

## 可见光通信的传感器节点在线调试交互研究\*

李成林<sup>1</sup>, 祝云凯<sup>2</sup>, 邱杰凡<sup>1</sup>, 郑攀<sup>1</sup>, 池凯凯<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

<sup>2</sup>(浙江杭佳科技发展有限公司, 浙江 杭州 310015)

通讯作者: 祝云凯, E-mail: yunkai.hz@ytone.com.cn



**摘要:** 无线传感器网络节点可能会被部署到开发维护人员难以接触的环境中.一旦节点出现故障,需要通过无线网络实施对故障节点的调试修复.然而,一些无线通信故障会导致节点从网络中失联,这时依赖于无线网络的传统调试修复交互手段可能失效.此外,由于传感器网络节点的硬件结构简单,一般也很难提供额外的调试手段.为此,通过挖掘现有传感器节点与光学相机上多种可见光相关模块的潜能,在不修改硬件的前提下,设计并实现了基于可见光通信的混合双工调试交互系统.针对调试交互系统下行链路中,环境光照度传感器感光延时导致数据传输率过低的问题,提出一种基于压缩表达的双头脉冲间隔调制 CDH-PIM.针对调试系统上行链路中,感知节点通过光源发送数据无法与光学相机形成图像帧同步的问题,提出一种面向卷帘快门的反馈式帧同步机制.实验结果表明 CDH-PIM 相较于 DH-PIM 吞吐量提升 11.09%,能耗降低 8.70%.上行链路帧同步方案可在 30fps 条件下达到 600b/s 的数据传输率.

**关键词:** 传感器节点;在线调试;可见光通信;调制;卷帘快门;帧同步

中文引用格式: 李成林,祝云凯,邱杰凡,郑攀,池凯凯.可见光通信的传感器节点在线调试交互研究.软件学报,2019,30(Suppl.(11)):51-61. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19006.htm>

英文引用格式: Li CL, Zhu YK, Qiu JF, Zheng P, Chi KK. Research on Online Debugging Interaction Based on Visible Light Communication for Wireless Sensor Nodes. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2019,30(Suppl.(11)):51-61 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19006.htm>

### Research on Online Debugging Interaction Based on Visible Light Communication for Wireless Sensor Nodes

LI Cheng-Lin<sup>1</sup>, ZHU Yun-Kai<sup>2</sup>, QIU Jie-Fan<sup>1</sup>, ZHENG Pan<sup>1</sup>, CHI Kai-Kai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

<sup>2</sup>(Zhejiang Hangjia Technology Development Co. Ltd, Hangzhou 310015, China)

**Abstract:** Wireless sensor network nodes are deployed in the places that are difficult to reach and maintain. Once a failure of sensor nodes occurs, debugging interaction depends on the network infrastructure. However, some wireless communication malfunctions very lead to sensor nodes lost from the network. Traditional debugging interactions based on the networks become invalid. In addition, due to the low-cost hardware structure of the sensor node, it is hard to provide additional interactions. To this end, this paper mines the potentialities of visible light sensor and light emitting unit and realizes a mixed-duplex debugging interaction system (DIS) based on visible light communication. Moreover, for the downlink of DIS, the sensing delay of ambient light sensor decreases the data transmitting rate. A compressed dual-header pulse interval modulation to the increase data transmitting rate is presented. And also, for the uplink of DIS, the light emitting unit of sensor node cannot match the image frame of camera generation, so a frame synchronization applied in camera rolling shutter mechanism is presented. The experiment results illustrates that the throughput of CDH-PIM is 11.09% higher than that of DH-PIM, and the energy consumption is reduced by 8.70%. The uplink frame synchronization scheme can achieve a data transfer rate of 600 b/s at 30 fps.

\* 基金项目: 浙江省科技厅重大科技专项计划基金(2015C01033)

Foundation Items: The Major Science and Technology Special Project of Zhejiang Science and Technology Department (2015C01033)

收稿时间: 2019-09-15; 采用时间: 2019-10-24

**Key words:** sensor nodes; online debugging; visible light communication; modulation; rolling shutter; frame synchronization

无线传感器网络是由分散自组织的传感器节点组成.一旦部署完成,开发人员对节点的修复工作难度较大,尤其是当节点被部署到一些常人无法接触的地方(如博物馆展柜中),对故障节点的调试修复通常依赖于已构建的无线网络.然而,传感器节点发生故障多数与无线通信不稳定有关.一旦关键路径上的传感器节点暂时或永久失联,如果无法对其修复,可能影响网络系统的性能,甚至导致整个系统完全瘫痪.以我们在故宫博物馆部署的无线传感器网络监测系统为例,玻璃展柜中的节点需要封闭至少3个月才能回收维护<sup>[1]</sup>.

一旦在封闭期间节点发生故障,需要通过无线网络对故障节点执行在线调试.然而,如果节点发生的故障导致其从网络中失联,由于节点硬件资源受限,很难找到其他替代手段完成交互调试.这意味着在布展期间,故障节点既无法正常工作,也无法被修复.在实际应用中,开发人员被迫放弃失联节点,转而采用任务切换的方法,将失联节点所执行的任务迁移至热备节点<sup>[2-4]</sup>.这种方法存在的问题是开发者很难确定当前的节点是否能够被修复,也很难获得节点失联的具体原因.即使任务迁移成功至新节点,也存在着任务状态无法传递给热备节点的问题.为此,我们希望在尽量不改变现有硬件资源的前提下,寻找可行的调试交互替代手段.

近年来,随着可见光通信技术(visible light communication,简称VLC)的兴起,越来越多的传统传感器设备开始将可见光通信作为替代手段,与传统无线通信形成互补.可见光通信不同于传统无线网络的无线电波(radio wave)采取广播方式传输,一般需要定向传输,具有不易被截取窃听的特性,提高了数据传输的安全性.如果利用可见光通信进行调试信息传输,不仅在无线网络出现故障时可成为替代的调试交互手段,还能减轻网络整体的带宽压力<sup>[5]</sup>.但是,当前的可见光通信需要专门的接入设备,限制了可见光通信在无线传感器网络中的大规模应用.例如,Fan等人将可见光通信应用于门禁系统,为此需要对现有门禁系统进行改进,并增加专门的可见光通信电路.该电路包括了光电二极管、放大器、比较器和专用的MCU<sup>[6]</sup>.为了提高传输速率和解决多信道传输问题,Wang等人设计了基于可见光RGB-LED的双向室内通信系统,该双向通信系统中采用了RGB发光二极管、低通滤波器、电子放大器、光电二极管来提高系统性能<sup>[7]</sup>.可见光通信技术也容易受到环境光噪声的影响,Adiono等人提出了降低室内环境中的光噪声的解决方案,此方案需要在前端接收器中增加模拟滤波器<sup>[8]</sup>.这些附加设备或硬件优化,需要在硬件层面修改传感器节点设备,并且会增加设备的硬件成本.

进而随着硬件资源丰富的移动终端(如智能手机、平板电脑等)普及,其光学相机模块具备感知可见光的能力,以及用于拍照的闪光灯可以作为可见光的光源,使得移动设备具备了潜在进行可见光通信的能力.为此,我们通过挖掘移动终端和传感器节点现有可见光模块的潜能,实现了混合双工调试交互系统.我们将移动终端视为可见光网关(VLC-based gateway),系统上下行链路采用不同的可见光传感器和发光模块收发数据:在上行链路中,采用移动设备端的光学相机作为信号接收器,节点端的LED作为信号发送器;在下行链路中,采用移动设备上的闪光灯作为信号发射器,节点上的环境光照度传感器作为信号接收器.

在该系统中,由于下行链路传输的主要数据是用于修复更新的代码,数据量较大.而节点光照度传感器感光延时较大,导致数据单位传输时间过长,整体代码数据的传输速率较低.为此,我们提出一种基于压缩表达的双头脉冲间隔调制(compressed dual-header pulse interval modulation,简称CDH-PIM)方法.其核心思想是对代码数据中出现的重复数据,使用特殊的符号进行压缩表达,可以有效提高数据的传输速率.在系统上行链路中主要进行调试信息的传输,我们基于光学相机的卷帘快门工作机制可以有效提高数据传输效率,然而由于可见光具有较高的指向性,轻微的晃动也可能对数据传输造成影响;此外,由于光学相机以图像帧为单位完成拍摄,而节点LED发送一帧数据所用时长需要与光学相机的图像帧曝光时间保持一致才能成功传输调试信息.为此,我们进一步提出一种面向卷帘快门的反馈式帧同步方案.该同步方案由移动设备与节点通信,协同完成信号的同步传输与接收.对采集到的图像做实时检测,当数据发生丢失时,移动设备端发送反馈信息,重传丢失数据并再次同步.以此来保证数据传输质量.

本文的贡献主要包括在以下3个方面:

(1) 针对通信失联的故障传感器节点,提出了一种基于可见光通信的调试交互方法,并基于该方法实现了混合双工调试交互系统,在真实场景下完成对故障节点的调试。

(2) 针对下行链路代码传输率不高的问题,提出了一种基于压缩表达的双头脉冲间隔调制方法,减少了连续数据传输过程中重复数据的冗余传输。

(3) 针对上行链路同步困难的问题,提出了一种面向卷帘快门的反馈式帧同步方案,根据反馈信息,完成光学相机成像帧与节点 LED 发送数据帧的同步。

本文第 1 节给出混合双工调试交互系统概述,第 2 节是帧同步方案的详细设计,第 3 节是压缩调制 CDH-PIM 方法的详细设计,第 4 节为实验评估,第 5 节简要介绍相关工作,最后给出本文的总结和未来工作。

## 1 基于可见光的混合双工调试交互系统

针对无线网络通信故障,我们设计了基于可见光的混合双工通信系统来实现对通信失联节点的调试,如图 1 所示,在该可见光在线调试交互方案中,移动设备充当 VLC 网关,由节点通过移动设备下载代码实现节点更新,并上传调试信息。两条链路采用不同的传感器模块以及通信方式来实现节点调试。下行链路采用移动设备闪光灯作为信号发射器,传感器节点上的环境光照度传感器作为信号接收器采用传统可见光通信(visible light communication)技术来对传感器节点进行更新修复。之后传感器节点将调试信息通过上行链路反馈给移动设备。在上行链路中,节点上的 LED 作为信号发射器,移动设备光学相机作为信号接收器采用光学相机通信(optical camera communication,简称 OCC)技术来采集 LED 频闪信息。

传统意义的可见光通信的接收是利用在接收端的光电检测器(PD)接收信号。同样的,现有的量产型移动设备大多数配备的图像传感器为 CMOS 传感器,CMOS 传感器也具有将光信号接收并转换成电信号的功能,它自身的卷帘快门工作机制能够有效捕获来自 LED 的频闪信息。如图 2 所示,卷帘快门不同于全局快门,它在成像的过程中是以逐行曝光的方式采集光信息。由于不同像素行的开始曝光时间点不同,因此可以利用不同像素行的曝光时间差来记录频闪序列。

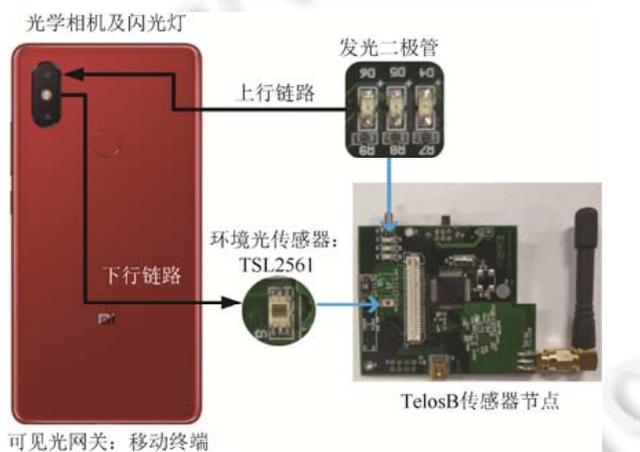


Fig.1 System hardware interaction diagram

图 1 系统硬件交互图

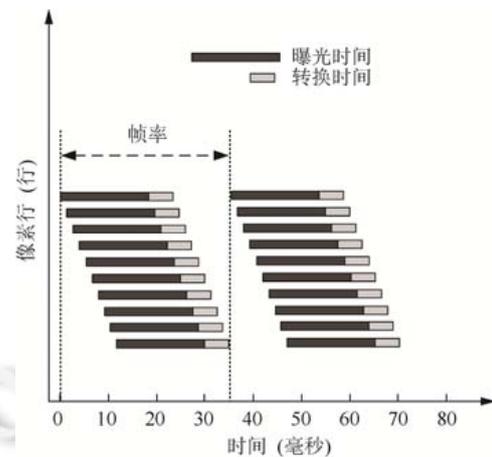


Fig.2 Rolling shutter schematic

图 2 卷帘快门示意图

因此,在卷帘快门逐行曝光的过程中,如果传感器节点上的 LED 快速闪烁切换明暗状态,则最终成像的结果如图 3 所示为明暗相间的条纹图片。

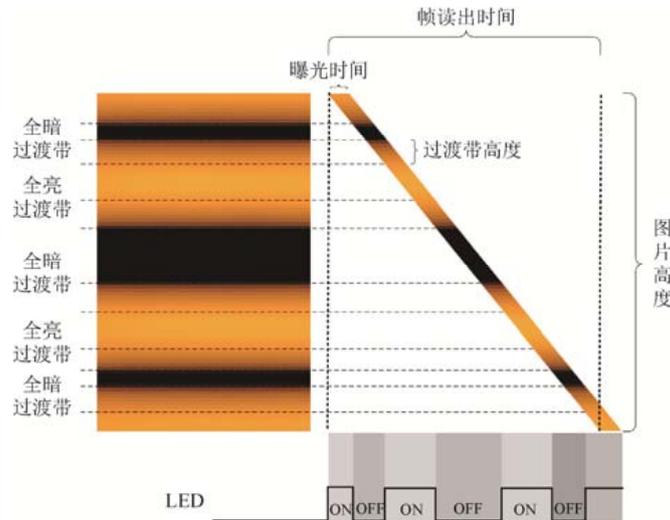


Fig.3 Rolling shutter shutter collection optical information sequence diagram

图3 卷帘快门采集光信息序列示意图

采集到的条纹图片通过图片处理进行解码,由于我们在节点端采用的是OOK调制,根据明暗条纹的宽度即可解码出数据.但是图片中的一些过渡带会影响到解码的判别,过渡带的宽度可由式(1)计算得到:

$$h_{\text{过渡带}} = t_{\text{曝光}} \times \frac{h_{\text{图片}}}{t_{\text{帧读出}}} = \frac{t_{\text{曝光}}}{t_{\text{行读出}}} \quad (1)$$

由图3可知,过渡带越窄对解码判别的影响就越小,根据式(1)可知,要使过渡带变窄,曝光时间应减少,而行读出时间应该增加.但行读出时间是由数模转换器本身决定的,难以修改控制.在当前Android9.0版本中,智能手机相机最新API接口为Camera2.该接口可手动更改或重新配置相机曝光时间.

## 2 上行链路:面向光学相机卷帘快门的反馈式帧同步方案

光学相机通信中,同步一直是最重要的问题之一.首先,光学相机的采样是随机进行的.它可能在发送信号的任何符号期间发生,因此任何时候都有可能丢失任何符号.其次,帧采样的间隔是变化的,它取决于图像传感器和光学通道的特性<sup>[9]</sup>.当光学相机采集节点LED频闪信息时,由于发送端和接收端没有统一的开启时间以及光学相机帧率不稳定,会导致数据符号的丢失.

为此,我们提出了一种面向卷帘快门的帧同步方案.该同步方案由移动设备与节点通信,协同完成信号的同步传输与接收.在通信过程中,由于移动设备端帧率不稳定会导致采集到的图像帧中的数据条纹发生位置偏移,若在一帧图像帧的持续时间内只发送一次数据帧,由于硬件设备的限制,所能控制的时间精度较低,无法保证在有效区域内采集到完整的数据帧.针对这一问题,我们取绿灯作为检测同步状态的指示灯,黄灯和红灯在图像的帧持续时间内各自连续发送两次同一帧数据,保证一张图像中的黄灯和红灯都能成功接收一帧的数据.由于光学相机帧率具有不稳定性,导致一帧图像帧中采集到了相邻的数据帧.因此我们在一帧数据帧发送结束后,让绿灯发送一段低脉冲表示一帧数据帧的结束,若在图像帧中检测到了绿灯中的暗条纹,则说明该图像帧中包含了相邻数据帧的内容,并且同步已经失效.此时需要由移动设备闪光灯发送反馈信息,节点端接收反馈信息后重新同步.该方案包括两个部分:(1) 传输开始阶段的起始同步;(2) 传输中断后的再次同步.

### 2.1 传输开始阶段的起始同步

起始同步的整个过程如图4所示.

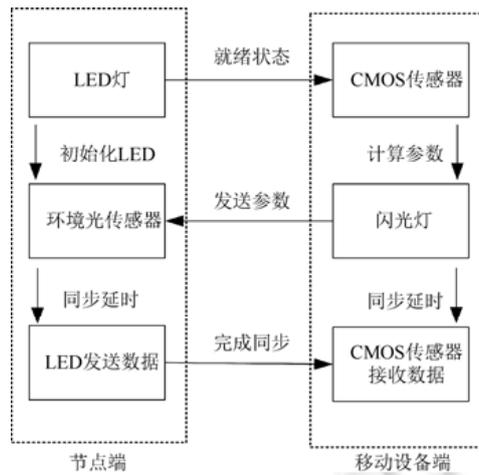


Fig.4 First synchronization diagram

图 4 起始同步示意图

同时,为了区分不同数据帧,我们在每帧数据前面加入一段高频脉冲作为帧头.数据帧结构见表 1.

Table 1 Data frame structure

表 1 数据帧结构

帧头(占 2 位)	数据部分(占 5 位)
高频脉冲	低频 OOK 调制

在起始阶段,我们有很多准备工作要做,当节点处于就绪状态时,3 个 LED 常亮,移动设备进行拍照采集并根据图像处理的结果确定同步参数的值,同步参数如图 5 所示.移动设备根据 LED 灯在图像中的位置计算出有效区域宽度,记作 X.之后移动设备会将该参数编码发送到节点端,节点端根据该参数,可计算出适合于有效区域宽度的 LED 发射频率.在同步延时后,节点 LED 按照计算出的发射频率发送数据,移动设备端通过连拍接收数据实现通信.

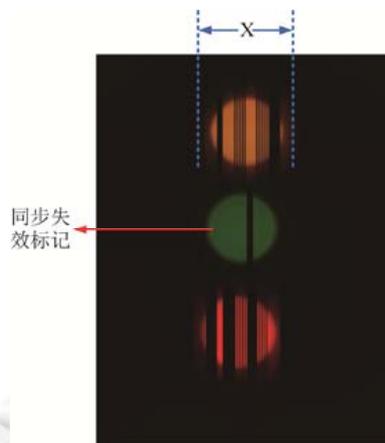


Fig.5 Synchronization parameter diagram

图 5 同步参数示意图

由于移动设备上的光学相机帧率通常在 30fps 左右,移动设备捕获一帧图像时间  $t_p \approx 33ms$ ,节点端单个 LED

需要在图像有效区域范围内完成一帧的数据帧传输,需要保证该指示灯在有效区域内至少能捕获两组数据帧,因此根据帧长和有效区域曝光时间可以确定 LED 灯的发射频率:

$$F_{led} = \frac{column \times 2 \times F_{length}}{X \times 33ms} \quad (2)$$

其中,  $column$  表示图片的像素列数,  $F_{length}$  表示一帧数据的符号数.

## 2.2 传输中断后的再次同步

在起始同步之后,节点 LED 在每帧图像帧持续时间内一直重复发送对应的数据帧.但由于帧率的不稳定,会导致数据条纹在图像帧中发生偏移,当偏移量超过一帧图像帧的持续时间时,同一帧图像帧可能包含相邻的数据帧内容,因此我们采用绿灯作为同步状态的检测灯,每当发送完一帧数据帧时,绿灯会发送一段低脉冲分隔两帧相邻的数据帧,当图像帧中的绿灯检测到了暗条纹,则说明该图像帧中的有效区域采集到的数据包含相邻的数据帧内容,说明同步已经失效,需要重新同步.再次同步的流程图如图 6 所示.

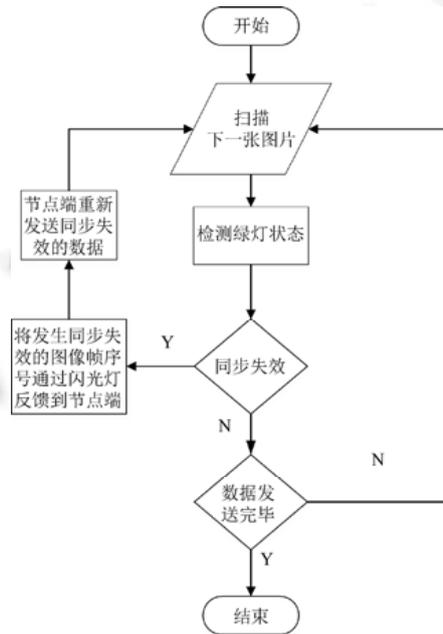


Fig.6 Resynchronization flow diagram

图 6 再次同步流程图

移动设备端将发生同步失效的图像帧序号通过闪光灯反馈到节点端,当节点端接收解码后,从该序号表示的数据帧重新同步发送.

## 3 下行链路:基于环境光照度传感器的压缩调制方法

由于现有节点上已集成的环境光照度传感器模块并不是专门为可见光通信设计的,并且由于节点更新通常由指令操作完成,重复的指令会产生大量重复的编码序列.然而现有的无线电通信调制方法例如 PWM 和 PIM 并没有考虑到采用压缩表达的方式来提高数据传输速率,因此对于可见光通信来说,传统的无线电通信调制方法并非最佳的调制方法.我们之前的工作中借鉴 DH-PIM 调制提出了一种基于压缩表达的双头脉冲间隔调制 CDH-PIM,此调制将数据分组表示,并利用低脉冲表示数据,在比特序列出现重复时,利用标记符号进行压缩表达.相比较于现有的可见光编码调制,CDH-PIM 调制在保证误码率的同时,可以有效提高数据传输速率,并降低传输能耗.

在 CDH-PIM 调制中采用特殊的标记位,标记出被重复序列的位数以及重复次数,如图 7 所示,将数据序列每

4 位分成一组,当数据序列发生重复时,被重复内容为之前的 4 位数据“0100”,并重复了 3 次。之后我们发现,如果重复次数较大或重复位数较大时,会导致标记它们需要花费较长的低脉冲,这会导致接收端无法判断传输是否结束,并降低传输速率。由于数据帧长是固定的,表示“被重复序列的位数”和“重复次数”的两个数值中只会出现在一个较大的情况,因此我们对较大的那个数值进行优化表达,当表述的数字大于 9 时,我们采用“十位-个位”表示法来缩短所需时隙的宽度。如图 8 所示,当被重复对象“0010”重复 12 次时,分隔出两段低脉冲时隙来分别表示十位数字“1”和个位数字“2”。若被重复序列较长,则只需选取某个标记符或分隔符更改其脉冲宽度标记区即可。这样分隔出来的两段低脉冲时隙产生的两位数表示的是被重复序列的位数。

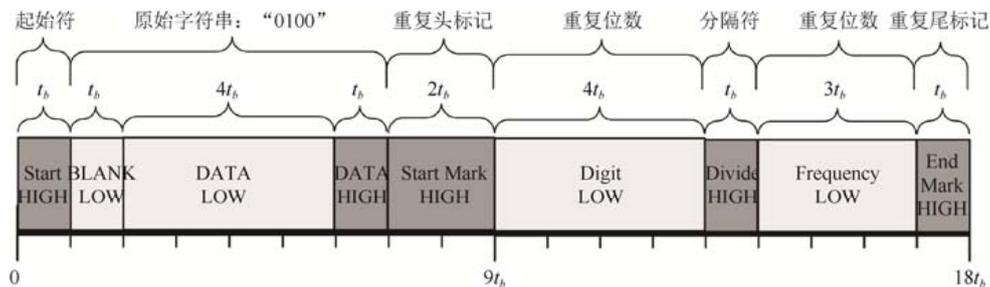


Fig.7 CDH-PIM modulation diagram

图 7 CDH-PIM 调制图

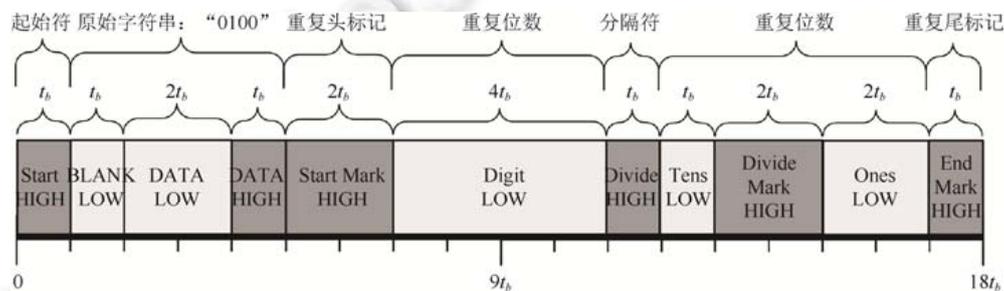


Fig.8 CDH-PIM modulation diagram with more repetitions

图 8 重复次数较多的 CDH-PIM 调制图

## 4 实验

### 4.1 实验场景

基于 Android 操作系统和通用传感器节点,我们设计了相应的混合双工光通信系统。在该系统中,选用的移动设备需要具备闪光灯、光学相机、支持 Camera2 API 等硬件条件。节点具备 RGB 三色 LED 以及环境光照度传感器。为此我们选用了以下设备:小米 Xiaomi MI 8 SE, Android 版本 8.1.0 以及 TelosB 传感器节点进行实验。TelosB 传感器节点配备 2.4GHz Zigbee RF 收发器 CC2420, 16 位 MCU MSP430F1611(10kB RAM 和 48kB 闪存)以及环境光照度传感器 TSL2561。

### 4.2 下行链路:CDH-PIM调制吞吐率与能耗比较

现有的无线电通信调制方法例如 PIM 调制和 PWM 调制都只在一种脉冲状态下存储数据,另外一种脉冲状态通常被用作两个相邻数据之间的间隔标记。在 DH-PIM 调制中,由于引入了分组机制,消除了这些冗余的间隔标记位。由于节点的更新通常由指令操作完成,重复的指令会产生大量重复的编码序列。因此采用 CDH-PIM 调制对节点调试过程中的序列进行压缩传输,可有效提高下行链路吞吐率。在能耗方面,由于 DH-PIM 和 CDH-PIM

去除了冗余的间隔标记且分组中利用更多的低脉冲来表示数据,因此更加满足低功耗的需求.发送一组包含被重复序列位数占 4 位,重复 3 次的重复序列,4 种调制的吞吐率与能耗如图 9 所示.相比较于其他 3 种调制方法,CDH-PIM 具有更高的吞吐率和更低的能耗,并且随着重复内容的增多,效果越发明显.

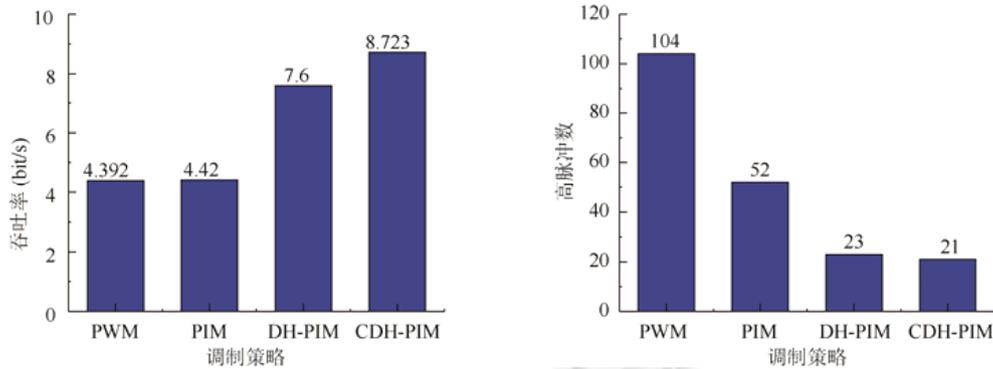


Fig.9 Comparison of throughput and energy consumption of four modulations

图 9 4 种调制的吞吐率和能耗比较

#### 4.3 上行链路:曝光时间与数据帧长对成像的影响

在上行链路中,由光学相机捕获调试信息保存为图像进行解码.然而本身的硬件参数例如曝光时间也会对成像产生影响,实验结果如图 10 所示.当曝光时间为最小曝光时间  $10\mu\text{s}$  时,由于每行曝光时间较短,有效区域周围的过渡带较窄,并且高频帧头便于识别解码.当曝光时间增大到  $100\mu\text{s}$  时,可明显观察到 LED 实际发光区域以外也采集到了光信息,并且过渡带较宽,影响到了高频帧头的识别检测.但另一方面,较大的曝光时间可以增加有效区域的宽度,同时也增加了数据帧的数据容量,因此可根据实际的硬件条件设置合适的曝光时间来达到最佳的通信效果.为了使系统能够避免由设备间距离产生不同的有效区域宽度带来的影响,我们将数据帧结构设计成为 5bit 一帧,避免由距离太远导致有效区域宽度太窄而无法接收过长的数据帧.但在有效区域宽度适中的情况下,可以增加数据帧长度以达到增大吞吐量的目的.如图 10 所示.在相同的通信距离下,增加数据帧长度,会导致 LED 发射速率的加快,在图像帧中,明暗条纹也会变得更窄.

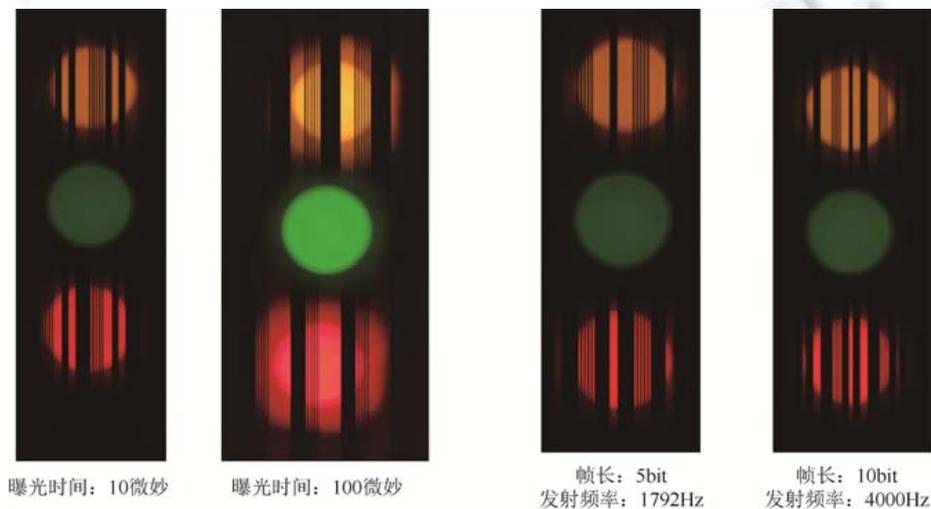


Fig.10 Effects of exposure time and data frame length on sampling

图 10 曝光时间与数据帧长对成像的影响

#### 4.4 上行链路:通信距离对RGB-LED发射频率的影响

在上行链路中,不同的通信距离会导致有效区域宽度发生改变.当光学相机靠近 LED 时,LED 在图像帧中的成像就会变大,因此有效区域宽度也变宽.反之,成像变小,有效区域宽度也变窄.有效区域宽度作为参数由移动设备端发送到节点端,并设置相应的发射频率.经过实验测量,结果如图 11 所示.

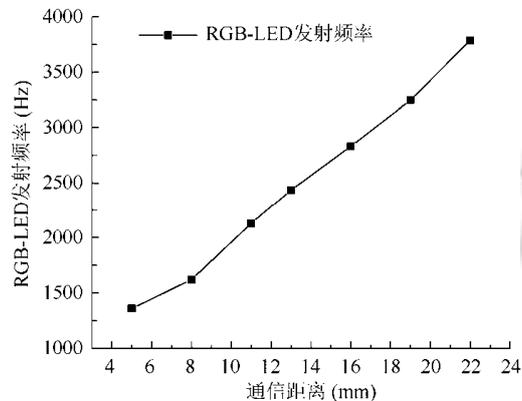


Fig.11 Effects of communication distance on LED emission frequency

图 11 通信距离对 LED 发射频率的影响

LED 发射频率与通信距离成正比,通信距离越大,发射频率也越大,当通信距离超过 22mm 时,由于图像帧中的有效区域变得较小而无法正确接收解码数据.对于较远的通信距离需求,可采用变焦放大的功能解决此问题.

## 5 相关工作

当无线传感器网络中节点出现故障时,依赖无线网络上传故障信息并通过对故障节点上的代码更新,完成故障修复.例如:闫晓晓等人<sup>[10]</sup>在现有 Contiki loader 模块的基础上,搭建通信操作平台并实现了基于 Contiki 的无线传感器网络代码更新.谢显中等人<sup>[11]</sup>针对分布式存储中多节点再生修复的修复带宽和可靠性问题,提出了一种高效的具有健康节点协作的多节点修复方案.在确保修复带宽最低的条件下使修复时间同步,修复过程更简便,最重要的是所需传输信道更少,保证了修复的可靠性.然而,如果节点失联,则无法完成故障修复.

CMOS 传感器也具有将光信号接收并转换成电信号的功能,因此许多研究者开始研究光学相机在可见光通信中的作用.Fuzile 等人<sup>[12]</sup>在移动端实现了三色 LED 的可见光通信系统,但是由于采用的是全局快门且调制解调方法简单,导致数据传输速率较低.张民<sup>[13]</sup>根据 CMOS 传感器卷帘快门的特性,实现了节点到手机的数据传输.这些工作都是基于单向的通信,发送端和接收端之间没有信息交互,缺少信息的反馈,若在节点更新的过程中仅有数据的发送,而没有调试信息的反馈,显然是行不通的,并且采用现有传感器节点发送数据时,节点上的 LED 相对较小,手机端采集到的明暗条纹只占整个图像的一部分区域.因此先前的方法并不适用于我们设计的系统.

Thang 等人<sup>[14]</sup>为了降低数据误码率,数据传输过程中采用二进制频移关键控调制,并加入调制起始符‘SFD’进行数据分隔.然而这些工作仅在编码阶段加入特定的同步码来保证数据的同步传输,当由硬件设备帧率发生变化导致采集到的图像帧发生数据丢失时,无法保证之后的数据传输.

针对光学相机检测设备状态信息的研究,黄战华等人<sup>[15]</sup>基于视频图像对仪器设备指示灯状态进行了监测识别,以图像帧周期为基本时间单位,统计帧间亮度差变化情况作为指示灯闪烁状态的识别依据,并对异常情况进行提示和报警.胡灿林等人<sup>[16]</sup>基于颜色属性的信号指示灯检测识别,将原始图片映射到设计的色彩空间并检测出指示灯位置并识别指示灯开关状态.但先前的工作主要基于光学相机对设备指示灯做检测判断,没有进行

数据的传输通信。

针对上述的研究工作,我们采用现有节点上的已有模块以及 Android 设备的通用传感器模块设计了基于可见光的在线调试交互系统.相关实验表明基于可见光通信的调试交互在量产型移动设备上应用的可行性。

## 6 总 结

本研究将可见光通信应用于现有的移动设备和传感器节点,设计并实现了一个基于可见光的混合双工调试交互系统.在节点通信失联时,采用可见光链路对节点进行非接触式节点更新修复.在上行链路和下行链路中使用不同的传感器模块和光源模块传输信息.针对通用 CMOS 光学相机具有帧率不稳定的特点,我们设计了帧同步方案以确保快速可靠地传输调试数据.针对下行链路代码传输率不高的问题,还提出了一种基于压缩表达的调制方法,减少了连续数据传输过程中重复数据的冗余传输.最后,在智能手机和通用节点上,设计了相应的调试交互实验,验证了本文设计的通信系统在实际环境中的可行性。

在未来的工作中,我们将继续研究基于可见光的在线调试方法,减少节点在线调试时间,并加入适用于可见光通信调制的纠错方案以此提高数据的可靠性.针对一些被部署到人们难以到达的地方的节点,将继续研究通过控制无人机进行代码更新的可行性。

### References:

- [1] Li D, Liu W, Cui L. EasiDesign: An improved ant colony algorithm for sensor deployment in real sensor network system. In: Proc. of the IEEE Globecom. 2010. 1–5.
- [2] Du WZ, Chen HM, Li D, Cui L. Research on a gateway switching mechanism based on gateway's energy-harvesting for wireless sensor networks. Chinese High Technology Letters. 2016,26(6):631–642 (in Chinese with English abstract).
- [3] Shah PA, Awan KM, Rehman Z, et al. A route optimized distributed ip-based mobility management protocol for seamless handoff across wireless mesh networks. Mobile Networks and Applications, 2018,23(4):752–774.
- [4] Liu J, Chung SH. An efficient load balancing scheme for multi-gateways in wireless mesh networks. Journal of Information Processing Systems, 2013,9(3):365–378.
- [5] Shao S, Khreishah A, Rahaim MB, et al. An indoor hybrid WiFi-VLC internet access system. Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, 2014. 569–574.
- [6] Fan L, Liu Q, Jiang C, et al. Visible light communication using the flash light LED of the smart phone as a light source and its application in the access control system. In: Proc. of the IEEE MTT-S Int'l Wireless Symp. 2016. 1–4.
- [7] Das S, Chakraborty A, Chakraborty D, et al. PC to PC data transmission using visible light communication. Computer Communication and Informatics, 2017,1–5.
- [8] Adiono T, Pradana A, Putra RVW, et al. Analog filters design in VLC analog front-end receiver for reducing indoor ambient light noise. In: Proc. of the IEEE Asia Pacific Conf. on Circuits and Systems. 2017. 581–584.
- [9] Le NT, Hossain M, Jang YM. A survey of design and implementation for optical camera communication. Signal Processing: Image Communication, 2017,53:95–109.
- [10] Yan XX, Yang D, Dong P. Research and implementation of remote reprogramming of wireless sensor networks. Computer Technology and Development, 2013,2:19–22 (in Chinese with English abstract).
- [11] Xie XZ, Wang LS, Huang Q, Ma B. Efficient multi-node regenerating program with healthy nodes collaboration in distributed storage systems. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014,37(1):52–56 (in Chinese with English abstract).
- [12] Fuzile TS, Heymann R. Investigating a visible light communication channel with an led transmitter and a smartphone receiver. In: Proc. of the IEEE Africon 2017. 2017. 354–358.
- [13] Zhang M, Luo PF, Feng SL, et al. Camera-Based visible light communications. Science & Technology Review, 2016,34(16): 82–89 (in Chinese with English abstract).
- [14] Thang NV, Le NT, Vu TL, et al. An implementation of binary frequency shift on-off keying modulation for optical camera communication. In: Proc. of the Int'l Conf. on Ubiquitous and Future Networks. 2018. 121–125.
- [15] Huang ZH, Jiang YK, Zhang W, et al. Research on technique of recognition of indicator status by video image. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010,23(4):543–547 (in Chinese with English abstract).

- [16] Hu CL, Xiao SH. Color names based signal indicator detection and recognition. Modern Computer, 2018,7:75-78 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献:

- [2] 杜文振,陈海明,李栋,崔莉.基于能量自采集的无线传感器网络网关切换机制研究.高技术通信,2016,26(6):631-642.  
 [10] 闫晓晓,杨冬,董平.无线传感器网络远程重编程研究与实现.计算机技术与发展,2013,2:19-22.  
 [11] 谢显中,王柳苏,黄倩,马彬.具有健康节点协作的高效多节点修复方案.北京邮电大学学报,2014,37(1):52-56.  
 [13] 张民,罗鹏飞,冯淑兰,Zhang Philipp.基于相机的可见光通信技术.科技导报,2016,34(16):82-89.  
 [15] 黄战华,姜永奎,张旺,张昊.基于视频图像的指示灯状态监测识别技术研究.传感技术学报,2010,23(4):543-547.  
 [16] 胡灿林,肖尚华.基于颜色属性的信号指示灯检测识别.现代计算机,2018,7:75-78.



李成林(1994-),男,云南腾冲人,硕士,CCF 学生会员,主要研究领域为物联网,无线传感器网络.



郑攀(1993-),男,硕士,CCF 学生会员,主要研究领域为物联网,无线传感器网络.



祝云凯(1982-),男,硕士,CCF 专业会员,主要研究领域为物联网.



池凯凯(1980-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 专业会员,主要研究领域为物联网,机器学习.



邱杰凡(1984-),男,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为物联网,嵌入式系统.