

静默的通信者

叶家炜

Jun 27, 2025

超声波技术在我们的日常生活中扮演着重要角色，从蝙蝠利用它进行导航、医学领域的 B 超成像诊断，到智能手机中的 proximity sensor 应用，都展示了其广泛性。一个引人思考的问题是，我们能否将超声波用于数据传输，类似 Wi-Fi 那样高效可靠？现实中已有实际案例支撑这一构想，例如支付宝的声波支付系统，用户通过设备生成特定声波完成交易；此外，Mozilla Firefox 的 Web Audio API 实验项目也演示了浏览器环境下的超声通信可行性。这些应用激发了我们对超声波作为数据传输媒介的深入探索。

1 超声波通信的核心原理

超声波通信的核心在于声波与电磁波的区别。超声波频率通常高于 20kHz，而可听声波频率范围在 20Hz 到 20kHz 之间，无线电波则覆盖更广的频段；在传播特性上，超声波在空气、水或固体介质中表现出优异的穿透性、方向性和安全性，例如在医疗成像中避免了对人体的电磁辐射风险。为了让声音携带数字信息，调制技术是关键环节；频移键控（FSK）通过不同频率代表二进制位，如 19kHz 对应 0、20kHz 对应 1，实现简单编码；相移键控（PSK）则利用声波相位的变化来编码数据，提供更高抗噪性；正交频分复用（OFDM）作为高阶方案，采用多个正交子载波传输信号，能有效抵抗多径干扰问题。然而，超声波通信面临三大核心挑战：多普勒效应在移动场景下会导致频率偏移，影响信号稳定性；环境噪声如空调运行或键盘敲击声会引入干扰，降低信噪比；高频声波在空气中传播时衰减显著，可用路径损耗公式 $L = 20 \log_{10}(d) + \alpha d$ 描述，其中 d 为距离， α 为衰减系数，这限制了远距离传输能力。

2 系统实现四步曲

发射端设计涉及硬件和软件协同工作；硬件方面，压电陶瓷换能器负责将电信号转换为声波，配合脉宽调制（PWM）驱动电路以优化输出效率；软件实现则可用 Python 的 pyaudio 库生成调制信号，例如一段代码生成 FSK 调制的波形序列。信道优化策略针对信号传输中的损耗和干扰；前向纠错（FEC）技术如 Reed-Solomon 编码添加冗余数据，能在接收端自动纠正错误；自适应增益控制（AGC）动态调整信号强度，应对因距离变化导致的幅度波动。接收端关键技术聚焦于信号处理；带通滤波器设计用于滤除可听噪声频段（如低于 18kHz 的干扰），仅允许超声波通过；检测方法上，非相干检测通过包络提取简化实现，而相干检测利用相位信息提高精度但计算复杂度更高。解码与同步环节确保数据准确恢复；使用 Chirp 信号作为帧头进行同步，因其宽带特性易于检测；时钟恢复算法如锁相环（PLL）则克服采样率漂移问题，维持比特时序一致性。

3 实战演示：Arduino 超声波传文本

基于 Arduino 平台的实战演示展示了超声波数据传输的可行性；硬件配置包括两个 Arduino Uno 开发板和改造的 HY-SRF05 超声波模块，通过调整电路使其工作在 40kHz 频段。代码框架采用 Arduino 语言实现 FSK 调制；以下伪代码展示发射端逻辑：

```
1 // 发射端伪代码
void sendBit(bool bit){
3   tone(TRANS_PIN, bit?40000:38000); // FSK 调制
   delay(10); // 每比特 10ms
5 }
```

这段代码详细解读如下：函数 `sendBit` 用于发送单个比特数据；`tone` 函数生成方波信号，其频率由条件运算符控制——当 `bit` 为真时输出 40kHz（代表二进制 1），否则输出 38kHz（代表二进制 0）；`delay(10)` 设置每个比特持续时间为 10 毫秒，确保接收端有足够时间采样。性能实测结果揭示了实际限制；在 2 米距离下，数据传输速率约为 100 比特每秒，适用于短文本传输但远不足以支持视频流；误码率方面，静态环境（如室内无风）低于 1%，而动态环境（如人员走动）则可能超过 5%，表明环境因素对可靠性的显著影响。

4 前沿应用与局限

超声波通信在创新场景中展现出独特价值；水下通信领域，如潜艇或遥控水下航行器（ROV）利用声呐系统实现数据传输，克服了电磁波在水中的快速衰减问题；跨设备认证应用，如 Apple Watch 的超声波解锁 Mac 专利，通过声波匹配完成安全配对；增强现实（AR）定位技术结合超声波与惯性测量单元（IMU），可实现厘米级精度的室内位置跟踪。然而，超声波通信存在固有缺陷；速率瓶颈明显，最高仅达千比特每秒级别，远低于兆赫兹级的射频技术如 Wi-Fi；隐私风险不容忽视，例如超声波被恶意用于跨应用追踪用户行为，引发数据泄露担忧。与其他近场通信技术相比，超声波速率约 1kbps、距离小于 10 米、安全性高；NFC 技术速率 424kbps、距离 0.1 米、安全性中高；蓝牙 BLE 速率 2Mbps、距离 100 米、安全性中等，突显超声波在特定场景的优劣势。超声波通信在电磁屏蔽环境（如核设施或水下）中具有不可替代的救生价值，为紧急通信提供可靠通道。未来展望指向量子声波传感等前沿领域，以及微机电系统（MEMS）超声波阵列技术，有望提升传输效率和规模。我们鼓励读者动手实践，例如用智能手机麦克风尝试接收超声指令，相关 Web 演示链接可访问开源项目如 [google/ultrasoon](https://github.com/google/ultrasoon) 库进行体验。