，进而影响*SkinSense*的性能，因此有必要进一步分析这些设置。在第二种实验设置中，我们测试发射器（振动马达）与接收器（加速度计）设备之间的距离对*SkinSense*性能的影响。为此，我们将马达安装在定制手持设备上的三个不同位置：顶部（15cm）、中部（7.5 cm）和底部（2 cm）。在第三种数据收集场景中，我们要求参与者手持定制手持设备、佩戴腕戴设备并步行，同时让两台设备相互通信。此设置旨在研究步行等身体活动引入的噪声（在加速度计传感器读数中）如何影响*SkinSense*的性能。在第四种实验设置中，我们测试反向通信：腕戴设备（装有马达）作为发射器，手持设备（装有加速度计）作为接收器。此设置用于评估*SkinSense*的半双工特性。最后，在第五和第六种实验设置中，我们分别在反向通信方向下重复不同佩戴方向和参与者步行这两种设置。除上述实验外，我们还进行了一项实验，使用消费级设备测试*SkinSense*：一组参与者将 Sony Smartwatch 3 戴在手腕上，同时将 Nokia 6（2017）智能手机握在同一只手的掌心。与上述实验类似，数据以二进制形式从手持设备传输至腕戴设备。在每项实验中，我们使用四个随机生成的 128 位二进制字符串进行通信（传输）测试。所有数据均在获得参与者同意后收集；我们的数据收集和分析流程也已获得本校机构审查委员会（IRB）的批准。

4 评估

在本节中，我们对*SkinSense* 在多种运行设置、算法参数和硬件配置下进行了全面的实证评估。我们使用以下标准指标评估 *SkinSense* 的准确率和效率：(i) 比特错误率（*BER*）：*BER* 是错误解读的比特数所占的比例；(ii) 比特率（*BR*）：*BR* 是传输速度，即每单位时间传输的比特数

单位时间（秒）内传输的比特数。

4.1 发射器（电机）与接收器（运动传感器）之间距离的影响

为了观察发射器（振动马达）与接收器（加速度计传感器）之间的距离对系统性能的影响，我们将电机安装在手机壳的三个不同位置。具体而言，电机分别安装在手持设备手机壳的顶部、中部和底部，与腕戴设备的距离分别约为 15 *cm*、7.5 *cm*和 2 *cm* 。我们观察到，电机位于中部时，性能略有下降（见图 8a）；而位于顶部和底部时，所得平均*BERs* 相近。我们还发现，电机位于中部时，一半参与者的(BER) 值低于 0.15（见图 8b ），其中五人的 *BERs* 低于 0.05。电机位于顶部（距接收器最远）时，平均*BER* 最佳，为 0.10（$\sigma = 0.13$），且一半参与者的*BERs* 低于 0.05。位于底部时，性能相近，平均*BER* 为 0.12（$\sigma = 0.10$），且 50% 的参与者*BER* 低于 0.10。我们观察到，尽管手持设备上的电机位于顶部、距接收器（加速度计）最远，但振动会使整个手持设备略微更加晃动，从而使更强的振动信号传至接收器处的加速度计。电机安装在手持设备底部时也会出现类似现象。电机安装在设备中部时，振动会略微减弱；此外，手掌中部呈弯曲状，因此振动时可能与手接触的直接表面积较小，这也反映在略高的*BER* 值上。图 8f 展示了不同发射器与接收器距离下*BER* 的累积概率分布。从图中可以看出，在顶部和底部位置，近 70% 的情况下可达到的*BER* 低于 0.15。

4.2 腕戴设备佩戴方向的影响

接下来，我们评估腕戴设备的佩戴方向对系统性能的影响，其中通信方向为从手持设备到腕戴设备（图 7b）。这里可以看到（图 8e），与加速度计位于手腕顶部、朝上佩戴相比，加速度计位于手腕底部、朝下佩戴时的误码率略低，误码率分别为 0.12（$\sigma = 0.13$）和 0.16（$\sigma = 0.13$）。图 8c 显示，朝下佩戴时，一半参与者的误码率低于 0.10。我们认为，这是因为振动马达与运动传感器位于手的同一侧时，振动的传播路径更直接。此外，从图 8g 可以看到，朝下佩戴时，近 70% 的情况下误码率会低于 0.2；而朝上佩戴时，这一概率为 60%。

4.3 噪声下的性能

接下来，我们评估*SkinSense* 在两种不同类型的运动噪声下的表现，这些噪声会影响运动传感器的读数。第一种噪声出现在用户乘坐行驶中的车辆时相对静止的情况下（车辆速度介于

$$16\ kmh \quad 64\ kmh$$

至 之间）。受实际条件限制，我们通过将手持设备在行驶中的车辆内录制的运动传感器数据，与实验室环境中从参与者收集的运动数据叠加，来模拟这一实验。我们测试的第二种噪声由用户移动造成：参与者被要求将手持设备和腕戴设备戴在同一只手上行走，同时运行*SkinSense*。第一种噪声场景（行驶中的车辆）表现略好，平均误码率 为 0.19（$\sigma = 0.17$）。此外，13 名参与者中有 7 名的误码率 低于 0.10（图 8c），只有 3 名参与者的误码率 显著恶化至 0.3 以上。这表明*SkinSense* 能够较好地抵抗由平面运动（例如乘车）引起的运动噪声。在第二种噪声场景（步行）中，误码率 显著恶化，观测到的平均误码率 为 0.29（$\sigma = 0.28$）。在上述两种场景中，通信方向均为从手持设备到腕戴设备。此外，借助 Android 和 iOS/watchOS 等现代移动操作系统中关于用户移动的内置 API [13] ，还可以根据情境在用户不静止时关闭*Skin- Sense* 。

4.4 采样率的影响

为了评估降低运动传感器采样率对协议性能的影响，我们在接收器处将加速度计的采样率设为 200 *Hz*，对 *SkinSense* 进行测试，并与之前使用的 700 *Hz* 采样率进行比较。我们选择 200*Hz* 的采样率，因为这是大多数现代消费级移动设备和可穿戴设备所能达到的最高采样率。根据在此设置下获得的结果，我们发现，使用较低采样率时，通信方案的误码率 会劣化至约 0.4 ($\sigma = 0.06$)。这表明，接收器处如此低的加速度计采样率，可能不足以捕获我们用于在传输算法中编码数据的振动频率范围。由于无法使用多个频率，要获得更好的误码率 ，只能以降低比特率为代价。

4.5 半双工通信

在迄今讨论的实验设置中，我们只考虑了从手持设备到腕戴设备方向的通信。然而，现代腕戴设备和手持设备都配备了振动马达和运动传感器，因此评估与此前相反方向的通信（在我们的案例中，即从腕戴设备到手持设备）将极具实用价值。如果可行，这将使通信信道具备半双工特性，从而支持一系列需要双向通信的应用。由于我们提出的通信协议和硬件配置适用于此类评估，我们也测试了反向通信，即将腕戴设备用作发射器、手持设备用作接收器。总体而言，与先前的情况相比，所达到的性能显著较低，如图 8e 和图 8c 所示；当腕戴设备朝向

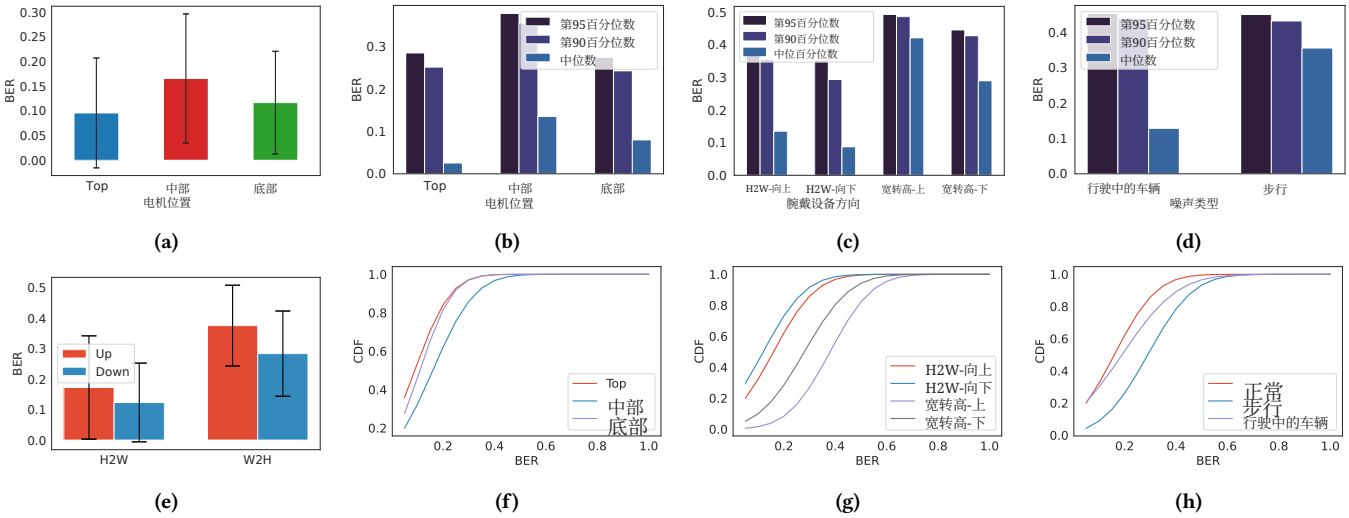


图8：平均误码率：(a) 电机与运动传感器之间的距离，(e) 腕戴设备方向。参与者在第 95th、 90^{th}百分位数及中位数处的误码率：(b) 电机与运动传感器之间的距离，(c) 腕戴设备方向，(d) 不同类型噪声的影响。误码率的累积分布函数：(f) 电机与运动传感器之间的距离，(g) 腕戴设备方向，(h) 不同类型噪声的影响。

上方时，总体误码率降至 0.38（）；当腕戴设备朝下时，则降至 0.28（$\sigma = 0.14$）。与腕戴设备方向实验（第4.2节）类似，我们观察到，腕戴设备朝下时可以达到较低的误码率。我们还针对这种设置进行了相同的噪声相关实验（与第4.3节类似），并观察到性能结果呈现相似的规律：用户移动（步行）实验使误码率降至 0.43（$\sigma = 0.02$），而车辆移动实验则使其降至 0.42（$\sigma = 0.13$）。性能较低可归因于与手腕/手部接触的腕戴设备表面积远小于手持设备。这可能会降低皮肤/手部对所产生振动的感知能力，从而导致总体性能下降。

4.6 消费级硬件配置

接下来，我们讨论 *SkinSense* 在使用商用消费级硬件时的性能（总结见第 3.4.2 节）。由于商用移动和可穿戴设备对振动马达和运动传感器的访问受到严格限制，*SkinSense*在这些设备上运行时，在两种手表佩戴方向下的总体误码率都只能达到约 0.4。我们认为，主要限制之一是商用智能手机/智能手表中运动传感器的采样率受到软件限制，最高采样率仅为 200 *Hz*。此外，Android API 还限制了这些设备中振动马达的频率调制，因此我们无法让内置马达以其全部工作能力运行。这些因素使我们无法像在定制硬件情况下那样，使用马达的 4 个 PWM 频段进行通信。因此，在商用设备上，我们无法在 PWM 频段进行调制，这使得可实现的比特率从 6.6 降至 3.3 比特每秒。尽管每

性能下降主要可归因于现有商用移动设备硬件的软件和硬件限制，但我们认为，未来设备中灵敏度更高、采样率更高的运动传感器以及振动马达，将使这类基于振动的通信系统取得稍为理想的效果。

4.7 加速度计与陀螺仪

我们针对定制设备和消费级设备开展的初步实验表明，在我们的配置中，加速度计比陀螺仪产生更好的反馈。为了全面比较使用陀螺仪而非加速度计作为接收器对性能的影响，我们使用定制硬件设置开展了更多实验。根据观察到的结果（见表 1），我们可以得出结论：使用加速度计时，我们的协议性能更好（误码率更低）。使用陀螺仪作为接收器时（从手持设备发送数据），可达到的误码率从 0.16 降至 0.39。与加速度计不同，陀螺仪测量设备的角速度；表面振动在人体皮肤／身体中传播时已经减弱，因此可能无法产生足够显著的角运动，难以被陀螺仪检测到。

表 1：加速度计和陀螺仪的平均误码率。

方向	加速度计	陀螺仪
从手持设备到腕戴设备	0.16 ($\sigma = 0.13$)	0.39 ($\sigma = 0.09$)
腕戴设备到手持设备	0.38 ($\sigma = 0.13$)	0.41 ($\sigma = 0.10$)

4.8 传输失败检测

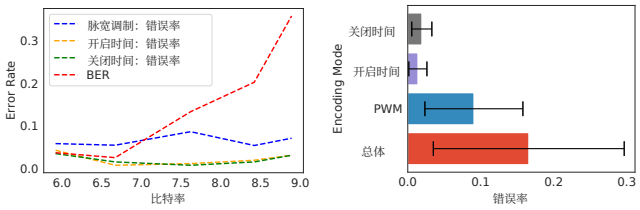
进一步仔细检查误码率较高的已传输消息后，我们发现这些错误主要是由比特缺失造成的，而这可能是数据传输期间手部有意或无意动作所致。为解决这一问题，我们提出在接收器端基于消息长度进行验证。为此，我们假设接收器知道传入消息的长度，或者消息长度是固定的。根据比特长度不匹配，可以轻松识别（并标记）错误接收的消息。检测到此类不匹配时，接收器可以请求重传。我们发现，采用这种启发式方法可显著改善定制硬件设置中的误码率；在能够正确识别需要重传的错误接收消息后，误码率降至 0.04 以下。

4.9 深入分析

4.9.1 比特率与错误率。如前所述，为了提高传输速度，我们可以缩短编码算法的开启时间，但这会直接影响准确率，如图 9a所示。当比特率较高（约从 7 比特每秒开始）时，误码率会稳步上升。不过，我们认为，若采用更先进、灵敏度更高且可在更高采样率下运行的运动传感器，*SkinSense* 便能在保持低错误率的同时实现更高的传输速度。

图10a展示了基于PWM的符号的混淆矩阵。我们观察到，大多数错误都发生在相邻的脉冲宽度调制之间（例如 20 和 30，或 60 和 100）。如前文第3.2节所述，在观察到通过加速度计信号解码时这些脉冲宽度调制彼此之间的混淆最小后，我们选择了 20、30、60 和 100 作为脉冲宽度调制。然而，在现实设置下进行测试时，用户之间的手部骨骼结构可能存在差异，而且用户将手持设备握在掌心的方式也各不相同；我们发现，加速度计可能会以不同方式检测到其中一些基于PWM的频率振动。从本质上说，如果我们能够使用更多脉冲宽度调制（即振动频率）作为载波来编码数据，就能实现更高的比特率。但由于加速度计传感器无法明确区分某些相邻频率，我们无法实现更高的比特率。换言之，更高的比特率将以更高的错误率为代价
(误码率)。Roy 等人 [26], 也在其研究中进一步证实并指出，谐振频带内产生的高能量振动可能会干扰邻近频率，从而限制此类基于振动的通信方案中可用频带的数量。

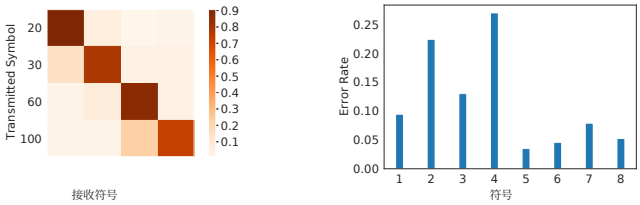
4.9.2 单个编码参数分析。我们还分析了算法中用于编码数据的各个参数模式，即脉冲宽度调制、开启时间和关断时间。我们分别分析这些模式的错误率，以了解哪些模式在比特率或误码率方面表现最佳。图 9b 显示了各模式的单独错误率。我们发现，基于时间的模式（开启和关闭）表现最佳，总体错误率低于 0.02；而基于频率的模式（脉冲宽度调制）错误率相对较高（0.10）。尽管基于时间的模式比脉冲宽度调制更可靠，但由于它们会直接影响比特率/传输速度，因此使用基于时间的模式进行调制的幅度会受到限制



(a) (b)

图 9：各项编码参数（a）错误率与比特率（比特/秒）的关系；（b）错误率比较。

。图 10b 展示了各个符号的错误率，其中 1–4 为脉冲宽度调制，5 和 6 为开启时间，7 和 8 为关断时间。这进一步表明，基于时间的符号（5–8）比基于脉冲宽度调制的符号表现更佳。图 10a 中的观察结果在此得到进一步说明：脉冲宽度为 30 和 100 的符号错误率最高，因为它们分别被误识别为 20 和 60。



(a) (b)

图 10：（a）发送符号与接收符号的混淆矩阵。（b）符号错误率。

4.10 声学侧信道

Roy 等人 [26] 发现，振动过程中产生的噪声可能导致信息泄露，并提出了一种干扰机制：由发射器发出噪声，以抑制振动产生的声音。他们还研究了发射器放置在不同表面上时的振动声（*SoV*），并观察到玻璃表面造成的侧信道泄露最严重，也就是说，会产生最响的噪声。为了解我们提出的系统中此类漏洞的严重程度，我们同样测量了以手作为通信介质时的 SoV。表 2 列出了在多个地点测得的 SoV 与环境噪声之比，这些地点包括学校实验室、公寓、行驶中的车辆内和超市；测量采用的是定制及消费级设备配置（在距离发射器 2 英尺处记录）。比值越低（越接近零），SoV 相对于环境噪声就越轻，从而降低声学泄漏的风险。我们发现，在公寓或学校实验室等较安静的地点，SoV 与环境噪声之比很高；而在车辆或超市等较嘈杂的地点，该比值则低于 1。这与 Roy 等人 [26] 的结果形成对比：他们在所有这些地点测得的比值约为 1.5。与

表 2：振动声与环境噪声之比。

设置	Lab	公寓	车辆	超市
定制硬件设置	2.11	2.20	0.92	0.80
消费级智能手机	1.46	1.52	0.63	0.58

相比消费级智能手机配置，我们的定制配置（如表 2 所示）产生的声比高得多，这可能是因为定制手持设备上的振动马达没有封装。由于消费级移动设备中的振动马达采用封装设计，使用这类设备时，*SkinSense* 的声学泄漏显著降低。我们认为，可以在发射设备附近使用扬声器，采用类似 Roy 等人 [26] 提出的声学干扰机制，从而减轻这一威胁。

4.11 比特率的实际意义

为了了解*SkinSense*所提供比特率的实际用途，我们进一步分析了实际设备间传输秘密信息（例如 4 位个人识别码和 8 个字符的密码）所需的时间。在此分析中，我们考虑从手持设备向腕戴式设备传输数据，距离为 7.5 *cm*。我们观察到，传输 4 位个人识别码需要稍多于 5 秒，而传输 8 个字符的密码大约需要 10 秒。尽管与蓝牙和近场通信等短距离无线技术相比，这些传输速度要慢得多，但需要注意的是，*SkinSense* 的设想用途仅是作为一种潜在的安全侧信道，用来补充传统的无线通信信道。具体而言，如上所示，*SkinSense* 能够支持这样的使用场景：在缺乏可靠无线信道时，通过以合理的侧信道速度共享短秘密，实现安全地证明设备共址或进行安全认证。

4.12 能量需求

为评估*SkinSense*的能量需求，我们开展了一项实验，以测量电池能量随时间的消耗量。对于发射器，我们在两部智能手机上进行测试，在1小时内发送30条消息。对于接收器，我们在两块智能手表上进行测试，在1小时内运行运动传感器数据采集，接收30条消息。如表3所示，较新的设备 Moto G7 Plus（2019，搭载 Android 10）的能耗仅约为 150 *mAh*，而较旧的智能手机 Nokia 6（2016，搭载 Android 9）的能耗为 300 *mAh*。接收端的智能手表也呈现出类似的能耗模式：较新的 Ticwatch 仅消耗 12 *mAh*，而较旧的 Sony W3 消耗 14 *mAh*。

表3：能耗。

设备	电池容量	消耗的能量
Sony W3	420 *mAh*	14 *mAh*
Mobovi Ticwatch E	300 *mAh*	12 *mAh*
Nokia 6	3000 *mAh*	300 *mAh*
Moto G7 Plus	3000 *mAh*	150 *mAh*

4.13 与以往工作的比较

Sen 和 Kotz [29]提出了一种使用智能戒指的基于振动的通信方案，其中智能戒指充当振动发射器，与内置加速度计的物联网设备进行通信。他们实现了 0.05 的误码率，带宽为 12.5 *bps*。与上述许多研究类似，为了实现可靠通信，他们的智能戒指发射器必须与接收器直接接触。在将人体/皮肤用作通信介质方面，与我们最接近的研究是 Ma 等人 [20]的工作。他们提出了一种使用两个振动马达和两个压电换能器的多输入多输出（MIMO）通信方案。鉴于振动马达启动时间等局限性，以及人体皮肤作为信道的不稳定性，他们在发射器一侧配备了两个运动传感器（加速度计+陀螺仪），通过深度学习获取并利用额外的信道状态信息（CSI）。他们的 MIMO 方案实现了约 5 *bps*/*Hz* 的 MIMO 容量，是使用可比的单输入单输出配置所能达到容量的两倍多。然而，他们的方案存在若干缺点。首先，该方案不太实用，因为它依赖于高度定制的硬件和配置，而这类硬件和配置在商用移动设备和物联网设备中往往并不存在。此外，他们的方案采用了深度学习算法，通常需要大量训练数据才能达到可接受的性能；而对于所有通信设置、条件和个体用户而言，获取这些数据并非易事。最后，他们的方案仅使用两名人体受试者的数据进行性能评估，因此其结果是否具有普遍适用性尚不明确。Kim 等人 [16] 还提出了另一项类似的工作（SecureVibe），将皮肤用作介质，通过智能手机振动马达与一款配备加速度计的定制植入式医疗设备进行通信。尽管他们的工作实现了约20 *bps*的比特率，但其配置要求智能手机直接放置在皮下植入设备的正上方，运动传感器与智能手机之间的距离仅为 1 *cm*。我们证明，*SkinSense* 框架在手持智能手机（振动马达）与腕戴设备（运动传感器）之间相距15 *cm* 时仍能有效工作。此外，他们的工作仅通过模拟人体模型进行评估，并未在真实人体受试者身上测试。相比之下，*SkinSense* 面向两个外部手持/佩戴设备，并且已在人体受试者中测试其通信协议。Shah 等人专门研究了振动在人类手臂皮肤上的传播，并报告称，即使距离仅为 4 *cm* [30]，振动强度也会下降约 70%–80%；当距离超过 8 *cm*时，降幅则会超过 90%。相比之下，在木板这类刚性介质中，*Ripple* [26], 的作者观察到，振动强度会逐渐增大，直至 15 *cm*，之后才开始衰减。这使他们能够使用 10 种不同的振动振幅传输数据，并在解调过程中仍能准确区分这些振幅，从而实现相对较高的 200 *bps* 数据速率。需要注意的是，在人体皮肤这类刚度较低的介质中，振动信号在较长距离上的传播衰减要快得多。这使得*SkinSense*的设计面临相当不小的挑战，也正因如此，

表4：与相关工作的比较。

相关工作	设置	传感器	所用技术	数据速率	性能
VibeRing [29]	手指戒指到设备	加速度计	基于机器学习	12.5 *bps*	0.05（误码率）
Ripple [26]	固体表面上的 2 台设备	加速度计	基于频域	200 *bps*	0.017（误码率）
Vib-Connect [35]	2 台直接接触的设备（手机和笔记本电脑）	加速度计	基于时域阈值判定	未提及	100%（准确率）
SYNCVIBE[18]	直接接触的 2 台设备	加速度计	基于时域	20 *bps*	0.005（误码率）
SecureVibe[16]	植入式医疗设备顶部的设备	加速度计	基于时域	20 *bps*	未提及
Skin Sense（本文工作）	通过皮肤在手持设备与腕戴式设备之间	加速度计	基于频域和时域	6.6 *bps*	0.10（误码率）

在这种情况下，采用*Ripple* [26] 等协议所用技术的改造方案并不可行。

5 讨论

用户的感知与偏好。人体皮肤／身体传递的振动可被终端用户感知，因此我们对 13 位参与者进行了简短调查，以了解他们对 *SkinSense* 协议的感受。根据收到的调查回复，38% 的参与者表示 *SkinSense*运行时不会令他们感到困扰，54% 表示略感困扰，只有 8% 表示非常困扰。用户可以轻松地将手持设备切换（或转移）到腕戴设备所在的手上，从而利用 *SkinSense*；此外，我们也研究了用户对使用 *SkinSense* 的偏好。当被问及通常用哪只手握持手持设备／智能手机时，约 62% 的人回答说，他们使用佩戴腕戴设备的同一只手，另有 23% 的人表示双手都会使用。其余 15% 的人表示，他们会将腕戴设备佩戴在不握持智能手机的那只手上。这项简短调查的结果表明，像 *SkinSense* 这样的基于振动的通信协议在实践中具有可用性（从终端用户的角度来看），尽管仍需开展更大规模的可用性和用户满意度调查。

其他侧信道。 除了声学侧信道威胁之外，攻击者还可能将窃听用的运动传感器物理连接到通信表面 [26]。我们认为，在所提出的通信设置/协议中，这类威胁不太可能发生，因为我们使用人体/皮肤作为通信信道。攻击者不太可能在受害用户不知情的情况下，直接将窃听设备连接到其身体/皮肤上。对传输的消息进行加密，也可以进一步降低接触式攻击的可能性。此外，从安全角度来看，由于 *SkinSense* 的主要目标是提供一个能够抵御外部窃听设备的安全信道，因此我们假设发射器和接收器设备都完全可信，且只运行可信（或非恶意）应用。

6 相关工作

采用振动马达和运动传感器（尤其是加速度计）的基于振动的通信技术，已针对多种底层通信介质（或信道）进行过研究，例如坚硬表面、设备之间的直接接触，以及通过人体皮肤进行通信。Yonezawa 等人 [34, 35]提出了一种将信息从智能手机发送到笔记本电脑的机制，实现了高达 10 *bps* 的数据速率。该方案将信息编码在智能手机发出的振动信号中；智能手机需要与笔记本电脑保持物理接触，而笔记本电脑则通过内置或板载加速度计检测振动（及其中编码的信息——内容）。Lee 等人 [18]提出了类似的通信框架（SYNCVIBE）：两台设备需要物理接触，其中智能手机作为振动发射器，外接的加速度计设备作为接收器并连接在智能手机上；该方案实现了约 20 *bps* 的数据速率，误码率为 0.005。Hwang 等人 [15] 提出了类似的通信机制，但使用的是放置在固体表面上的两部智能手机，这些表面包括木桌、金属架或塑料架、一叠纸以及软垫椅。当两台设备彼此相距大约*25 cm* 时，该方案在所有表面上的准确率均超过 90%。然而，两台设备距离过近（10 *cm*）或过远时，准确率会显著下降。

Roy 等人 [26] 提出了一个类似的通信框架，名为 *Ripple*。该框架使用定制的现成振动马达和加速度计芯片时，数据速率最高可达 200 *bps*；使用消费级智能手机时，最高可达 80 *bps*。然而，与 Hwang 等人 [15], 一样，他们的方案采用固体表面（如木质桌子和玻璃桌子）作为通信介质（或信道）。在后续研究中，Roy 等人 [25] 提出了另一种基于振动的通信技术，但这次使用麦克风而非加速度计作为接收器。对其后续方案的评估表明，配备振动马达的智能戒指可实现约 7 *kbps* 的带宽或数据速率，而智能手表的带宽则降至 2 *kbps*。然而，该方案的一项重要要求是，发射设备必须近距离 接近基于麦克风的接收器，才能达到这些带宽。

除了这些基于可穿戴设备的相关工作外，其他一些研究还探索了无人机等信息物理系统，提出利用其电机的声学特性进行通信和指纹识别 [2, 23]。

7 结论

本文探索了一种新型通信方式：以人体皮肤/手作为通信介质，通过振动马达作为发射器、基于加速度计的接收器，在手持设备与腕戴设备之间进行通信。由于不同人的手部解剖结构和生物力学特征可能存在差异，我们在 13 名受试者参与的多种真实场景下测试了所提出的方案。该方案实现了 6.66 比特每秒的可持续带宽，同时将误码率控制在 0.10 以下。尽管目前消费级智能手机和腕戴设备存在一些限制，导致该方案无法发挥最佳性能，但我们相信，这项工作为振动及人体区域通信信道相关领域的进一步研究开辟了道路。

参考文献

[1] Kamran Ali 和 Alex X Liu。2021。使用智能手机进行基于振动的细粒度感知。IEEE Transactions on Mobile Computing（2021）。[2] Adeola Bannis、Hae Young Noh 和 Pei Zhang。2020。Bleep：面向受限无人机的电机启用音频侧信道。载于 ACM MobiCom'20 会议论文集。[3] Michael Barr。2001 年 14 卷 10 期，2001 年，103–104 页。脉冲宽度调制。Embedded Systems Programming（），–。[4] Ralph E Blake。1961。基础振动理论。《冲击与振动手册》1（1961），2–8。[5] Gerrit Bloothooft、Eldrid Bringmann、Marieke Van Cappellen、Jolanda B Van Luipen 和 Koen P Thomassen。1992。泛音歌唱的声学与感知。美国声学学会期刊 92 卷 4 期（1992），1827–1836。[6] Ludovic Chevalier、Stephanie Sahuguede 和 Anne Julien-Vergonjanne。2015。作为医疗体域网射频替代方案的光无线链路。IEEE通信领域精选期刊（2015）。[7] Ludovic Chevalier、Stéphanie Sahuguede 和 Anne Julien-Vergonjanne。2015。用于健康监测的无线光技术体域网。载于 IEEE ICC'15 会议论文集。[8] Components101。2020。L298N电机驱动模块。https://components101.com/modules/l293n-motor-driver-module［在线；访问日期：15-Nov-2021］。[9] Antonino D'Alessandro、Salvatore Scudero 和 Giovanni Vitale。2019。用于地震学的电容式微机电系统综述。传感器 19 卷 14 期（2019），3093。[10] Laura Galluccio、Tommaso Melodia、Sergio Palazzo 和 Giuseppe Enrico Santa-gati。2012。体内体域网使用超声通信所面临的挑战及其影响。载于 IEEE WONS'12 会议论文集。[11] Robert Gao 和 Li Zhang。2004。用于制造的微机械微传感器。IEEE仪器与测量杂志 7 卷 2 期（2004），20–26。[12] Shuo Gao、Shuo Yan、Hang Zhao 和 Arokia Nathan。2021。基于触摸的人机交互：原理与应用。91–108。[13] Google。2020。步数检测传感器。https://developer.android.com/reference/ android/hardware/Sensor#TYPE_STEP_DETECTOR［在线；访问日期：15-Nov-2021］。[14] Huaiqi Huang、Tao Li、Christian Antfolk、Christian Enz、Jörn Justiz 和 Volker M Koch。2016。两种振动触觉设备的实验与研究。载于 IEEE BioRob'16 会议论文集。[15] Inhwan Hwang、Jungchan Cho 和 Songhwai Oh。2012。利用振动实现智能手机的隐私感知通信。载于 IEEE RTCSA'12 会议论文集。[16] Younghyun Kim、Woo Suk Lee、Vijay Raghunathan、Niraj K Jha 和 Anand Raghunathan。2015。面向医疗设备的基于振动的安全侧信道。载于 ACM/EDAC/IEEE DAC'15 会议论文集。[17] Gierad Laput、Robert Xiao 和 Chris Harrison。2016。Viband：利用商用智能手表加速度计进行高保真生物声学感知。载于 ACM UIST'16 会议论文集。[18] Kyuin Lee、Vijay Raghunathan、Anand Raghunathan 和 Younghyun Kim。2018。SYNCVIBE：通过商用智能手机上的物理振动实现快速、安全的设备配对。载于 IEEE ICCD'18 会议论文集。[19] Pengfei Luo、Tong Jiang、Paul Anthony Haigh、Zabih Ghassemlooy 和 Stanislav Zvanovec。2018。用于光学相机通信的欠采样脉冲宽度调制。载于 IEEE ICC Workshops 会议论文集。[20] Dong Ma、Yuezhong Wu、Ming Ding、Mahbub Hassan 和 Wen Hu。2020。Skin-MIMO：通过人体皮肤实现基于振动的 MIMO 通信。载于 IEEE INFOCOM'20 会议论文集。[21] Louise R Manfredi、Andrew T Baker、Damian O Elias、John F Dammann III、Mark C Zielinski、Vicky S Polashock 和 Sliman J Bensmaia。2012。表面波传播对灵长类动物无毛皮肤中振动神经反应的影响。PLOS ONE 7 卷 2 期（2012）。[22] Yan Michalevsky、Dan Boneh 和 Gabi Nakibly。2014。Gyrophone：从陀螺仪信号识别语音。载于 USENIX SECURITY'14 会议论文集。[23] Soundarya Ramesh 、 Thomas Pathier 和 Jun Han。2019。Sounduav：探索通过声学噪声指纹识别进行配送无人机认证。载于第五届微型飞行器网络、系统与应用研讨会论文集。[24] Jörn Rittweger。2020。《振动锻炼与振动疗法手册》。Springer。[25] Nirupam Roy 和 Romit Roy Choudhury。2016。Ripple II：通过物理振动实现更快的通信。载于 USENIX NSDI'16 会议论文集。[26] Nirupam Roy、Mahanth Gowda 和 Romit Roy Choudhury。2015。Ripple：通过物理振动进行通信。载于 USENIX NSDI'15 会议论文集。[27] Michael Rushanan、Aviel D Rubin、Denis Foo Kune 和 Colleen M Swanson。2014。Sok：植入式医疗设备与体域网中的安全和隐私。载于 IEEE S&P'14 会议论文集。[28] Caitlyn Seim、James Hallam、Shashank Raghu、Tri-An Le、Greg Bishop 和 Thad Starner。2015。手戴式触觉技术的感知：放置位置、同时刺激与振动马达比较。技术报告。佐治亚理工学院。[29] Sougata Sen 和 David Kotz。2020。VibeRing：利用智能戒指的振动作为带外信道来共享密钥。载于 IEEE IoT'20 会议论文集。[30] Valay A Shah、Maura Casadio、Robert A Scheidt 和 Leigh A Mrotek。2019。手臂皮肤上的振动传播。应用科学 9, 20（2019），4329。[31] Muhammad Shoaib、Stephan Bosch、Ozlem Durmaz Incel、Hans Scholten 和 Paul JM Havinga。2016。使用智能手机和腕戴式运动传感器进行复杂人体活动识别。传感器 16, 4（2016），426。[32] Marcus Varanis、Anderson Silva、Arthur Mereles 和 Robson Pederiva。2018。用于机械振动分析的微机电系统加速度计：全面综述及应用。巴西机械科学与工程学会期刊 40, 11（2018），1–18。[33] Anita Venkatanarayanan 和 Elaine Spain。2014。13.03——传感材料近期进展综述。载于综合材料加工。爱思唯尔，47–101。[34] Takuro Yonezawa、Tomotaka Ito 和 Hideyuki Tokuda。2011。利用振动和加速度计将信息从移动设备传输到个人计算机。载于*ACM UbiComp'11* 论文集。[35] TakuroYonezawa、Hiroshi Nakahara 和Hideyuki Tokuda。2011。Vib-connect：一种利用振动的设备协作接口。载于*IEEE RTCSA'11* 论文集。