

White LED Modulation Bandwidth and Modulation Characteristics of the Study

Jie Cao, Zhongcheng Liang, Zhengbei Ma

Department of Opt-Electronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing
Email: Caojielh123@126.com

Received: Dec. 15th, 2011; revised: Dec. 26th, 2011; accepted: Jan. 13th, 2012

Abstract: This paper conducts a profound research on modulation features of commercial high-power white LED, the light source of Visible Light Communication (VLC). Through the white LED light commercial lighting principles and the analysis of the characteristics of white LED, Come visible light communication system the best choice for the type of experiment. Analysis of the modulation characteristics of white LED, LED modulation bandwidth characteristics for a VLC system is designed as an experimental platform. Measure and compare a variety of types of commercial high-power LED modulation performance of experimental data and conclusions drawn. Through the analysis of experimental data to conclude that the current commercial white LED lighting modulation characteristics. It provides theoretical guidance for visible light communication system to choose the light sources in the future.

Keywords: White LED; VLC; Modulation Characteristics; Modulation Bandwidth

白光 LED 调制特性及调制带宽的研究

曹捷, 梁忠诚, 马正北

南京邮电大学光电工程学院, 南京
Email: Caojielh123@126.com

收稿日期: 2011年12月15日; 修回日期: 2011年12月26日; 录用日期: 2012年1月13日

摘要: 本文对可见光通信(VLC)系统的光源——商用大功率照明白光 LED 的调制特性进行了研究。通过对白光 LED 发光原理和商用照明白光 LED 的特性的分析进而得出可见光通信系统光源实验的最佳选择类型。分析了白光 LED 的调制特性, 针对 LED 调制带宽特性专门设计了一个 VLC 系统作为实验平台, 测量并比较了多种型号的商用大功率 LED 的调制性能得出实验数据和结论。通过对实验数据进行分析从而总结出目前商用照明白光 LED 的调制特性, 为今后可见光通信系统的光源选择提供理论指导。

关键词: 白光 LED; VLC; 调制特性; 调制带宽

1. 引言

近年来, LED 设备广泛使用于人们生活的各个方面。室内可见光无线通信技术是随着白光 LED 照明技术的发展而兴起的无线光通信技术^[1]。由于白光 LED 拥有节能, 寿命长, 可靠性高等优点, 而且响应时间极短, 可以在兼顾照明的同时组成室内可见光无线通信系统。

可见光通信的信号光源可以为单色光和白光 LED。通过以人眼无法感测的速度调制信号光源来传送数据, 因而允许采用现有的照明基础设施, 只需稍作改动即可(比如用 LED 来替换白炽灯光源)。白光 LED 的响应频率直接决定了可见光通信系统可用的带宽^[2]。所以在追求大功率输出的同时, 如何提高白光 LED 的频率响应、拓展其带宽是实现高速可见光

通信必须要解决的难题之一。

2. 可见光通信系统光源选择依据

目前的发光二极管一般只有红、绿、蓝三种,不存在直接发射白光的 LED,要得到白光 LED,必须将红、绿、蓝三原色 LED 芯片或三原色 LED 管混合实现白光。三芯片型发光材料主要有 GaAsP、AlGaAs、GaP:ZnO 等,发红光;ALGaInP/GaAs、ALGaInP/GaP 等,发红光和橙光;GaP:N 发绿光;InGaN 发蓝光。红、绿、蓝 LED 封装在一个包内,光效可达 20 lm/W,发光效率较高,显色性好。三原色 LED 混合,通过红、绿、蓝三原色光可以控制色彩。但三芯片三原色混合成本较高,并且有红、绿、蓝 LED 芯片光衰减不同而易产生变色现象等缺陷。

蓝色 LED 芯片发出的蓝光激发黄绿荧光粉发光,使蓝光与黄、绿光混合发出白光。蓝光 InGaN 单芯片激发 YAG 荧光粉,发出白光,光效可达 1 m/W。这种方法发光,发光效率高,制备简单,温度稳定性高,显色性也好。但色彩随角度而变,光一致性差。显然,根据光度学原理,用蓝光激发红光、绿光荧光粉也可以发出白光。紫外光或紫外 LED 激发三原色荧光粉,发出白光。显然也选择用两基色、四基色、五基色荧光粉,同样可以实现白光 LED。这种方法的白光决定于荧光粉,易实现较高的显色性,白光制备方法简便易行。但有发光效率低,温度稳定性差,紫光容易遗留等缺陷^[3,4]。

目前商品化的白光 LED 产品根据光谱成分的不同,主要分成两大类:1) 蓝色光 LED 芯片 + 黄绿色荧光粉激发白光;2) 将红、绿、蓝(RGB)三种 LED 芯片封装在一起,混合产生白光。两类白光 LED 的光谱如图 1 所示。

从图 1 可以清楚看出两种 LED 发光光谱的差异。正是由于这种差异,将这两种白光 LED 应用于可见光通信系统存在差异。目前的研究工作重要是针对蓝光 + 荧光粉的 LED,在这种情况下,大段的黄色荧光光谱并不受电流调制,导致 LED 的调制带宽很低。解决办法在于使用蓝色滤光片将荧光部分滤除后再进行光电信号转换,滤光后的调制特性有很大改善。至于 RGB 混合型白光 LED,其优点在于:可以提供极高的光谱带宽,可以使用波分复用的方式提高信道

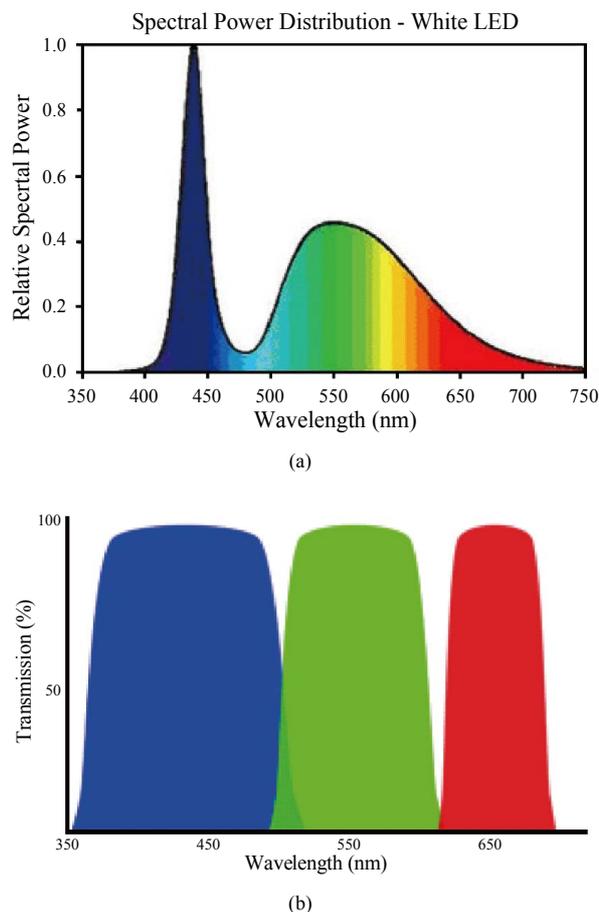


Figure 1. Contrast two kinds of white LED spectra^[5]
图 1. 两种白光 LED 光谱对比^[5]; (a) 蓝光 LED + 黄绿色荧光粉;
(b) RGB 型白光 LED

容量^[5]。但是由于较高的成本和复杂的调制电路,目前尚未见到采用这种 LED 设计的 VLC 系统。

综上所述,白色荧光 LED 是现阶段最为可行的 VLC 系统光源。在实验中我们为可见光通信实验准备的 LED 芯片型号分别为 Cree Xlamp XP-G Natural White Q5, Cree Xlamp XP-G Natural White R2, 红色 LED 芯片, Cree XLamp MC-E, 带滤光镜的白色 LED 芯片等五种不同的 LED 芯片。

3. 白光 LED 调制特性

LED 的调制特性可以从三个方面来描述。首先,作为一种特殊的二极管,LED 具有与普通二极管相似的伏安特性曲线,如图 2 所示。由曲线可知,LED 单向导通,当正电压超过某个阈值 V_A (如 2.25 V),即通常所说的导通电压之后,可近似认为 I 与 V 成正比,如图中所示的“工作区”。

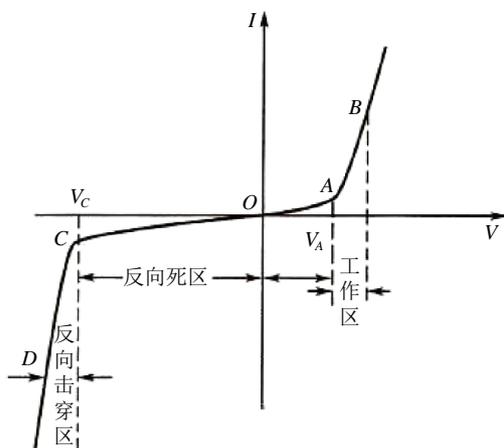


Figure 2. LED volt-ampere characteristic curve
图 2. LED 伏安特性曲线

其次,LED 的调制能力由其光功率 - 电流曲线(即 P-I 曲线)描述,如图 3 所示。从图中可知,LED 的 P-I 曲线近似成线性,且没有阈值电流。定义 LED 的

$$\text{光调制度 } m \text{ 为: } m = \frac{\frac{1}{2}\Delta I}{I_{\text{偏置}}} \quad (1)$$

式中 ΔI 表示信号的峰峰值电流。光调制度描述了交流信号与直流偏置之间的关系,调制度越高,光信号越容易被探测到,从而降低光接收端所需的光功率。驱动 LED 的偏置电流往往达数百毫安,要使信号电流也达到这个量级需要设计相应的放大电路。目前大多数实验的驱动能力达到百分之几到百分之十几的调制度,如果一味追求高调制度可能会导致调制带宽降低^[6],同样影响系统性能。

最后一点,LED 的调制带宽决定了通信系统的信道容量和传输速率,其定义是在保证调制度不变的情况下,当 LED 输出的交流光功率下降到某一低频参考频率值得一半时(-3 dB)的频率就是 LED 的调制带宽,如图 4 所示。图中的光带宽指光电探测器输出的信号电流变为原来一半时对应的带宽。

LED 的调制带宽受响应速率限制,而响应速率又受半导体内少数寿命 τ_c 影响:

$$f_{3dB} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi\tau_c}$$

对于 III-V 族(如 GaAs)材料制成的发光二极管而言, τ_c 的典型值为 100 ps,故 LED 的理论带宽总是限制在 2 GHz 以下^[7]。当然,目前所有发光二极管的

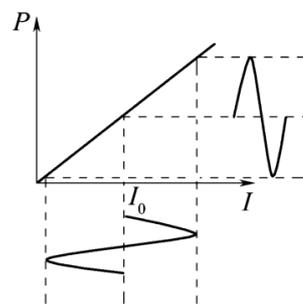


Figure 3. For the LED to simulate the modulation of P-I curve
图 3. 对 LED 进行模拟调制时的 P-I 曲线

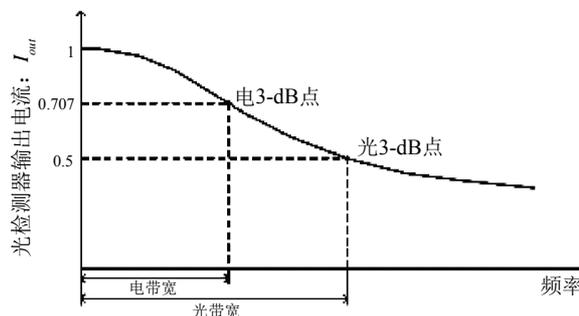


Figure 4. Diagram of LED modulation bandwidth
图 4. LED 调制带宽示意图

带宽都远远低于这个值,照明用的大功率白光二极管由于受其微观结构及光谱特性所限,带宽更低。较低的调制带宽限制了 LED 在高速通信领域(包括可见光通信系统)的应用,因此,设法提高 LED 的调制带宽是解决问题的关键。文献[7]给出了一种通过改进 LED 微观结构提高调制带宽的方法。

4. LED 调制特性的测量实验平台的设计

LED 调制特性的测量实验平台如图 5 所示,主要包括光信号发射端和接收端。在发射端,首先对从函数发生器产生的正弦波信号进行放大,以提高实验所需的 LED 调制深度;随后,将放大后的信号加载到由恒流源驱动的 LED 直流偏置电流上,这样 LED 就能够发出明暗闪烁的调制光信号了;而在接收端,主要是对光电探测器的光电流进行放大处理,并输出到示波器上。值得一提的是,实用的 VLC 往往会在光电探测器前加装蓝色滤光片,用于滤除白光 LED 中发出的黄色荧光分量,从而大幅提高系统带宽 LED 调制特性^[8]。测量实验平台如图 5 所示,主要包括光信号发射端和接收端。在发射端,首先对从函数发生器产生的正弦波信号进行放大,以提高实验所需的

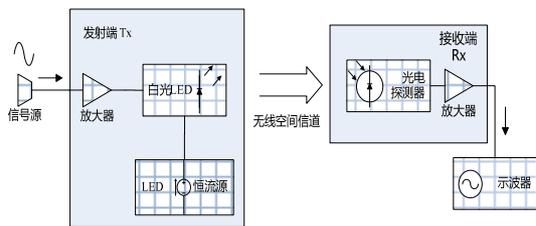


Figure 5. LED modulation bandwidth measurement platform diagram
图 5. LED 调制带宽测量平台示意图

LED 调制深度；随后，将放大后的信号加载到由恒流源驱动的 LED 直流偏置电流上，这样 LED 就能够发出明暗闪烁的调制光信号了；而在接收端，主要是对光电探测器的光电流进行放大处理，并输出到示波器上。

VLC 系统的发射端电路包括两方面主要功能：直流驱动 LED 正常工作；将交流信号调制到直流偏置电流上。因此，我们将整个电路分为信号放大部分和恒流源驱动部分，彼此独立设计，中间采用隔直电容 C_1 隔开。整个发射端电路图如图 6 所示。

信号放大电路设计。大功率 LED 的正常工作电流 $I_{\text{偏置}}$ 的范围通常在 350 mA~700 mA，根据调制度的计算公式(1)，加载到 LED 上的信号电流峰峰值 ΔI 也要达到 100 mA 的量级，才能保证调制度达到 10%。考虑到信号源的电压值可以手动调整，而电流值不行，固将放大电路设计成仅具有电流放大能力、而电压放大倍数为 1 的射随电路。见图 3，电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和放大器本身构成了这个射随电路，电压的放大倍

数为：

$$A_u = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \approx 1$$

放大器输出的信号电流大小由输出电压和负载电阻共同决定：在设计该独立电路模块时，我们接入了一个大小为 5Ω 的对地负载电阻(当接入 LED 调制电路时，负载就是 LED 的内阻了)。这样，当信号源输出的信号电压设置为 $V_{pp} = V_{out} = 500 \text{ mV}$ 时，输出电流可以达到 100 mA，从而使调制度达到 10%左右。

恒流源驱动电路，其主要作用是驱动并使 LED 正常工作。本实验使用了市售的、用于驱动 LED 照明灯具的恒流源，由 SD42522 芯片及外围电路构成，输入电压为 12 V 直流电源，标称输出 700 mA 的恒定电流。考虑到部分信号 LED 的正常工作电流在 350 mA 左右，并接 R_4 分流电阻，由电感电容构成的 T 型滤波装置，如图 3 中所示。

5. 数据的分析及结论

本实验一共测量了 5 种型号的大功率 LED 的调制带宽，见表 1；详细记录了其中一种 LED 的接收信号幅度随频率变化，如表 2。

并使用 MATLAB 软件绘制出频率响应曲线，见图 7。

由表 1 可知，红光 LED 的调制带宽比所有白光型号要宽，而在白光 LED 中，以 Cree XLamp XP-G Q5 型的带宽最大。图 7 中电压幅度下降 3 dB 点对应的

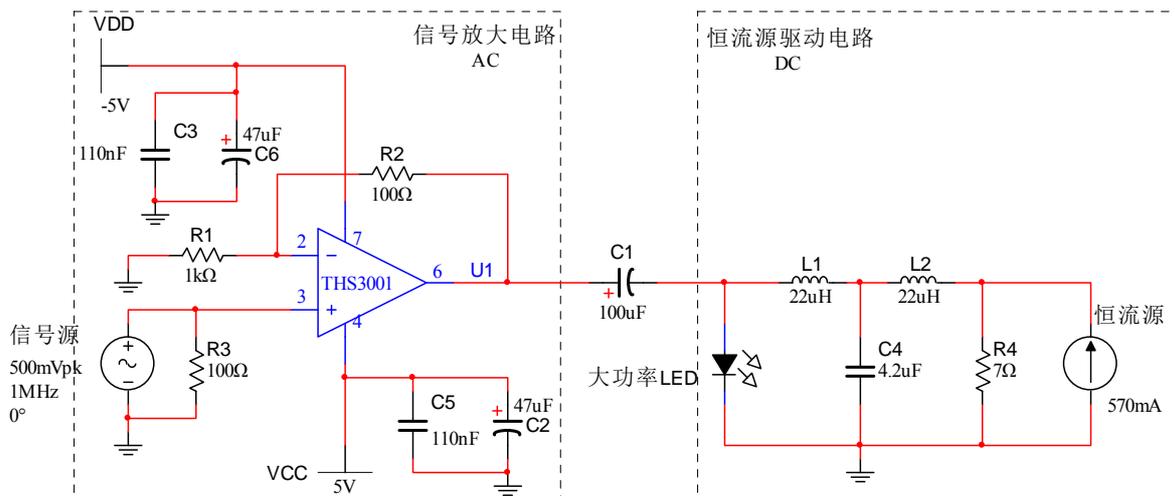


Figure 6. LED modulation bandwidth measurement platform transmitter circuit
图 6. LED 调制带宽测量平台发射端电路

Table 1. The modulation bandwidth of high-power LED
表 1. 大型大功率 LED 调制带宽

大功率 LED 型号	调制带宽
Cree XLamp XP-G R2 型白光 LED	1.5 MHz
红光 LED	3 MHz
Cree XLamp XP-G Q5 型白光 LED	2.3 MHz
Cree XLamp MC-E 型白光 LED	0.7 MHz
带滤镜白光 LED	1.7 MHz

Table 2. White LED experimental data measured
表 2. 白光 LED 实验测得数据

某型白光 LED EOE 信道频率响应		
信号源频率(KHz)	接收端输出电压(mV)	输出电压的对数值(dB)
100	800	58.06179974
300	800	58.06179974
500	800	58.06179974
700	760	57.61627185
900	730	57.38463439
1100	660	56.39087871
1300	620	55.84783379
1500	580	55.26855987
1700	560	54.96376054
1900	550	54.80725379
2100	540	54.6478752
2300	530	53.97940009
2500	525	52.46498581

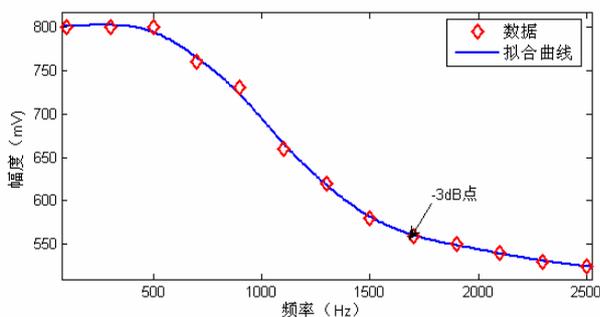


Figure 7. LED frequency response curve
图 7. LED 的频率响应曲线

频率就是该 LED 的调制带宽。白光 LED 的带宽比红光的小，很可能是由于受到其光谱的荧光分量影响。

实验测得红光 LED 的带宽在 3 MHz，而白光 LED 最大带宽为 2.3 MHz，这与三星公司的研究小组测得的白光 LED 带宽相近(2.5 MHz)^[9]。不过，该小组先后在系统中添加了蓝色滤光镜和均衡网络，最终将系统带宽提高到了 50 MHz。

经过对各种 LED 特性的测量，得出如下结论：

1) 红光 LED 的开启电压比较低，调制带宽更宽，比白光宽约一倍，所以选用三色光混合而成的白光更

适合白光 LED 通信，其中红光专门用作通信用，只是这比其他的成本更高；

2) 有无滤光镜，对 LED 调制带宽影响不大；

3) 单芯片 LED 发光亮度只能作为台灯照明，近距离比较亮，超过 300 lx，适合台灯传输，但无法作为室内照明并通信，需要用多芯片 LED；

4) 多芯片 LED 的应用于可见光通信较困难，比如本实验中，多芯片 LED 的调制带宽只有 0.7 MHz，远低于单芯片 LED，同时成本又比较好，本实验采用的多 LED 芯片价格高达上百元，很难作为照明；

5) 现在白光 LED 作为照明和通信双用最合适的场合(成本可接受)首选是太空舱，然后是汽车和客车内，只有当照明 LED 大量投产，价格大幅度降低才可用于实际办公室通信照明系统中；

6) 当前普通照明 LED 调制带宽只有几 MHz 到几十 MHz，如果要达到最前沿的几百 MHz 甚至上 GHz，需要高亮度特殊 LED，价格及其高昂，很难达到使用，而普通发光 LED 的带宽又很难满足下一代通信需求，所以现在急需新型低成本、高亮度、高带宽的白光 LED 投入商用。

6. 总结

针对大功率 LED 调制带宽的测量实验较为复杂。我们首先设计并调试了 VLC 系统的发射端电路和接收端电路，以此构成调制带宽的测量平台。该平台具有结构简单可靠、低噪声、高带宽、光调制度大等特点，完全满足大功率 LED 调制特性的研究实验。随后开展的实验中，我们共测量并比较了 5 种大功率 LED，实际测得最大的调制带宽是红光 LED 的 3 MHz，而白光 LED 由于存在荧光分量的干扰，调制带宽稍低。

LED 的调制带宽主要受到自身结构所限，各家厂商制作 LED 的材料不同，生产工艺也不一样，因此调制特性存在较大差异。只有测量更多的大功率 LED，才能找出调制特性最佳的型号。当前的商用大功率白光 LED 主要用于照明，其内部结构相对简单，并没有考虑到通信系统的需求。目前已经有研究人员着手讨论如何通过设计更加复杂的 LED 微观结构，来缩短 LED 上升、下降时间，进而提高调制带宽以用于高速通信系统^[10]。如果有朝一日能够研发出兼顾

带宽和发光效率的大功率白光 LED, 并且实现大规模生产, 将是理想的 VLC 系统光源。

由于大功率 LED 调制带宽的测量平台实际上是一个简单的可见光通信系统, 对调制带宽的测量相当于测量系统的电 - 光 - 电信道频率响应带宽。未来的实验可以尝试通过改进发射端 - 接收端电路和光路来补偿 LED 的带宽, 进而提升整个系统的频响特性, 以此提高系统的传输速率。另一方面, 我们还可以基于这个实验平台, 加装调制、解调等设备, 使之成为一个实用的 VLC 系统, 用以探讨整个通信系统的性能。

参考文献 (References)

- [1] H. L. Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, Y. Je and E. T. Won. 100-Mb/s NRZ visible light communications using a post equalized white LED. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(15): 1063-1065.
- [2] J. Vucic, C. Kottke, S. Nerreter, K.-D. Langer and J. W. Walewski. 513 Mbit/s visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(24): 3512-3518.
- [3] 黄丽亚, 杨恒新. 模拟电子技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [4] Y. Tanaka, S. Haruyama and M. Nakagawa. Wireless optical transmissions with white colored LE for wireless home links. *The 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2000, 2: 1325-1329.
- [5] D. O'Brien. *Visible light communications: Achieving high data rates*. Oxford University, 2011.
- [6] J. Vucic. 513 Mbit/s visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(24): 3512-3518.
- [7] R. D. Koudelka, J. M. Woodall. *Light emitting devices with increased modulation bandwidth*. Yale University, 2011.
- [8] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, et al. Indoor visible communication utilizing plural white LEDs as lighting. *The 12th IEEE International Symposium on*, 2001: F81-F85.
- [9] T. Komine, M. Nakagawa. A study of shadowing on indoor visible-light wireless communication utilizing plural white LED Lightings. *1st International Symposium on Wireless Communication Systems*, 20-22 September 2004: 36-40.
- [10] T. Komine, M. Nakagawa. Fundamental analysis for visible light communication system using LED lights. *IEEE Transaction on Consumer Electron*, 2004, 50(1): 100-107.