

# 基于可见光和射频融合的通信定位一体化系统

杨彦兵<sup>1,2</sup>, 胡超<sup>1</sup>, 鲁邦彦<sup>1</sup>, 张频频<sup>1</sup>, 孙奕髦<sup>1</sup>, 陈冠宇<sup>3</sup>

(1. 四川大学计算机学院, 四川 成都 610065;  
2. 四川大学工业互联网研究院, 四川 成都 610065;  
3. 深圳华创芯光科技有限公司, 广东 深圳 518118)

**摘要:** 针对在可见光和射频融合网络中, 传统的基于接收信号强度的用户切换方案未考虑用户切换错误率的问题, 提出了基于位置的用户切换方案。具体地, 设计并实现了一套基于低成本物联网芯片 ESP32 的可见光-射频融合的通信定位一体化系统, 该系统使用可见光通信下行数据、Wi-Fi 上行数据。设计了基于时-频复用的通信定位一体化框架, 使用神经网络估计用户的位置, 用户根据估计的位置完成切换。在通信方面, 系统的吞吐量最高可达 35 kbit/s; 在定位方面, 系统的定位精度可达 2.8 cm, 比传统系统的定位精度提升了 33%。与基于接收信号强度的切换方案相比, 所提方案的用户切换错误率降低了 4%。

**关键词:** 可见光通信; 融合通信系统; 神经网络; 通信定位一体化; 用户切换

**中图分类号:** TN914; TP393

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2023230

## Integrated communication and positioning system enabled by fusing visible light and RF

YANG Yanbing<sup>1,2</sup>, HU Chao<sup>1</sup>, LU Bangyan<sup>1</sup>, ZHANG Pinpin<sup>1</sup>,  
SUN Yimao<sup>1</sup>, CHEN Guanyu<sup>3</sup>

1. College of Computer Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China  
2. Industrial Internet Research Institute, Sichuan University, Chengdu 610065, China  
3. Shenzhen HCCL Co.,Ltd., Shenzhen 518118, China

**Abstract:** Aiming at the problem that in the hybrid visible light and RF network, such as the traditional user switching scheme leveraging received signal strength and ignoring the user switching error rate, a location-based user switching scheme was proposed. Specifically, an integrated communication and positioning system built upon low-cost IoT chip ESP32 was designed, which could fuse both visible light communication downlink and Wi-Fi uplink signals for accurate user location. A communication and positioning integration framework utilizing time-frequency multiplexing was designed, which used a neural network to estimate the user's position, and the user completed the switching based on the estimated position. In terms of communication, the throughput of the system can reach up to 35 kbit/s. In terms of positioning, the positioning accuracy of the system can reach 2.8 cm, making a 33% improvement over traditional system. Compared with the switching scheme relying on received signal strength, user switching error rate of the proposed scheme is reduced by 4%.

**Keywords:** visible light communication, integrated communication system, neural network, integrated communication and positioning, user switching

收稿日期: 2023-09-22; 修回日期: 2023-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61902267, No.62272329, No.62101359)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61902267, No.62272329, No.62101359)

## 0 引言

中国移动互联网发展报告（2022）<sup>[1]</sup>显示，2021 年全年移动智能终端数量全面增长，其中智能手机和可穿戴设备分别同比增长 15.9% 和 25.4%。移动终端数量的增加使移动互联网流量快速增长，我国 2022 年移动互联网接入流量达  $1.241 \times 10^{11}$  GB<sup>[2]</sup>。移动流量的快速增长对当前 5G 及其他网络提出了更高的要求，如更短的时延、更高的通信速率、更好的网络覆盖等。

IEEE 802 标准中包含 3 种主流射频通信协议：无线保真（Wi-Fi, wireless fidelity）技术、ZigBee、蓝牙。在这 3 种协议中，Wi-Fi 具有最高的通信速率，是室内无线网络的主要组成部分。从 1997 年 IEEE 802 委员会提出第一版 802.11 标准<sup>[3]</sup>到现在，Wi-Fi 已经发展了 20 多年。在这 20 年间，得益于带宽的增大、多输入多输出（MIMO, multiple input multiple output）等技术的提出，Wi-Fi 传输速率显著提高，理论最大速率从 802.11 第一版标准的 2 Mbit/s 提升到 802.11ax 标准的 9.6 Gbit/s<sup>[4]</sup>。Wi-Fi 传输速率的提升使其覆盖率迅速提高，截至 2022 年，全球公共 Wi-Fi 市场安装量为 5.49 亿台<sup>[5]</sup>。新型冠状病毒的流行促使远程工作成为一种趋势，使 Wi-Fi 连接数量快速增长，造成 2.4 GHz 频段拥堵，信道竞争激烈。ZigBee 和蓝牙也工作在 2.4 GHz 频段，拥堵的 2.4 GHz 频段会影响射频通信的性能。根据 Qureshi 的研究<sup>[6]</sup>，信道拥堵会导致吞吐量降低和传输时延增加。

作为 6G 通信中的新兴技术，光通信为射频通信的拥堵问题提供了一种解决方案，该技术被纳入最新的 802.11bb 协议中<sup>[7]</sup>。目前，光通信研究主要以可见光通信为主，与传统射频通信的 300 MHz 带宽相比，可见光通信可用带宽高达 400 THz，高带宽的优势使可见光通信的峰值速率可达 46.4 Gbit/s<sup>[8]</sup>。目前关于光网络的研究中<sup>[9-11]</sup>，通信上下行链路均基于可见光，终端设备作为光源上行数据比较影响用户日常使用，因此使用可见光作为上行链路的使用场景较有限。射频通信覆盖范围较大，但是信道竞争激烈；可见光通信覆盖范围有限，但是频谱资源丰富。结合两者的优点，可见光-射频融合网络的概念被提出，相关研究主要集中在 Li-Fi-Wi-Fi 混合网络

（HLWNet, hybrid Li-Fi and Wi-Fi network）。HLWNet 通过 Li-Fi 和 Wi-Fi 的互相补充可以实现比单一网络更好的性能，例如，当处于 Li-Fi 节点覆盖的区域时，用户可以优先建立 Li-Fi 连接，获得更高的数据传输速率；在离开 Li-Fi 节点覆盖区域后，用户断开 Li-Fi 连接，切换至 Wi-Fi，保证服务的连续性。

移动用户跟踪对于混合网络非常重要，射频定位通常基于接收信号强度（RSS, receive signal strength）实现。得益于信道状态信息（CSI, channel state information）的设计，基于 Wi-Fi 的定位系统可以使用到达角（AoA, angle of arrival）、到达时间（ToA, time of arrival）、到达时间差（TDoA, time difference of arrival）确定用户与 Wi-Fi 接入点（AP, access point）之间的相对位置。可见光定位（VLP, visible light positioning）使用 RSS 结合朗伯模型或神经网络定位，基于神经网络的 VLP 精度通常优于基于朗伯模型，可达  $4.23 \text{ cm}^{[12]}$ 。

无线漫游是指用户移动到 2 个 AP 覆盖范围的临界区域时，移动终端与新的 AP 建立连接并与原 AP 断开连接的过程，移动用户跟踪是无线漫游的基础，确定用户的位置可以帮助系统确定切换的时机。ZigBee 协议和蓝牙组网协议具有自组网的特性，而 Wi-Fi 切换需要手动完成，因此可见光-射频融合网络中与切换相关的研究主要与 HLWNet 有关。AP 切换主要分为两类：水平切换（HHO, horizontal handover）和垂直切换（VHO, vertical handover）。水平切换表示同一类型的不同 AP 之间切换，如 Li-Fi AP 到 Li-Fi AP 的切换；垂直切换表示不同类型 AP 之间的切换，如 Li-Fi AP 到 Wi-Fi AP 的切换。当前已经有较多工作对 HLWNet 中的 AP 切换进行了研究，Pergoloni 等<sup>[13]</sup>研究了 Li-Fi AP 覆盖范围对用户平均速率的影响，仿真结果表明较小的覆盖范围会导致水平切换的次数增加，用户平均通信速率降低。Purwita 等<sup>[14]</sup>探究了任意的设备朝向对垂直交换概率的影响，提出了一种基于 Wi-Fi RSS 的垂直交换算法，通过马尔可夫链对垂直交换的概率进行理论分析，仿真结果表明，垂直交换的次数和时延不能同时达到最优，需要做出平衡。

目前，大多数对于可见光-射频融合网络研究均基于仿真环境，只有较少工作实际搭建了混合通信

系统<sup>[15]</sup>。本文设计并实现了基于可见光-射频融合的通信定位一体化系统，特别地，本文系统的射频通信部分基于 Wi-Fi 实现，射频部分和可见光部分可以为系统提供 2 种不同的 RSS 信息，有助于提高定位精度。传统的基于光 RSS 的切换方案缺乏对用户切换错误的考虑，设备在固定位置采集到的光 RSS 在一定范围内波动，当用户与 2 个发射机距离相近时，基于光 RSS 的切换方案会导致切换错误，使用户掉线，网络服务质量降低。基于通信定位一体化框架，本文提出了基于位置的用户切换方案，系统估计用户的位置并判断切换的时机。

在传统的关于 HLWNet 的研究中，Li-Fi 和 Wi-Fi 均能双向通信，旨在同一链路中实现异构组网、资源分配。终端设备需要同时包含 Li-Fi 通信模块和 Wi-Fi 通信模块并且 Li-Fi 通信模块需要使用硬件隔离避免同侧信号的泄漏<sup>[16]</sup>，导致硬件设计复杂度较高。另外可见光在信道中衰减较严重，终端设备需要较高的上行光信号功率以保证通信质量，导致续航时间缩短。本文系统使用可见光通信作为下行链路，使用 Wi-Fi 作为上行链路，两者相互协作。由于没有可见光上行链路，接收机无须设计发光二极管 (LED, light-emitting diode) 驱动电路，也无须考虑信号泄漏，异构的上下行链路设计有效地降低了硬件设计复杂度。具体地，本文主要贡献如下。

1) 设计了适用于混合网络的协调器、发射机和接收机。发射机负责信号的发送，协调器负责发射机的控制、用户的切换、数据包转发等。与传统的混合通信系统相比，本文创新地在发射机上设计了以太网接口和 Wi-Fi 接口，特别地，协调器和发射机之间通过以太网接口进行通信，发射机和接收机之间通过 Wi-Fi 接口进行数据上行。

2) 基于该混合系统，本文提出了基于时分复用和频分复用的通信定位一体化框架。系统中的任一灯以时分复用的方式发送数据信号和定位信号，灯与灯之间以频分复用的方式发送定位信号。定位信号是基于位置的切换方案的基础，该切换方案可以有效降低用户切换错误率，避免用户掉线，提高服务质量。定位算法通过卷积神经网络估计用户的位置，系统根据用户的位置指引用户完成切换。

3) 针对该系统进行了详细的实验。在定位方面，本文通过对比实验证明了定位算法各个步骤的有效性，系统定位精度可达 2.8 cm，相较于传统系

统，准确度提高了 33%，用户切换错误率降低了 4%。在通信方面，本文通过误码率、丢包率和净吞吐量 3 个指标评估了系统的通信性能，净吞吐量最高可达 7.8 kbit/s。

### 1 系统模型

混合通信系统分为发射端和接收端，系统结构如图 1 所示。发射端包括发射机和协调器，发射机和协调器之间通过网线连接。接收端通常包含若干接收机，本文系统面向单用户，因此接收端只包含一个接收机。发射机通过可见光通信向接收机发送数据，通过 Wi-Fi 上行链路接收数据。需要强调的是，虽然 Wi-Fi 可以双向通信，但在本文系统中，Wi-Fi 仅用于上行数据，下行数据均基于可见光通信。

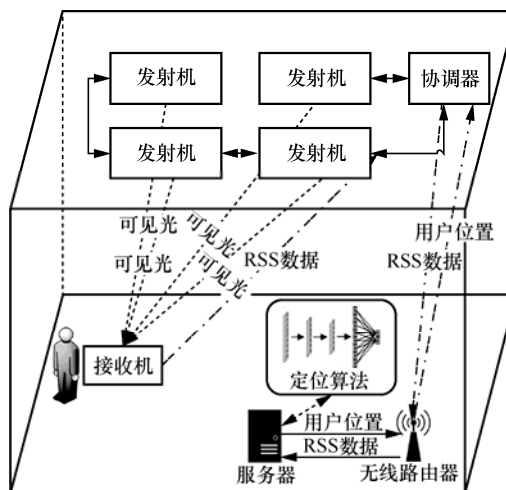


图 1 系统结构

接收机定期向服务器发送 RSS 数据，该数据首先到达某一发射机，然后被转发至协调器，最后到达服务器，部署在服务器上的定位算法通过 RSS 数据估计用户位置。协调器通过消息队列遥测传输 (MQTT, message queuing telemetry transport) 协议获得用户位置，根据用户位置指引用户完成切换。

#### 1.1 发射端

发射端由 1 个协调器和 4 个发射机组成，协调器和 4 个发射机之间通过网线连接，为了避免网络风暴，协调器和发射机之间的网线连接没有成环，发射机和协调器的硬件设计如图 2(a)所示，发射机和协调器只是软件功能上的区分，它们的硬件设计是相同的。

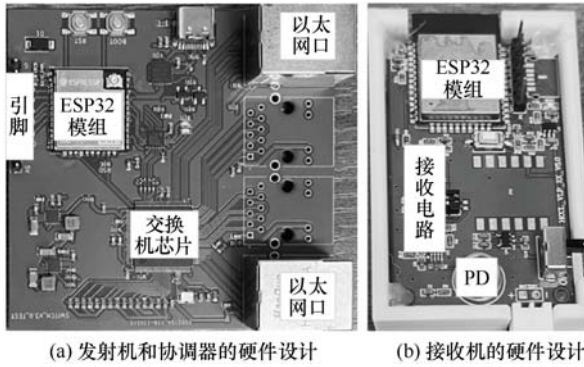


图 2 系统硬件设计

发射端的网络结构如图 3 所示。协调器和发射机均包含 2 种网络接口：以太网和 Wi-Fi。特别地，发射机还包含“可见光通信接口”，即 LED 灯及其驱动电路。协调器的网络接口为 Wi-Fi 站 (STA, station)，发射机的网络接口为 Wi-Fi AP。Wi-Fi 的载波侦听会提高通信时延，发射端的协调器和发射机通过网线连接可以降低通信时延，有助于提高用户切换等功能的运行效率。

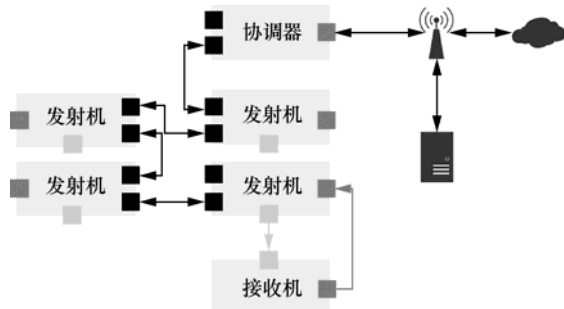


图 3 发射端的网络结构

发射机使用低成本 ESP32 作为控制核心，可见光通信采用开关键控 (OOK, on-off keying) 的调制方法，该调制方法具有实现简单、硬件复杂度低的特点。为了进一步降低数据编码复杂度，充分利用 ESP32 的性能，本文采用芯片自带的通用异步收发传输器 (UART, universal asynchronous receiver transmitter) 产生编码数据，UART 是一种串行、全双工、异步的通信协议，该协议串行传输数据的每个二进制位，当比特位为“1”时，数据线为高电平；当比特位为“0”时，数据线为低电平。UART 协议和 OOK 调制相匹配，当传输比特“1”时，数据线为高电平，发射机控制 LED 灯点亮，反之 LED 灯熄灭。

### 1.2 接收端

本文系统面向单用户，因此接收端只包含一个接收机，接收机的硬件设计如图 2(b)所示。接收机

采用 ESP32 作为控制核心，其自带的 Wi-Fi 功能和自制的可见光通信接收电路为接收机提供了 2 个接口：Wi-Fi STA 接口和可见光通信接口。Wi-Fi STA 接口和发射机的 AP 接口连接，构成系统的上行链路。接收机的可见光通信接口指的是光电二极管 (PD, photodiode) 及其信号调理电路。PD 将发射机的光信号转换成电信号，放大器将 PD 输出的信号放大，放大后的信号分为两路，一路信号经过比较器后由 UART 模块完成解调，得到原始数据。在 UART 协议中，起始位代表 UART 数据包的开始，UART 接收模块在检测到起始位后，根据发射机和接收机约定的频率对信号进行采样，高电平映射为比特“1”，低电平映射为比特“0”。另一路信号由模数转换器 (ADC, analog to digital converter) 完成采样、量化等工作，采集的光 RSS 数据通过 Wi-Fi 上行链路上传到服务器，服务器通过收到的数据对用户的位置进行估计，判断是否需要用户切换。

本文系统使用 UART 作为底层传输协议主要有如下优点。1) UART 不需要时钟同步即可异步地完成数据的发送和接收。2) UART 作为一种广泛使用的物联网通信协议，大多数单片机芯片均集成了专用的硬件 UART 解码模块，该模块解码速度远高于软件解码，降低解码时延可以有效地提高系统吞吐量。3) 应用层不需要关心物理层的信号，只需要监控 UART 缓冲区是否有数据。电信号在进入 UART 模块之前需要被放大到正确的电压范围中，接收机使用比较器完成信号的放大，比较器的基本原理是将输入电信号与电压阈值进行比较，当输入电信号小于电压阈值时，输出信号电压为  $V_l$ ；当输入信号大于电压阈值时，输出信号电压为  $V_u$ 。比较器的阈值由电路中的器件决定，当电路设计确定后，阈值也随之确定，比较器的阈值电压通常设定为输入信号的均值。接收机收到的光信号强度随接收机与发射机之间距离的变化而变化，比较器输入的电信号也随之变化，这会使设定的电压阈值与电信号不匹配，导致数据位的宽度产生差异，进而使 UART 接收模块采样到错误的电平，导致误码率 (BER, bit error rate) 提高。为了解决阈值失效的问题，本文设计了动态阈值的比较器电路，该电路根据输入信号的幅度动态地调整阈值。

### 1.3 基于时-频复用的通信定位一体化框架

本文提出的通信定位一体化框架具体结构如

图 4 所示，其中，浅灰色方块代表数据信号，频率为  $frq\_data$ ；深灰色方块代表定位信号，LED 灯  $i$  的定位信号的频率为  $frq\_pos_i$ 。当用户位于灯 1 的覆盖范围内时，灯 1 以时分复用的方式交替发送数据信号和定位信号，灯 1 和其他灯之间以频分复用的方式发送不同频率的定位信号。

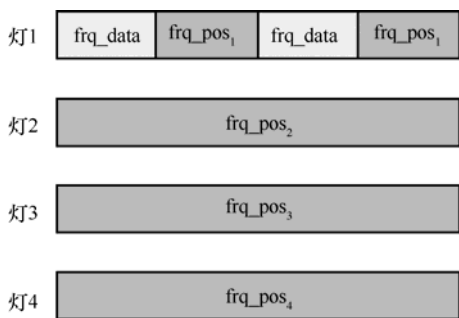


图 4 通信定位一体化框架具体结构

### 1.3.1 用户定位

对于处在发射机覆盖范围内的接收机，两者之间的直流增益可用朗伯模型表示<sup>[11]</sup>

$$H = \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\varphi) \cos(\phi) \quad (1)$$

其中， $m$  表示朗伯阶， $d$  表示发射机和接收机之间的距离， $A$  表示 PD 的有效接收区域， $\varphi$  表示发射机的照射角， $\phi$  表示 PD 的入射角。当用户处于功率相同的灯 1、灯 2、灯 3 的覆盖范围内时，该位置的直流增益可以表示为

$$H_{sum} = \sum_{i=1}^3 H_i \quad (2)$$

其中， $H_i$  表示接收机与灯  $i$  之间的直流增益。如果不区分各个灯的光信号强度，当灯 1 熄灭时，尽管该点仍能收到光信号，但接收机收到的光信号强度已经显著变小，导致定位结果产生较大的偏差。

本文通过频率区分各个灯的定位信号强度，对  $frq\_pos_i$  与  $frq\_data$  设置以下约束

$$\{frq\_pos_i | \forall i \in [1, 4], frq\_pos_i > frq\_data\} \quad (3)$$

数据信号的频率和定位信号的频率之所以这样规定，是因为 UART 物理层通过电平宽度判断起始位，因此只有定位信号的频率  $frq\_pos_i$  大于数据信号的频率  $frq\_data$ ，才能避免 UART 误判起始位，减少定位信号对数据信号的干扰。当处于网络的覆盖范围内时，除了光 RSS 以外，接收机可以通过 Wi-Fi STA 接口扫描得到 4 个发射机的 Wi-Fi RSS，

Wi-Fi RSS 与接收机和发射机之间的距离有关，一般使用对数距离路径损耗模型来表示 Wi-Fi RSS 与距离之间的关系<sup>[17]</sup>

$$RSS = -10n \log d + \tau \quad (4)$$

其中， $d$  为发射机和接收机之间的距离， $n$  为与环境相关的路径损失参数，该参数随着环境中障碍物数量的增加而增大， $\tau$  为一个恒定值，表示在预定标准距离测量到的 RSS。接收机将 STA 接口扫描得到的 Wi-Fi RSS 和 ADC 采样得到的光 RSS 发送给服务器，由定位算法估计用户的位置。

### 1.3.2 数据通信

对于单灯，交替发送的数据信号和定位信号之间不会产生干扰，这是因为 UART 协议通过电平宽度判定起始位，由于  $frq\_pos_i$  大于  $frq\_data$ ，定位信号的电平宽度小于数据信号的电平宽度，不会引起 UART 模块的误判，对误码率没有影响。

对于多灯，数据信号会受到定位信号的影响，影响程度与接收机和两灯的相对距离有关。对于网络覆盖范围内的任意位置，接收机收到的光信号可以表示为<sup>[11]</sup>

$$P_r = \sum_{i=1}^4 H_i P_i + \sigma \quad (5)$$

其中， $P_r$  表示接收机的光功率， $P_i$  表示灯  $i$  的发射功率， $\sigma$  表示加性白高斯噪声 (AWGN, additive white Gaussian noise)， $H_i$  表示灯  $i$  与接收机之间的直流增益。

当用户处于图 5 中的  $a$  位置时，接收机与灯 3 距离为  $d_{1,3}$ ，不在其他灯的覆盖范围中，其他 3 个 LED 灯的光信号可以视为噪声  $\varepsilon$ 。此时，接收机收到的信号可由式(5)变为

$$P_r = H_3 P_3 + \varepsilon \quad (6)$$

接收机光信号的变化主要由灯 3 决定，接收机解调得到的 1/0 二进制序列与灯 3 的亮/灭匹配，数据传输不受影响。当用户从  $a$  位置移动到  $b$  位置，接收机与灯 3 之间的距离由  $d_{1,3}$  变为  $d_{2,3}$ ，与灯 1 之间的距离为  $d_{2,1}$ ，用户位置的变化导致接收机与灯 1 之间的增益显著变大，而与灯 3 之间的增益几乎不变。由于接收机收到的灯 1 的光 RSS 与灯 3 的光 RSS 接近，灯 1 的信号不能视为噪声，此时接收机光信号的变化由灯 1 和灯 3 共同决定，由于灯 1

和灯 3 之间没有位同步，接收端收到的信号的电平宽度会变长或变短，例如，灯 3 熄灭时灯 1 点亮，此时正确数据为比特 0，但是接收端会解调为比特 1，导致误码率提高。为了减小定位信号对数据信号的干扰，本文使用低通滤波器抑制定位信号，滤波后定位信号的强度越低，对数据信号的影响越小。

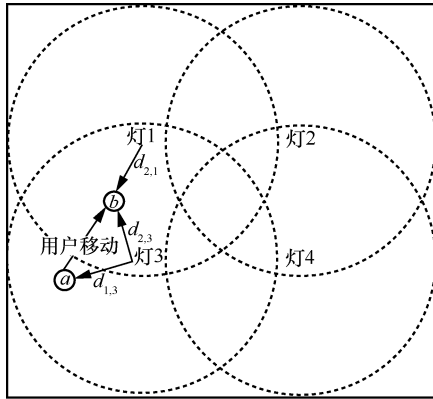


图 5 用户位置变化对信号的影响

本文系统的通信数据包设计如图 6 所示。数据包由包头、包体和校验字段组成，包头以“\r\n\r\n”为分隔符，该分隔符帮助接收机程序从数据流中提取数据包。分隔符后为控制字段，该字段的长度为 8 bit，控制字段的值表示该数据包的用途，在本文系统中，控制字段有 0 和 1 这 2 种值，控制字段为 0 表示该数据包为普通数据包，为 1 表示该数据包含有定位信息，接收机需要根据定位信息进行 AP 切换。控制字段后为序号字段，序号字段表示该数据包的序号，该字段长度为 16 bit。包头的最后为长度字段，该字段长度为 8 bit，它标识了包体的长

度(以 Byte 为单位)，包体长度的最大值为 30 Byte。包体之后为校验字段，接收机通过该字段对整个数据包进行循环冗余校验 (CRC, cyclic redundancy check)。本文系统借鉴了传输控制协议 (TCP, transmission control protocol) 中的确认机制，发射机的数据包的序号字段表示该包的序号，接收机收到该数据包后通过 Wi-Fi 上行链路向发射机回传一个确认包，发射机收到确认包后根据确认包的序号发送下一个数据包。

\r\n\r\n	控制字段 (8 bit)	序号字段 (16 bit)	长度字段 (8 bit)	包体	校验字段 (8 bit)
----------	-----------------	------------------	-----------------	----	-----------------

图 6 通信数据包设计

## 2 定位算法及用户漫游

### 2.1 定位算法

用户的定位由卷积神经网络完成，神经网络结构如图 7 所示。接收机向服务器发送 Wi-Fi RSS 信息和光 RSS 信息。虽然本文系统的射频部分基于 Wi-Fi 实现，但基于 ZigBee 协议和蓝牙协议的设备也可以收集射频信号的 RSS，定位算法可以兼容这 2 种协议。接收机采集的 Wi-Fi RSS 数据是通过扫描室内空间中的 Wi-Fi 信标帧得到的，发射机没有主动向接收机发送数据，这符合仅使用 Wi-Fi 上行链路的设计原则。对于光 RSS，算法首先使用快速傅里叶变换 (FFT, fast Fourier transform) 得到不同频率的定位信号的强度。在经过预处理后，数据可表示为

$$\{W_{rss1}, W_{rss2}, W_{rss3}, W_{rss4}, L_{rss1}, L_{rss2}, L_{rss3}, L_{rss4}\} \quad (7)$$

其中， $L_{rssj}$  和  $W_{rssj}$  分别表示发射机  $j$  的光 RSS 和

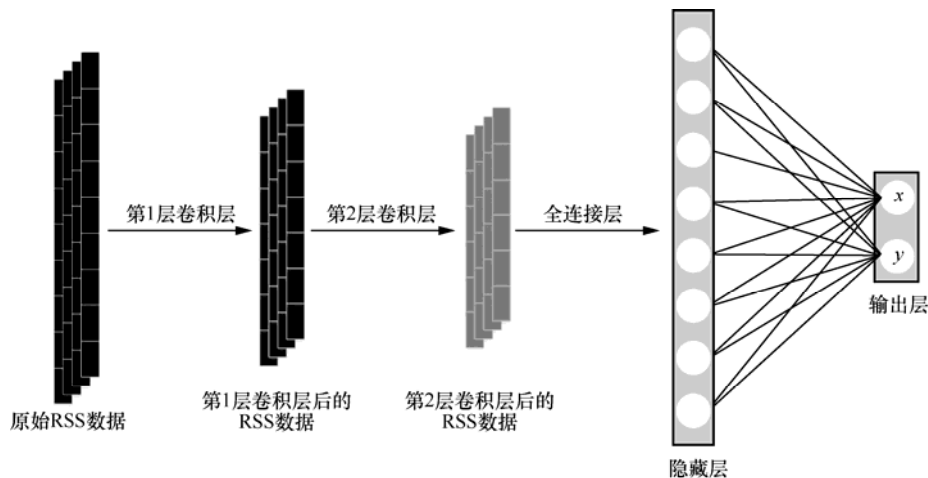


图 7 神经网络结构

Wi-Fi RSS。受 Hsu 等<sup>[12]</sup>的启发，本文通过将  $W_{rssj}$  和  $L_{rssj}$  分别相乘来增强数据，增强后的数据维度为  $1 \times 24$ ，如式(8)所示。

$$\begin{Bmatrix} W_{rss1} & L_{rss1} & W_{rss1}L_{rss1} & W_{rss1}L_{rss2} & W_{rss1}L_{rss3} & W_{rss1}L_{rss4} \\ W_{rss2} & L_{rss2} & W_{rss2}L_{rss1} & W_{rss2}L_{rss2} & W_{rss2}L_{rss3} & W_{rss2}L_{rss4} \\ W_{rss3} & L_{rss3} & W_{rss3}L_{rss1} & W_{rss3}L_{rss2} & W_{rss3}L_{rss3} & W_{rss3}L_{rss4} \\ W_{rss4} & L_{rss4} & W_{rss4}L_{rss1} & W_{rss4}L_{rss2} & W_{rss4}L_{rss3} & W_{rss4}L_{rss4} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

在图 7 中，神经网络共有 2 层卷积层，使用的卷积核均为一维卷积核。第 1 层卷积层使用的卷积核的大小为  $1 \times 13$ ，输出通道数为 6；第 2 层卷积层使用的卷积核大小为  $1 \times 7$ ，输出通道数为 16，每个卷积层的输出均进行批正则化 (BN, batch normalization)，该算法在 2015 年提出<sup>[18]</sup>，通过变换网络的输出使网络训练更快且更稳定。2 层卷积层后为 2 层全连接层，第 1 层全连接层的神经元数量为 120，第 2 层全连接层的神经元数量为 2，对应估计的二维坐标。模型的损失函数使用均方根误差 (RMSE, root mean square error)。

发射机以时分复用的方式循环发送数据信号和定位信号，由于发射机和接收机之间没有同步，ADC 采样的时间远小于发射机时分的周期，接收机一次采样的光 RSS 信息中可能并不包含当前发射机的定位信号，即定位算法的 FFT 结果中不包含当前发射机的定位信号的强度。从实验结果来看，当前发射机的定位信号的强度信息的缺失对定位精度没有明显影响。训练数据在 4 个 LED 灯均发送定位信号的情况下采集，在训练阶段，FFT 结果中强度最大的频率对应当前发射机的定位信号的频率，其值被置为 0，表示接收机没有采集到当前发射机的定位信号。在部署阶段，定位算法将 FFT 结果中与当前发射机定位信号对应的频率的强度置为 0，然后估计用户位置。

卷积神经网络中卷积层的时间复杂度表示为<sup>[19]</sup>

$$O\left(\sum_{i=1}^n M_i K_i C_{i-1} C_i\right) \quad (9)$$

其中， $n$  为卷积层层数， $M_i$  为第  $i$  层卷积层输出的向量的长度， $K_i$  为第  $i$  层卷积核的大小， $C_{i-1}$  为第  $i-1$  层的输出通道数， $C_i$  为第  $i$  层的输出通道数。本文系统使用的卷积神经网络的计算复杂度不高，这使定位算法部署在具有更高计算能力的物联网节点上成为可能。

## 2.2 基于可见光和 Wi-Fi 的混合无线漫游

在本文系统中，数据下行基于可见光通信，数据上行基于 Wi-Fi，当用户移动到某一发射机下时，会断开与原发射机的连接，并与当前发射机建立新连接，具体用户切换流程如图 8 所示。

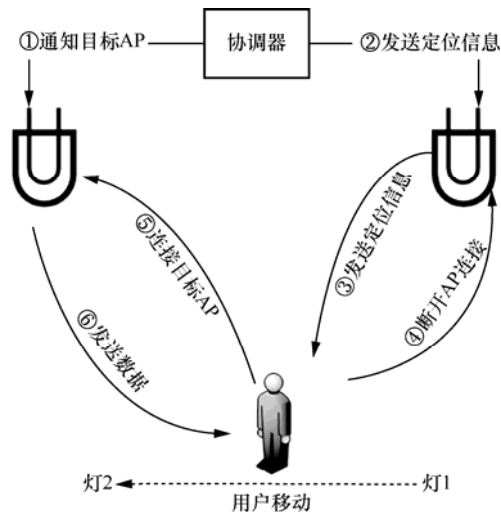


图 8 用户切换流程

接收机定期地向服务器发送 Wi-Fi RSS 信息和光 RSS 信息，服务器通过 MQTT 协议发布定位信息，协调器通过 MQTT 协议接收定位信息，在收到信息后，协调器根据信息的内容控制发射机，完成用户切换。如图 8 所示，当用户从灯 1 向灯 2 移动时，定位算法首先根据接收机上传的数据估计用户的位置，当用户的位置与灯 2 之间距离多次小于灯 1 之间的距离时，服务器通过 MQTT 协议发布定位信息，定位信息包含了接收机需要切换到的目标 AP 的服务集标识 (SSID, service set identifier) 和密码。定位算法之所以需要多次判定距离，是因为在用户快速移动时避免不必要的切换。协调器通过 MQTT 协议获取到定位信息后，会首先通知目标 AP 向文件服务器请求数据，然后将定位信息发送给当前 AP，当前 AP 通过可见光通信将该信息发给接收机，接收机收到定位信息后，会首先断开与当前 AP 的 Wi-Fi 连接，当前 AP 检测到 Wi-Fi 断开后，停止数据信号的发送。在断开 Wi-Fi 连接后，接收机根据定位信息向目标 AP 发起 Wi-Fi 连接请求，连接成功后，接收机通过 Wi-Fi 上行链路向新 AP 发送握手数据包 (序号为 0 的确认包)，该握手数据包用于通知发射端 Wi-Fi 切换已经完成，此时接收机的可见光通信接口处于等待接收数据的状态。在收到

握手数据包后，新 AP 首先通知协调器用户已经完成切换，然后以时分复用的方式交替发送数据信号和定位信号。

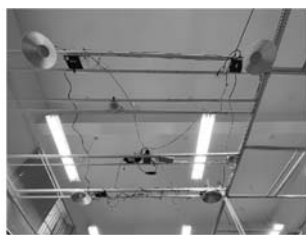
### 3 实验平台及结果分析

#### 3.1 实验平台及参数设计

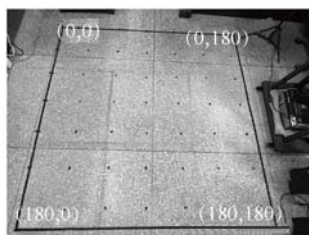
系统实验场景如图 9 所示，系统相关参数如表 1 所示。LED 光束角为  $120^\circ$ ，功率约为 20 W，PD 的接收面积为  $3.7 \text{ mm}^2$ ，4 个灯呈正方形排布，相邻灯之间的距离为 1.8 m，灯与地面的距离为 2.7 m。发射机和接收机均使用 ESP32 模组作为主控，该模组集成了包括 Wi-Fi、ADC 在内的多种模块，且成本较低。每个发射机的数据发送速率为 115 200 bit/s，与常用的串口波特率一致。每个数据包包体的最大长度限制为 30 Byte，数据包过长会导致灯的闪烁。在发射机以时分的方式交替发送数据信号和定位信号时，定位信号长度设置为 2 ms。

表 1 系统相关参数

参数	值
LED 灯功率/W	20
LED 光束角	$120^\circ$
LED 间距/m	1.8
LED 高度/m	2.7
PD 接收面积/ $\text{mm}^2$	3.7
数据发送速率/ $(\text{bit}\cdot\text{s}^{-1})$	115 200
定位信号长度/ms	2
定位信号频率/kHz	130,145,160,175
ADC 采样率/sps	500



(a) 实验平台



(b) 采样点分布

图 9 实验场景

发射机定位信号的频率分别设置为 130 kHz、145 kHz、160 kHz、175 kHz。接收机 ADC 模块的采样率设置为 500 sps，采样点数为 256，单次采样时长为 0.512 ms。如图 9(b)所示，在  $1.8 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$  的空间中，本文系统以 30 cm 为间距标定 49 个点，其中灯 1、灯 2、灯 3、灯 4 分别位于  $(0,0)$ 、 $(0,180)$ 、 $(180,0)$ 、 $(180,180)$  4 个位置。本文在每个点采集 1 000 条数据，共计 49 000 条数据，这些数据按照 6:2:2 的比例被划分成训练集、验证集和测试集。

#### 3.2 实验结果

关于定位，本文使用 RSME 作为损失函数，通过测试集的结果评估系统的定位性能。关于通信，本文通过误码率、丢包率和净吞吐量评估系统的通信性能，净吞吐量表示接收机单位时间内通过 CRC 的、有序的数据量。

##### 3.2.1 定位性能

图 10 为神经网络训练过程中损失函数变化曲线，在训练大约 80 次以后，损失函数趋于收敛。训练集和验证集的损失函数收敛的值基本一致，表示模型没有发生过拟合。

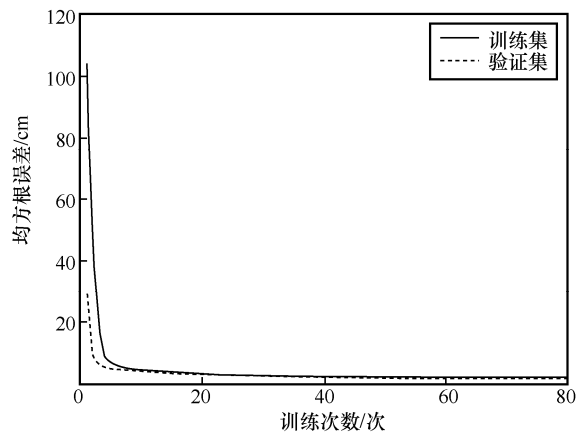


图 10 神经网络训练过程中损失函数变化曲线

本文首先对比了使用  $W_{\text{rssj}}$ 、 $(L_{\text{avg}}, W_{\text{rssj}})$  与  $(L_{\text{rssj}}, W_{\text{rssj}})$  (无数据增强) 的定位误差， $L_{\text{avg}}$  为光 RSS 均值，表示接收机在某一位置的光信号强度。由于输入数据的维度较小，图 11 的实验结果使用的神经网络仅包含 1 层卷积层，卷积核的大小为  $1 \times 2$ ，输出通道数为 6。由图 11 的结果可以看出，在仅使用  $W_{\text{rssj}}$  时，定位误差在 90% 的概率下为 55 cm 左右，精度极差。在结合  $L_{\text{avg}}$  后，定位精度显著提高，在 90% 的概率下，定位误差约为 28 cm。虽然定位精度提

高，但是标定点之间的距离为 30 cm，28 cm 的定位误差会导致用户切换到错误的 AP。通过频率区分每个灯的光信号强度可以有效提高定位精度，定位误差从 25 cm 降低到 8 cm。

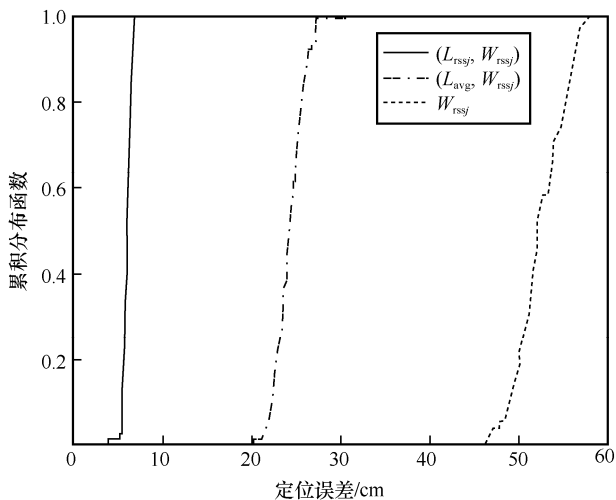


图 11 混合定位与 Wi-Fi RSS 定位精度对比

本文测试了数据增强方法对定位精度的影响，实验结果如图 12 所示。在同样使用 1 层卷积层的情况下，不使用当前灯的定位信号在 90% 的概率下，定位误差为 4.8 cm，与图 11 的 8 cm 相比，数据增强方法使定位精度提高了 40%。增加卷积层可以进一步提高定位精度，通过使用图 7 中的网络结构，定位误差从 4.8 cm 降低到 2.8 cm，定位精度提高了 42%。

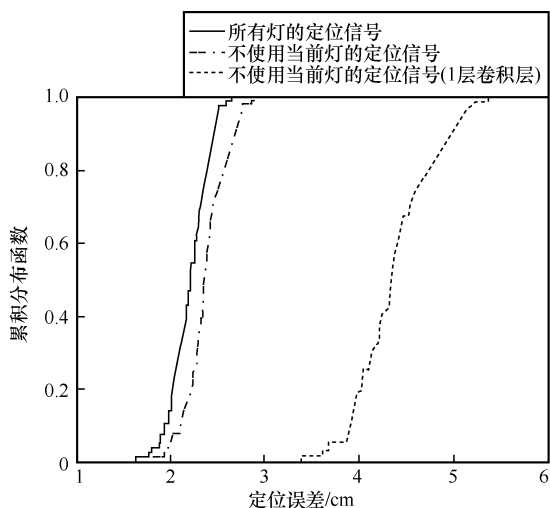


图 12 数据增强方法对定位精度的影响

本文方法与传统定位方法（多边定位<sup>[20]</sup>和多层感知器<sup>[21]</sup>（MLP, multilayer perceptron））进行了对

比，实验结果如图 13 所示，本文使用的卷积神经网络的定位精度远超传统定位方法，证明了本文方法的有效性。多层感知器无法有效地拟合光 RSS 与 Wi-Fi RSS 数据，其定位精度劣于本文使用的卷积神经网络。多边定位通过接收机与多个发射机之间的距离估计用户的位置，通过光 RSS 和 Wi-Fi RSS 估计接收机和发射机之间的距离产生较大的误差，因此多边定位的定位精度最差。除了这 2 种传统方法以外，与同样使用卷积神经网络定位的工作<sup>[12]</sup>相比，本文通过借助 Wi-Fi RSS 信息使定位精度提高了 33%。

传统的工作大多通过用户切换率来评估不同切换方案的性能，缺乏对用户切换错误率的考虑。用户切换错误表示用户在漫游过程中切换到错误的 AP，这会导致用户掉线、数据传输中断、服务质量降低。在本文系统中，基于 RSS 的用户切换方案的用户切换错误率为 4%，本文系统提出的基于位置的切换方案的用户切换错误率为 0。

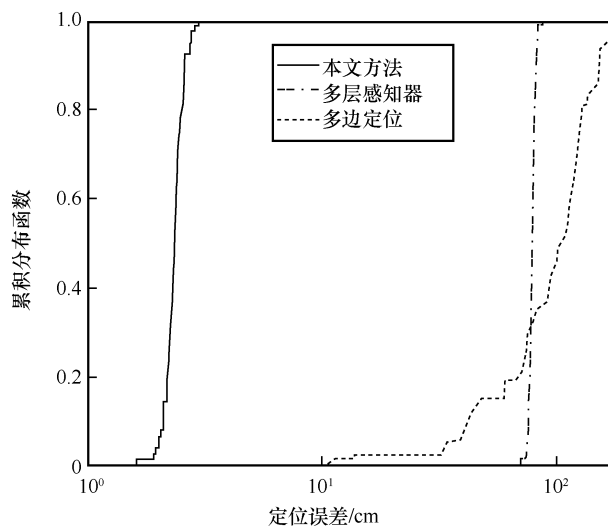


图 13 本文方法与传统定位方法的定位精度对比

最后，本文评估了使用与不使用当前发射机的定位信号对定位精度的影响。在 90% 的概率下，使用所有灯的定位信号的强度信息的定位误差约为 2.5 cm，不使用当前灯的定位信号的强度信息的定位误差约为 2.8 cm，两者仅差 0.3 cm。从实验结果来看，发射机以时分复用的方式交替发送数据信号和定位信号似乎是不必要的，因为时分复用模式下的定位信号不仅对定位精度的提升有限，还占用了数据信号的发送时间，导致系统吞吐量降低。需要

注意的是，尽管本文系统主要面向单用户，在未来的多用户场景下，当多位用户处于同一灯下时，数据信号和定位信号可以分别为不同用户提供通信服务和定位服务，从后续的实验结果可知，定位信号并不会影响净吞吐量。综合这两点，发射机时分复用的模式是有必要的。

### 3.2.2 通信性能

在通信方面，本文分别从误码率（BER）、丢包率（PLR, packet loss rate）和净吞吐量 3 个指标测试系统的通信性能，3 个指标每 100 个包计算一次。实验结果如图 14 和图 15 所示。本文选取了图 9(b)中（0,0）、（0,30）、（0,60）、（0,90）这 4 个位置进行实验，发射机和接收机均水平放置，接收机和发射机之间的直流增益只和距离有关，与位置无关，因此选取的 4 个位置可以代表实验场景中内部门点。从（0,0）到（0,90），接收机与灯 1 之间的距离逐渐变大，与灯 2 之间的距离逐渐变小。位置（0,0）不在灯 2 的覆盖范围内，灯 1 的数据信号不受灯 2 的定位信号的干扰，此时 BER 约为 0.6%，PER 约为 1%，净吞吐量约为 7.8 kbit/s，在此位置，是否使用滤波器对通信性能影响不大。位置（0,30）处于灯 1 和灯 2 的覆盖范围内，但距离灯 1 较近，该位置误码率、丢包率和净吞吐量在不使用滤波器的情况下均分别为 2%、3%和 7.1 kbit/s，在使用滤波器的情况下分别为 1.5%、2%和 7.3 kbit/s。与位置（0,0）相比，位置（0,30）的通信性能略微变差，这是因为灯 2 的定位信号影响了灯 1 的数据信号，使用滤波器可以降低灯 2 定位信号对灯 1 数据信号的影响，提升通信性能。滤波器对灯 2 的定位信号只能起到抑制作用，不能完全去除，因此即使使用滤波器，位置（0,30）的通信性能仍低于位置（0,0）。位置（0,60）也处于灯 1 和灯 2 的覆盖范围内，与位置（0,30）相比，由于灯 1 的光强变弱，灯 2 的光强变强，该位置的通信性能大幅降低，误码率、丢包率和净吞吐量在不使用滤波器的情况下均分别为 14%、35%和 1.6 kbit/s，在使用滤波器的情况下分别为 2%、4%和 7.1 kbit/s。位置（0,90）位于灯 1 和灯 2 的中间位置，由于灯 2 定位信号的干扰，接收机已经无法接收数据，误码率、丢包率和净吞吐量在不使用滤波器的情况下均分别为 100%、100%和 0 kbit/s，在使用滤波器的情况下分别为 2.5%、3%和 7.2 kbit/s。

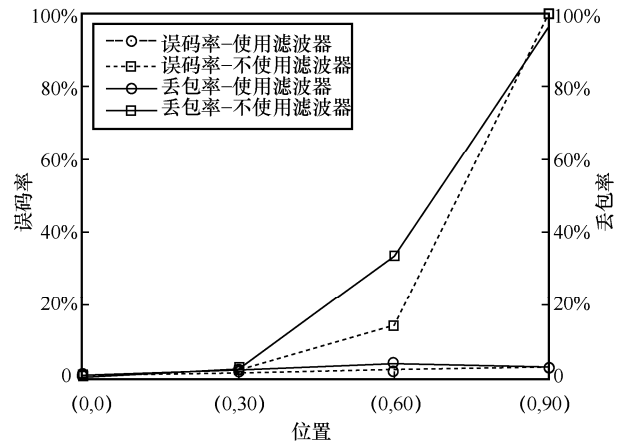


图 14 误码率和丢包率实验结果

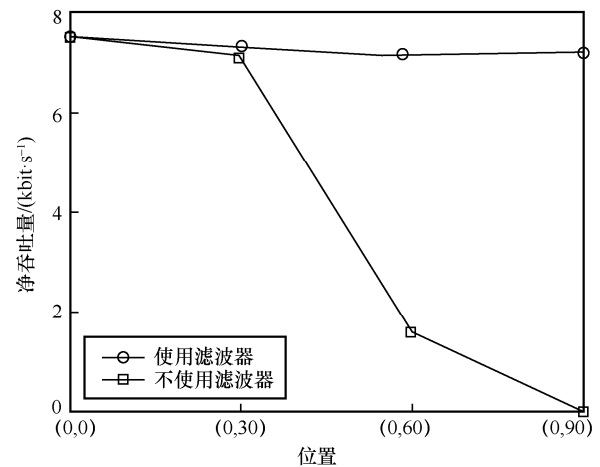


图 15 净吞吐量实验结果

本文测试了净吞吐量在空间内的覆盖情况，结果如图 16 所示。净吞吐量的覆盖呈对称分布，4 个灯所在位置的净吞吐量较高，中间位置净吞吐量较低，最低为 6.9 kbit/s。净吞吐量的分布情况与光强分布一致，接收机越靠近发射机，光照强度越高，受到其他发射机的干扰越小，因此净吞吐量就越高。由于采用确认机制，接收机需要在校验完成后通过 Wi-Fi 上行链路回传确认包，发射机在收到确认包后才会发送下一个数据包。作为通信的主要开销，Wi-Fi 通信的时延在 30 ms 左右，这限制了净吞吐量的提高。不使用确认机制的情况下，系统的最大净吞吐量可达 35 kbit/s，净吞吐量虽然提高，但是数据传输不可靠，可靠性和净吞吐量不可兼得。由于存在 Wi-Fi 通信的时延，发射机在等待大约 30 ms 后才能收到确认包并发送下一个数据包，发射机在此期间处于“空闲状态”，因此发射机时分复用模式中的定位信号不会影响系统的净吞吐量。

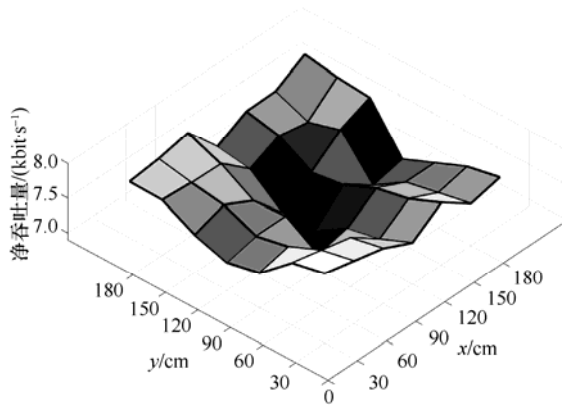


图 16 净吞吐量在空间内的覆盖情况

除了通信以外，接收机还需要周期性地将 Wi-Fi RSS 和光 RSS 上传至服务器，由定位算法估计用户的位置。本文系统使用的 ESP32 芯片运行基于抢占式调度的操作系统，因此接收机上传数据的周期会影响系统的净吞吐量，接收机更快地上传数据，系统可以更细粒度地估计用户的位置，更快速地完成切换，但频繁地上传数据会占用大量芯片运行时间，导致系统的净吞吐量降低。本文评估了上传周期对系统的净吞吐量的影响，实验结果如图 17 所示。当上传周期分别为 50 ms、100 ms、150 ms、200 ms 时，系统的净吞吐量分别为 1.6 kbit/s、1.85 kbit/s、2.8 kbit/s、3.3 kbit/s。

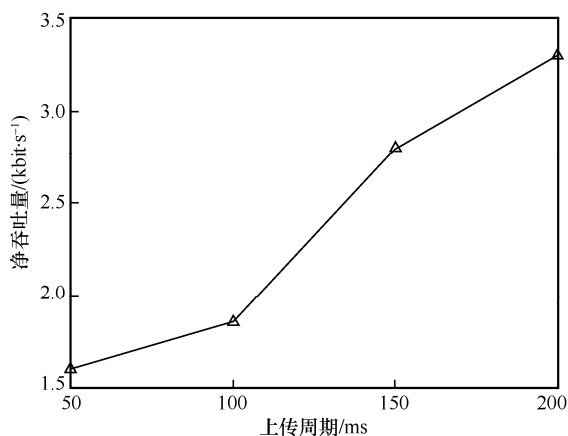


图 17 上传周期对净吞吐量的影响

#### 4 结束语

本文设计了可见光-射频融合通信定位一体化系统，与传统的工作相比，本文系统使用 Wi-Fi 作为上行链路，使用光作为下行链路，异构的设计可以有效降低电路复杂度。在通信方面，系统在物理层使用滤波器减少定位信号对数据信号的干扰。实

验结果表明，系统吞吐量最高可达 35 kbit/s。系统可以通过确认机制提高数据传输的可靠性，净吞吐量最高可达 7.8 kbit/s。在定位方面，定位算法通过 Wi-Fi RSS 和光 RSS 估计用户位置，结合数据增强方法，定位误差最低可达 2.8 cm。系统较好的通信和定位性能为基于位置的用户切换方案提供了基础，定位算法估计用户的位置，系统根据估计的位置发布定位信息，通知发射机准备数据，指引用户完成切换，与基于光 RSS 的切换方案相比，本文提出的切换方案的切换错误率降低了 4%。

除了 Wi-Fi 以外，本文系统也可以选择 ZigBee 和蓝牙作为射频通信部分，通信定位一体化框架可以兼容这 2 种协议。本文系统的可见光通信部分在净吞吐量上还有较大的提升空间，在硬件设计上，提高电路的带宽可以有效提高系统的通信性能；在网络协议上，使用 TCP 流水线机制可以提高系统的吞吐量。在未来的研究中，本文系统将设计精细的同步机制，减少数据信号与定位信号之间的干扰。目前定位算法在服务器上运行，本文拟将定位算法部署在运算能力更强的物联网节点上，打造具有自治、边缘计算能力的系统。

#### 参考文献:

- [1] 唐维红, 唐胜宏, 刘志华. 移动互联网蓝皮书: 中国移动互联网发展报告 (2022) [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2022.  
TANG W H, TANG S H, LIU Z H. Mobile Internet blue book: China mobile Internet development report (2022)[M]. Beijing: Social Science Academic Press, 2022.
- [2] 工信部运行监测协调局. 2022 年通信业统计公报[J]. 通信企业管理, 2023(2): 8-12.  
Bureau of Operation Monitoring and Coordination, Ministry of Industry and Information Technology. 2022 Telecommunications industry statistical report[J]. C-Enterprise Management, 2023(2): 8-12.
- [3] 802.11 Wireless LAN Working Group. IEEE Standard for wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification[S]. 2023.
- [4] LAN/WAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. IEEE standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks-specific requirements part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications amendment 1: enhancements for high-efficiency WLAN: IEEE 802.11ax-2021[S]. 2021.
- [5] BESJEDICA T, FERTALJ K, LIPOVAC V, et al. Evolution of hybrid Li-Fi-Wi-Fi networks: a survey[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2023, 23(9): 4252.
- [6] ALI Q I, ASGHAR S. A systematic review of the IEEE-802.11 standard's enhancements and limitations[J]. Wireless Personal Communications, 2023, 131(4): 2539-2572.

- [7] IEEE draft standard for information technology: telecommunications and information exchange between systems: local and metropolitan area networks: specific requirements: part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: amendment 3: 3650-3700 MHz operation in USA[S]. 2008.
- [8] HU J H, HU F C, JIA J L, et al. 46.4 Gbit/s visible light communication system utilizing a compact tricolor laser transmitter[J]. Optics Express, 2022, 30(3): 4365-4373.
- [9] LIU X, NA Z Y, WANG Y Y, et al. Joint resource allocation for a novel OFDM-based multicolor VLC network[J]. IEEE Networking Letters, 2021, 3(3): 100-104.
- [10] TORRES-ZAPATA E, GUERRA V, RABADAN J, et al. VLC network design for high mobility users in urban tunnels[J]. Sensors, 2021, 22(1): 88.
- [11] BEYSENS J, WANG Q, GALISTEO A, et al. A cell-free networking system with visible light[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2020, 28(2): 461-476.
- [12] HSU L S, TSAI D C, CHOW C W, et al. Using data pre-processing and convolutional neural network (CNN) to mitigate light deficient regions in visible light positioning (VLP) systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(17): 5894-5900.
- [13] PERGOLONI S, BIAGI M, COLONNESE S, et al. Optimized LEDs footprinting for indoor visible light communication networks[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(4): 532-535.
- [14] PURWITA A A, SOLTANI M D, SAFARI M, et al. Handover probability of hybrid Li-Fi/RF-based networks with randomly-oriented devices[C]//Proceedings of 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [15] PARAMITA S, SRIVASTAVA A, BOHARA V A, et al. Demo of hybrid Li-Fi/Wi-Fi network for an indoor environment[C]//Proceedings of 2023 15th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS). Piscataway: IEEE Press, 2023: 213-215.
- [16] ZHOU H Y, ZHANG M L, REN X M. Design and implementation of wireless optical access system for VLC-IoT networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(8): 2369-2380.
- [17] LEE H, LEE J. Convolutional model with a time series feature based on RSSI analysis with the Markov transition field for enhancement of location recognition[J]. Sensors, 2023, 23(7): 3453.
- [18] IOFFE S, SZEGEDY C. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift[C]//Proceedings of the 32nd International Conference on International Conference on Machine Learning. New York: ACM Press, 2015: 448-456.
- [19] HE K M, SUN J. Convolutional neural networks at constrained time cost[C]//Proceedings of 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE Press, 2015: 5353-5360.
- [20] BASTIAENS S, RAES W, STEVENS N, et al. Impact of a photodiode's angular characteristics on RSS-based VLP accuracy[J]. IEEE Access, 2020, 8: 83116-83130.
- [21] BEYSENS J, WANG Q, ABELE M V D, et al. BlendVLC: a cell-free VLC network architecture empowered by beamspot blending[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-10.

## [作者简介]



杨彦兵（1987- ），男，四川绵阳人，博士，四川大学副研究员，主要研究方向为可见光通感一体化、智能感知与通信、嵌入式人工智能。



胡超（2000- ），男，河南鹤壁人，四川大学硕士生，主要研究方向为无线网络、Wi-Fi 感知、可见光通信。



鲁邦彦（2000- ），男，山东济南人，四川大学硕士生，主要研究方向为可见光通信、嵌入式 Linux、无线网络。



张频频（1996- ），女，河南南阳人，四川大学博士生，主要研究方向为可见光通信、相机光通信等。



孙奕髦（1990- ），男，四川德阳人，博士，四川大学特聘副研究员，主要研究方向为物联网、统计信号处理、目标定位、参数估计等。



陈冠宇（1987- ），男，陕西宝鸡人，深圳华创芯光科技有限公司总经理，主要研究方向为可见光通信与光计算专业产业化、载波通信等。