

LED 路灯可见光通信模型的研究

邓健志, 孙科壮, 程小辉

(桂林理工大学 广西嵌入式技术与智能系统重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对智慧路灯及车联网的应用需求, 设计了基于可见光发光二极管(LED)路灯的通信模型。首先, 提出 LED 单路稳定和 multi-channel 稳定的照度预均衡方法, 并测试了预均衡接收效果。其次, 根据单侧、双侧对称和双侧非对称等路灯安装方式, 用朗伯特模型构造和仿真了 3 种路灯的空间照度分布数学模型, 分析了道路近地区域的平均照度。最后, 据此设计了可见光信号的车辆接收模型和 LED 路灯到车辆的色分多路复用(CDM)可见光通信模型, 并分析了模型的信号接收波形和该模型的多径效应。

关键词: 可见光通信; 智慧路灯; 车联网; 灯车通信模型

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)05-0053-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.05.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Research on visible light communication model of LED street lamp

DENG Jianzhi, SUN Kezhuang, CHENG Xiaohui

(Guangxi key Laboratory Embedded Technology and Intelligent System, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Aim to the application of smart street lamp and internet of vehicles, a communication model of street lamp based on visible light-emitting diode (LED) is designed. Firstly, the illumination pre-equalization method of LED single channel stability and multi-channel stability is proposed, and the receiving effect is tested. Secondly, according to the installation methods of unilateral, bilateral symmetrical and bilateral asymmetric street lamps, the spatial illumination distribution mathematical models of three kinds of street lamps are constructed and simulated by Lambert model, and the average illumination in the near ground area of the road is analyzed. Finally, the vehicle receiving model of visible light signal and the color division multiplexing (CDM) visible light communication model from LED street lamp to vehicle are designed, and the signal receiving waveform of the model and the multipath effect of the model are analyzed.

Key words: visible light communication; smart street lamp; internet of vehicles; light to vehicle communication model

0 引言

路灯是一种必备的市政照明设施。在智慧城市的发展趋势下, 智慧路灯成了当下研究的一个热点方向。智慧路灯主要提供了照明、通信和环境监测等多重功能。此外, 智慧路灯对车联网的“车路通信”的应用也有重要的研究意义。当前, 包括智慧路灯在内的车联

收稿日期: 2020-03-10。

基金项目: 广西科技研究项目(1598007-16)资助; 国家自然科学基金(61262075)资助。

作者简介: 邓健志(1982—), 男, 硕士生导师, 高级实验师, 主要从事可见光通信、嵌入式技术和物联网等方面的研究。主持和参与完成国家级、省部级项目 5 项, 获得授权发明专利 20 多项, 获得省部级科学技术奖励 2 项。



网“车路通信”模式主要依靠 WiFi、4G 和 5G 等射频技术在车辆与灯具、标识牌等道路固定设施之间建立通信。

如今, 发光二极管(LED)节能灯具已广泛使用在路灯中, 如果采用 LED 路灯本身实现通信, 将有效地实现了智慧路灯的照明和通信两大功能。本文研究白光 LED 的光谱特性, 并基于此构建一个兼顾照明的可见光照度预均衡通信系统模型, 对构造的通信模型进行测试和分析。

1 可见光照度预均衡方法

1.1 照度预均衡分析

兼顾照明是可见光通信系统有别于激光、红外以及无线电通信系统最大的特点之一。由于人眼对于闪

烁频率较低的照明灯光(低于 50 Hz)有强烈的不适感且在不同颜色的光照下看到同一个物体的颜色也不一样。为保证稳定的照明效果,要求可见光通信系统在发送可见光信号时,保持照度与色彩的相对稳定,并尽可能降低人眼可感知的频闪。因此,在可见光信号发送时,通信系统需要对可见光信号的照度进行预均衡处理^[1,2]。对于发送单路白光信号的可见光通信系统而言,只需在发射端进行照度的预均衡处理,让一组 LED 发射的可见光信号照度尽可能保持稳定,即有:

$$E(x_1)=E(x_2)=\cdots=E(x_i)=\cdots=E(x_n) \quad (1)$$

其中, $x_1, x_2, \cdots, x_i, \cdots, x_n$ 为可见光通信数字信道上所有可能发送的信号, $E(x_1), E(x_2), \cdots, E(x_i), \cdots, E(x_n)$ 为这些信号所对应的平均照度值。同时,可见光信号发射端的 LED, 无论是否有信号发送, 平均照度也应该保持一致, 有 $E(x_i)=E_0$ 。其中, E_0 为信道上无信号时的平均照度。

1.2 照度预均衡设计与测试

为保证信道上无信号时的平均照度 E_0 稳定(包括单路稳定和 mult 路叠加稳定两部分), 可见光信号发送电路通过将载波信号、基带信号接入开关电路, 并由开关电路控制驱动 LED 实现可见光信号的照度预均衡。保持单路 LED 的照度稳定采用的方法有: 无信号发送时, 用载波信号持续驱动 LED; 有信号发送时, 通过开关电路将基带信号加在载波上, 形成调制信号, 并用调制信号驱动 LED。

为了保证相邻 2 路 LED 提供的总体照度稳定, 则需要考虑 2 路信号的叠加问题。同相同频的可见光信号叠加不但会增强信号, 还会提高可见光的平均照度; 而反向同频的可见光信号叠加会削弱信号, 但照度则会保持相对稳定。

将 2 路频率、电压和电流一致但相位相差 180° 的 2 组方波分别加载在 2 个参数型号相同的 LED 两端; 用 2 组光电二极管(PD)分别接收光信号的方波, 测试信号如图 1 所示。其中, CH1、CH2 为 2 路 LED 的驱动信号, CH3、CH4 为 2 路 PD 的接收信号。当 2 路 PD 分别正对着一组 LED 时, PD 的输出信号频率、相位与其正对的 LED 一致, 而 2 路方法之间有 180° 的相位差, 信号无叠加, 信号之间的相互影响不大, 如图 1(a) 所示。当一路 PD 正对 LED 接收(CH3), 另一路置于 2 路 LED 中间, 且正对 2 路 LED 连线时, PD 同时接收到来自 CH1 和 CH2 的 2 路频率相同、相位相反的信号, 在 2 路信号接收叠加的情况下, PD 的输出信号保持不变

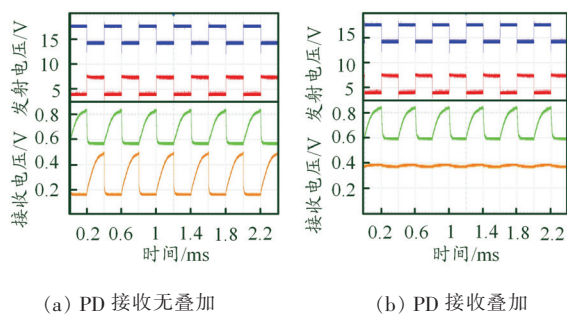


图 1 2 路照度预均衡(从上至下依次为 CH1、CH2、CH3 和 CH4)

(CH4), 如图 1(b) 所示。可以看出, 2 组仅相位不同的 LED 输出信号在 PD 的接收端可以叠加为一路照度相位稳定的光信号。

2 LED 路灯到车辆的可见光通信模型

2.1 LED 路灯的安装与照度分析

为了便于路灯的集中管理, 一些路灯已实现了联网控制, 有些路灯甚至还集成了环境监测、视频监控、信息交互、网络覆盖和定位等多方面的功能, 路灯正逐步朝着智能化方向发展。

LED 路灯与车辆的可见光通信主要是 LED 路灯到车辆的单向下行通信。将路况、位置及各类通信信息等调制在 LED 灯上, 为途经 LED 路灯的车辆提供相关的信息^[3]。

根据道路的宽度、线路走线和道路照明的亮度要求, 常见的路灯布局有 3 种: ①单侧路灯照明。路灯以一个固定的间距安置在道路的一侧。②双侧对称路灯照明。路灯对称安装在道路两侧, 每隔一段距离, 左右各安装一组路灯。③双侧非对称路灯照明。路灯在道路两侧, 每隔一段距离, 左右交错各安装一组路灯。路灯的高度和间距标准在于保证路面的照明效果, 按照道路照明设置标准及 LED 路灯安装的标准(如表 1 所示), 路灯的间距设置通常由路灯的照明功率、灯杆的高度和道路的宽度等多个方面因素共同决定^[4]。

LED 路灯通常是由 1 W、3 W 和 5 W 的一组 LED 组成的 $N \times M$ 矩阵阵列。在 LED 路灯照明模型中, 由于行驶在路面的车辆与 LED 路灯的距离较远, 可将 LED 阵列路灯视为单个发光源。根据 Toshihiko Komine 等人提出的方法^[5], 按以上的单侧、双侧对称和双侧非对称 3 种路灯的布局方式, 本文仿真分析 LED 路灯的照度分布。LED 路灯照明的仿真模型可参考经典的 LED 照明模型^[6,7]。

2.2 LED 路灯照明模型

参照朗伯特发光模型^[8], 本研究的 LED 阵列路灯

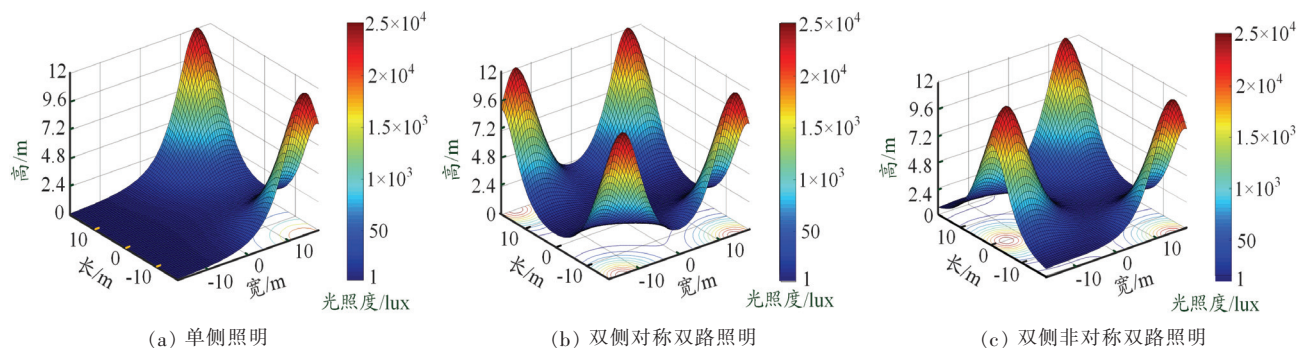


图2 LED路灯照明的三维空间照度分布仿真图

的发光功率空间分布模型为:

$$\begin{cases} I(\theta) = I_0 \cos^m(\theta) = (m+1) \varphi / 2\pi \\ m = -\frac{1}{\log_2 \cos(\Phi/2)} \\ E = \sum_{i=1}^N I(\theta) / L_i^2 = \sum_{i=1}^N I_0 \cos^m(\theta) / L_i^2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, φ 为LED的光通量, Φ 为LED到PD的发射光线与LED发射端法线之间的夹角, E 为光照强度, L_i 为被测点(被照点)与发光源的距离, θ 为LED发射光线到达接收端的光线与PD法线之间夹角, $I(\theta)$ 为LED在 θ 上的发光强度, m 为朗伯特系数。在LED的发射端与PD的接收端朗伯特发光几何模型中, 图2为3种LED路灯布局下的三维空间照度分布图。其中, 路宽为28 m, 灯具高度为12 m, 灯杆间距为30 m。

由于车辆在道路上平行道路的边沿行驶, 即车辆的行驶方向与道路同侧的2个LED路灯连线平行。为了便于车辆对LED路灯可见光信号的接收, 在车辆的2根A柱、2根C柱上各安装一组PD。调整车辆上PD的安装角度和位置, 使其的光接收角度仅能接收来自同侧LED路灯发出的可见光通信信号。同时, 每组PD都能够分别接收不同光谱波段的可见光信号。

根据文献[4]可知, 3种LED路灯的安装均与路面呈 $10^\circ \sim 15^\circ$ 的夹角。因此, 车辆上PD的安装平面的角度也尽可能与LED路灯的照射面平行, 且车前方的PD偏向前方, 后方的PD偏向后方。由于PD的接收角度通常为 $30^\circ \sim 120^\circ$, 能一定程度减少相邻2个LED路灯基地站的相互影响。

本文研究测试了一组市政道路的路灯的照度数据, 如表1所示。主要测试参数为: 道路宽度约14 m, 灯具高度约6 m, 灯杆间距约20 m, 灯具颜色为暖白光, 路灯设置为单侧照明。由于普通汽车的车身高度通常在1.2~1.8 m间, 因此选择的PD高度距离地面高度约1.2 m。在路灯由近及远的4种情况: 路灯正下方、路中间(约7 m)、路对面(约14 m)和路对面两灯之

间。本文对每种情况任意选择7组测试点进行照度测试, 测得4种情况的照度平均值分别为57.04 lux、33.64 lux、15.44 lux和4.44 lux。

从表1可知, 在接近汽车车身高度1.2 m位置的水平面上, 照度值在3.47~62.8 lux的范围内, 结合PD的安装方式、汽车的行驶方向等因素可知, 车辆在此照度值下可以正常地接收可见光信号。

2.3 LED路灯基站分布设计

在LED路灯到车辆的可见光通信通信模型中, LED路灯是用作可见光通信的发送基站, 为途经的车辆发送消息。该模型是一个利用LED路灯到车辆下行信道构造的单向通信模型。

从图2中3种不同LED路灯安装的灯光照明的空间照度分布、表1的灯光照度测试数据和道路照明设置标准及LED路灯安装的标准[4]照度要求均可知: 相邻的LED路灯道路照明一定会有重叠的区域, 使得光照能够覆盖整个路面。照明的重叠会带来可见光通信信号的重叠, 即可见光通信信号的多径效应, 信号的正向叠加有利于接收, 反向叠加则会削弱信号, 不利于接收。

2×1路可见光信号传输路径如图3(a)所示。当仅考虑2个LED与PD三者在同一个平面上的多径效应, 可得到:

表1 暖白光LED路灯照度测试数据表(离地高度1.2 m)

序号	照度值/lux			
	灯正下方	路中间	路对面	路对面的两灯之间
1	62.8	36.53	18.16	—
2	56.37	35.11	15.05	4.46
3	47.14	23.27	10.52	—
4	57.1	35.61	15.19	3.47
5	51.45	30.22	14.66	—
6	61.88	35.79	17.65	5.38
7	62.52	38.86	16.82	—

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{h^2 + l_1^2} = \sqrt{(x_1 - u_1)^2 + (y_1 - v_1)^2} \\ d_2 = \sqrt{h^2 + l_2^2} = \sqrt{(x_2 - u_1)^2 + (y_2 - v_1)^2} \\ h = |y_1 - v_1| = |y_2 - v_1| \end{cases} \quad (3)$$

其中, h 为 LED₁ 和 LED₂ 所在直线距离 PD 的距离, d_1 、 d_2 分别为 LED₁、LED₂ 与 PD 的直线距离, (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 和 (u_1, v_1) 分别为 LED₁、LED₂ 和 PD 所在的直角坐标系的坐标, l_1 、 l_2 分别为 PD 到 LED₁ 和 LED₂ 所在直线的投影距离。当 LED₁、LED₂ 同时发出一组频率、相位都相同的光信号时, $\Delta t_{12} = |d_1 - d_2|/c$ 为 LED₁、LED₂ 发出的光信号到达 PD 的时间差, c 为光在空气中传输速度。当 $\Delta t_{12} \neq 0$ 时, PD 所接收到的光信号存在 Δt_{12} 的时间差, 使得 PD 所接收到的光信号存在相位差, 导致多径效应的产生。只有当 $\Delta t_{12} = 0$ 时, 多径效应得以消除。

若 LED _{i} 发射的光信号为 $s_i(t) = A \cos(\omega_i t + \varphi_i)$ 、PD 接收到 LED _{i} 的光信号为 $r_i(t) = A'_i \cos(\omega_i t + \varphi'_i)$, ω_i 为 LED _{i} 光信号的载波频率, φ_i 为 LED _{i} 光信号载波的初相位。 A'_i 为 PD 接收到 LED _{i} 的光强度 V_{pp} 峰峰值, φ'_i 为光信号相对于 $s_i(t)$ 的相位。 $r_{ij}(t) = A_0 + A'_i \cos(\omega_i t + \varphi'_i) + A'_j \cos(\omega_j t + \varphi'_j)$ 为 PD 接收到 LED _{i} 与 LED _{j} 的叠加光信号, 其中 A_0 为环境光强度, $r_{ij}(t)$ 的幅值为环境光强度 A_0 与 A'_i 、 A'_j 的叠加。

当 LED _{i} 与 LED _{j} 2 路信号的初始相位 ω_i 、 ω_j 一致时, 则信号频率 ω_i 、 ω_j 也一致。当 PD 接收到 LED _{i} 与 LED _{j} 的叠加光信号接收相位差为 0 时, 有最大峰峰值 $V_{ppmaxij} = A'_i + A'_j$; 当 PD 接收到 LED _{i} 与 LED _{j} 的叠加光信号接收相位差为 180° 时, 最小的峰峰值 $V_{ppminij} = 0$ 。

根据上述 3 种 LED 路灯安装方式, 以及图 3 的 PD 安装方式, 当一个 PD 处于如图 3(b) 所示的 2×2 的 4 个 LED 中的区域, 同时接收到来自前、后、左、右的 4 个 LED 路灯的可见光信号, 即如图 3(b) 中 PD 接收到来自 LED₁、LED₂、LED₃ 和 LED₄ 的可见光信号, 则会产生 3 组传输延迟 Δt_{12} 、 Δt_{13} 和 Δt_{14} 。在图 3(b) 中, PD 与 4 个 LED 之间的距离分别为:

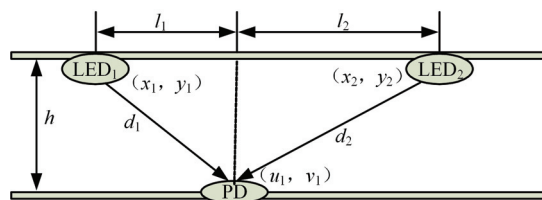
$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x_1 - u_1)^2 + (y_1 - v_1)^2 + (z_1 - w_1)^2} \\ d_2 = \sqrt{(x_2 - u_1)^2 + (y_2 - v_1)^2 + (z_2 - w_1)^2} \\ d_3 = \sqrt{(x_3 - u_1)^2 + (y_3 - v_1)^2 + (z_3 - w_1)^2} \\ d_4 = \sqrt{(x_4 - u_1)^2 + (y_4 - v_1)^2 + (z_4 - w_1)^2} \end{cases} \quad (4)$$

每 2 路光信号 LED₁ 与 LED₂、LED₁ 与 LED₃ 和 LED₁ 与 LED₄ 分别对应的传输延迟 Δt_{12} 、 Δt_{13} 和 Δt_{14} 为:

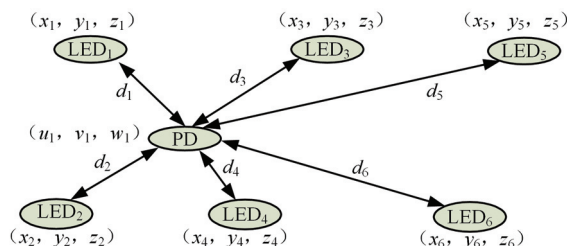
$$\begin{cases} \Delta t_{12} = |d_1 - d_2|/c \\ \Delta t_{13} = |d_1 - d_3|/c \\ \Delta t_{14} = |d_1 - d_4|/c \end{cases} \quad (5)$$

其中, LED₁ 与 LED₂、LED₁ 与 LED₃ 和 LED₁ 与 LED₄ 的距离和信号传输延迟均可由道路宽度、灯具高度以及灯杆间距等计算得到, 结合文献[4]和图 3 可推算得知, Δt_{12} 、 Δt_{13} 和 Δt_{14} 均小于 1.0×10^{-7} s。

2×3 路可见光信号传输路径如图 3(b) 所示。根据 LED 路灯安装布局, 当一个 PD 处于中间一组 LED₃ 与 LED₄ 的垂直连线上, 且同时处在 6 组 LED 的光照区域, 由于此时 PD 与 LED₂、LED₆ 的距离一致 ($d_2 = d_6$), $\Delta t_{26} = 0$, 且由于 LED₆ 距离 PD 较远, 结合实地测量可知光照强度极弱, 两 LED 对 PD 的影响可不予考虑。



(a) 2×1 路可见光信号传输路径



(b) 2×3 路可见光信号传输路径

图 3 可见光信号传输路径

同时, 为了避免车辆速率不断提高带来的影响, LED 路灯基站布局时, 可以采用色分多路复用(CDM)方式, 即在相邻的 LED 路灯之间, 分别将通信信号加载在不同波长的可见光信号上, 而在车辆上安装接收相应波长的 PD。

3 CDM 可见光通信模型

根据单侧路灯以及双侧路灯 2 种不同的安装方式, 本文采用 CDM 方式搭建了一个 2×1 路和一个 2×2 路的 LED 路灯 CDM 收发测试模型。

① 2×1 路单侧 LED 路灯基站模型。在单侧 LED 路灯安装方式构建的 2×1 路 LED 的测试模型中, 2 组 LED 发射的可见光信号为光波长范围不相交、信号频率一致和相位相差 180° 的 2 路对称方波信号, 此时

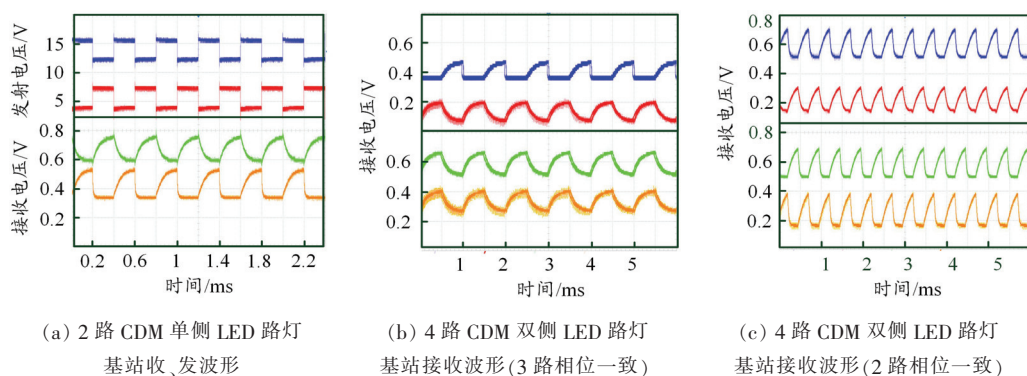


图4 CDM LED路灯基站测试波形图

PD接收到的信号也是2路相位相差 180° 的方波信号,如图4(a)所示。

② 2×2 路双侧LED路灯基站模型。在双侧LED路灯安装方式构建的 2×2 路的4组LED路灯测试模型中,通过4组LED发射2组不同的可见光方波信号,光波长范围不相交、信号频率一致,信号的组合形式分别为:◆4路发射信号中3路信号的相位一致,另外1路的相位与之相差 180° ,此时PD接收到的波形如图4(b)所示;◆4路发射信号中2路信号的相位一致,另外2路信号与前2路的相位相差 180° ,此时PD接收到的波形如图4(c)所示。

此外,图4(a)测试的LED发射端,在2路LED和PD上分别加入了红、蓝两色的带通滤镜。在图4(b)、图4(c)测试的LED发射端,4路LED和PD上分别加入了4组通带为10 nm波长的窄带滤镜,滤镜中心波长分别为450 nm、500 nm、550 nm和600 nm。

从图4的几个测试波形可发现,各路PD接收的可见光信号彼此并无干扰。结合上述实验和PD的安装方式设计可知,相邻的LED路灯基站采用不同波段的可见光作为可见光通信通信的传输介质,如同在相邻的通信基站之间采用不同频段的电磁波来收发信号,能够一定程度上减少接收端接收到来自不同发射端、不同路径的信号干扰。

4 系统多径效应的分析和解决

多径效应的存在往往会给通信系统带来不良的影响,而对于本设计的LED路灯可见光通信模型而言,其可见光信号下行信号的传输路径主要是发射端到接收端的直线传输,在该传输过程中不存在影响接收的固定镜面反射源,因此车辆的PD可见光信号接收端不会受到此类反射信号的干扰。同时,为了避免相邻的LED路灯之间的可见光信号相互干扰,在相邻的LED路灯上采用了不同光谱的可见光发送同一组通信信

号,例如图3(b)中的LED₁、LED₂和LED₃分别采用了3种不同基色的可见光携带信号;车辆的同一组PD(如图3)在能够保证接收端照度值在5~100 lux的可接收范围前提下,通过采用照度预均衡信道编码^[9]和带通滤镜,接收端运用CDM的原理方法将信号分离,排除不同光谱波段信号的相互影响;距离较远LED路灯的照度衰减大,也不会影响信号接收。此外,根据式(5)和文献[4]报道,当信号的传输速度小于10 Mb/s时,车辆的道路行驶(车速小于100 km/h)不会影响信号的同步和接收。

5 结束语

本文设计了LED路灯可见光通信模型,通过对车辆PD的安装方式和相邻通信基站的CDM设计,结合前期研究成果,给出了一个可供借鉴的可见光通信在车联网和智慧路灯等场景下的深入研究和应用推广思路。

参考文献:

- [1] 邓健志, 邓卓洪. 一种照度均衡的RS232与VLC通信协议转换方法: 中国, 201510534005.7[P]. 2017-12-12.
- [2] DENG J Z, YAO M, CHENG X H, et al. A real-time VLC to UART protocol conversion system[J]. Optoelectronics Letters, 2016, 12 (4): 299-303.
- [3] 甘劲宇, 邓健志, 程小辉. 可见光通信智能语音教室演示模型[J]. 光通信技术, 2017, 41(9): 31-33.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市道路照明设计标准: CJJ45-2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [5] TANAKA Y, KOMINE T, HARUYAMA S, et al. Indoor visible light communication utilizing plural white LEDs as lighting [C]// The 12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, September 30-October 1, 2001, San Diego, USA. New York: IEEE, 2001: 81-85.
- [6] 王加安. 室内可见光通讯系统LED阵列光场分布关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [7] 赵黎, 彭恺, 焦晓露. 室内VLC系统光源布局设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 46 (11): 250-255.
- [8] 丁德强, 柯熙政. 一种通用白光LED数学发光模型研究 [J]. 光学学报, 2010(9): 2536-2540.
- [9] 邓健志, 程小辉. 可见光照度预均衡通信信道编码方法: 中国, 20151098820.0[P]. 2018-04-10.