

多光谱可见光通信信道串扰分析

崔璐 唐义 朱庆炜 骆加彬 胡珊珊

Analysis of channel crosstalk in muliti-spectrum visible light communication system

Cui Lu Tang Yi Zhu Qing-Wei Luo Jia-Bin Hu Shan-Shan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 094208 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.094208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

100Gb/s 归零码信号的 2R 再生

A study of 100 Gb/s 2R regeneration for return-to-zero code signal

物理学报.2016, 65(5): 054208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054208>

基于太赫兹光非对称解复用器结构的低开关能量、高线性度全光采样门实验研究

Experimental study on a low switching energy and high-linearity all-optical sampler based on terahertz optical asymmetric demultiplexer

物理学报.2015, 64(15): 154213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154213>

复合抛物面聚光器作为可见光通信光学天线的设计研究与性能分析

Design research and performance analysis of compound parabolic concentrators as optical antennas in visible light communication

物理学报.2015, 64(12): 124212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124212>

基于注入锁定法布里-珀罗激光器的光学双稳态及光存储研究

Optical bistability and optical storage based on injection locked Fabry-Perot semiconductor laser

物理学报.2015, 64(4): 044204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044204>

结构参数对串联微环谐振腔编解码器性能的影响

Study of structure parameters effect on performance of optical en/decoder based on parallel-cascaded microring resonators

物理学报.2015, 64(3): 034218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034218>

多光谱可见光通信信道串扰分析*

崔璐 唐义† 朱庆炜 骆加彬 胡珊珊

(北京理工大学光电学院, 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

(2015年12月3日收到; 2015年12月31日收到修改稿)

在可见光通信领域, 通过波分复用技术可以增加信道个数, 从而提高系统通信容量. 然而发光二极管(LED)的辐射光谱具有一定线宽, 当信道个数增加, 信道间隔将变小, 尽管有滤光片的通道选择, 但LED的辐射光谱会出现重叠从而产生信道串扰. 本文基于LED光谱重叠现象分析了多光谱波分复用可见光通信系统的信道串扰问题. 首先结合LED的物理机制和实际LED的光谱形状对其光谱进行建模; 然后根据光谱重叠现象和可见光通信信道推导出信道串扰公式; 最后利用不同中心波长的LED在两通道可见光通信系统中验证了信道串扰公式的正确性. 仿真和实验结果表明, 当两信道的信道间隔大于28 nm时, 两信道之间的信道串扰不超过-13.6 dB. 对多光谱波分复用可见光通信系统的信道串扰分析对未来可见光通信增加信道数量有一定指导作用.

关键词: 可见光通信, 波分复用, 光谱重叠, 信道串扰

PACS: 42.79.Sz, 85.60.Jb

DOI: 10.7498/aps.65.094208

1 引言

可见光通信(visible light communication, VLC)具有可靠性高、保密性好、无电磁辐射、无需频谱认证、光网络易于搭建等优点^[1,2]. 而作为下一代“绿色照明”的光源, 发光二极管(light-emitting diode, LED)已经被广泛应用于现代社会, 其高效、低成本、相对较高的调制速率的优点也非常适合作为可见光系统的光源^[3,4]. 因此, 日本KEIO大学的Komine和Nakagawa^[5]提出了利用白光LED光源作为基站的可见光通信技术. 由于白光LED不仅作为照明装置, 还可作为通信装置, 于是诞生了诸如智能超市、智能化交通系统、博物馆展品应景讲解系统等, 应用前景广阔^[6].

随着可见光通信技术的发展, 可见光通信系统逐渐由单通道系统向多通道系统转变, 常用的多路复用技术包括波分复用技术、光MIMO(multiple-input multiple-output)技术和偏

分复用技术. 其中波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)技术在可见光通信中的应用最为成熟^[5-8]. 2012年, 意大利科学家Khalid和Cossu等^[7]利用REB-LED结合DMT(discrete multi-tone)调制技术实现三路3.4 Gbps可见光通信; 2014年, 复旦大学利用荧光型LED和RGB-LED结合WDM技术和OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)调制技术实现了单路上行, 三路下行可见光通信系统, 其上行下行速率分别为225 Mbps和575 Mbps^[8]; 2015年, 复旦大学利用RGB-LED实现三路4.5 Gbps可见光通信^[9]. 增加信道个数可以有效提高可见光系统速率, 由于光电接收器, 如PIN光电二极管或APD(avalanche photo diode)的光谱响应是固定的, 不具备光谱分辨能力, 因此在WDM-VLC系统中通常用滤光片进行通道选择.

目前R, G, B三通道可见光通信系统已日趋成熟, 想要提高系统通信容量可以在可见光波段(400—760 nm)继续增加信道个数. 然而, 由于

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB329202)和国家自然科学基金项目(批准号: 61571067)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tangyi4510@bit.edu.cn

LED 光谱具有一定的线宽, 随着信道个数的增加, 信道间隔的减小, LED 光谱会出现重叠现象. 而滤光片无法区分光谱重叠的部分, 此时信道串扰将产生. 本文基于 LED 光谱重叠现象分析了多光谱 WDM-VLC 系统的信道串扰问题. 首先结合 LED 发光的物理机制和实际 LED 的光谱形状对其光谱进行建模; 然后根据光谱重叠现象和可见光通信信道推导出信道串扰公式; 最后利用不同中心波长的 LED 在两通道可见光通信系统中验证了信道串扰公式的正确性. 本文对多光谱 WDM-VLC 系统的信道串扰分析对未来可见光通信增加信道数量有

一定指导作用.

2 基于 LED 光源的多光谱 WDM-VLC 系统

基于 LED 光源的多光谱 WDM-VLC 系统原理图如图 1 所示. 在发射端, 不同颜色的 LED 代表不同信道. 为满足室内照明应用, 各颜色光需要在自由空间混为白光或某种特定颜色光. 在接收端, 光学天线提供一定的光学增益, 窄带滤光片可滤出对应信道的光信号, 并由对应的接收器接收.

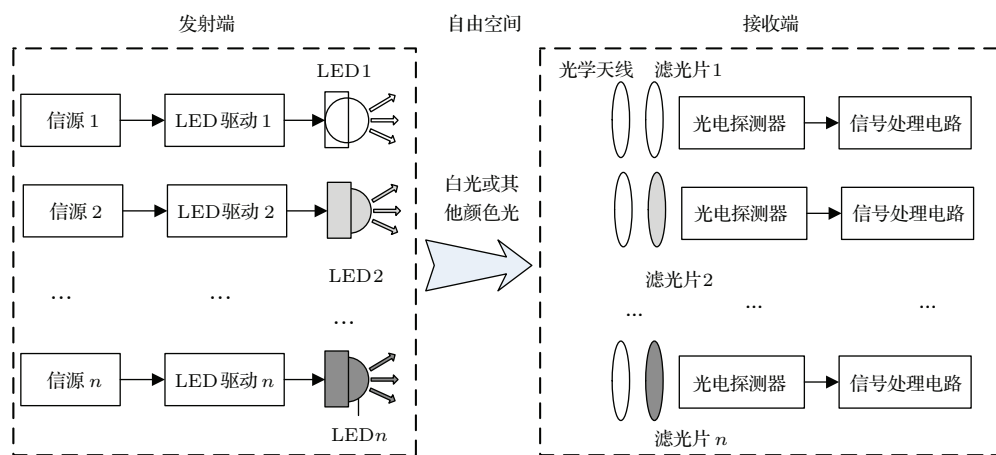


图 1 多光谱 WDM-VLC 通信系统原理图

Fig. 1. Block diagram of the multi-spectra WDM-VLC system.

3 信道串扰分析

在可见光通信系统中, 光电探测器探测光功率的变化作为信号; 而照明仅是人眼感知光功率在时域上的平均值. 因此可以将光源发出的光功率分为两部分: 一部分为等效直流光功率, 对应光功率在时域上的平均值; 另一部分为等效交流光功率, 用于表征光功率的变化. 等效直流光功率在通信过程中会产生散粒噪声; 等效交流光功率则决定通信系统的信号强弱. 一般来说, 等效交流光功率不大于等效直流光功率. 在后面分析信道串扰时, 我们仅关注等效交流光功率.

图 2 为两部分等效光功率的特性实验结果. 在可见光通信系统中, 等效直流光功率的直接来源是 LED 的直流偏置; 等效交流光功率的直接来源是加

载到直流偏置上的交流信号, 交流信号的大小会影响通信系统信号的强弱. 从图 2(a) 中可以看出, 增加直流偏置电流会增加系统噪声; 从图 2(b) 中可以看出, 增加交流信号发射功率会增大接收信号功率而噪声基本不变.

3.1 信道串扰产生

在多光谱 WDM-VLC 系统中, 由于光电接收器的光谱响应是固定的, 不具备光谱分辨能力, 因此通常用滤光片进行通道选择^[10]. 然而, 由于 LED 光谱具有一定的线宽, 随着可见光波段信道个数的增加、信道间隔的减小, LED 光谱会出现重叠. 滤光片无法对光谱重叠部分进行区分, 此时信道串扰将产生, 如图 3 所示. 在接下来的研究中, 我们首先对 LED 光谱进行建模以便分析多光谱 WDM-VLC 系统的信道串扰.

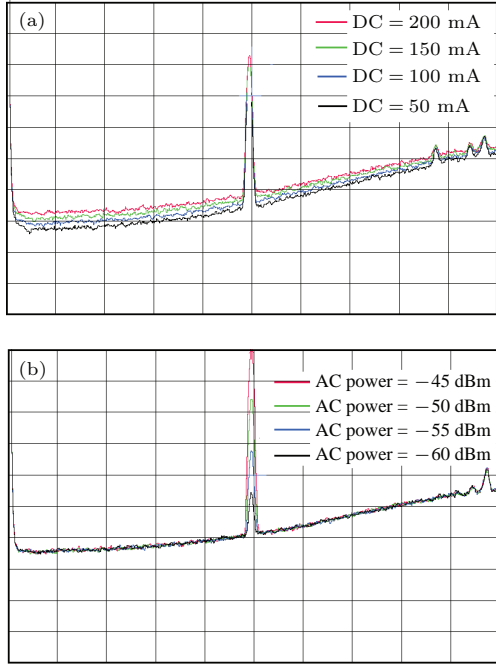


图2 (网刊彩色) 等效光功率特性实验结果 (a) 等效直流光功率; (b) 等效交流光功率

Fig. 2. (color online) The experiment results of equivalent optical power characteristics: (a) Equivalent DC optical power; (b) equivalent AC optical power.

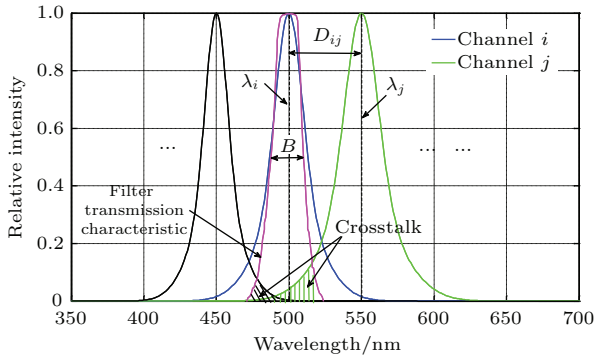


图3 (网刊彩色) 两信道光谱重叠产生信道串扰 (λ_i 和 λ_j 表示 i 信道和 j 信道的峰值波长; B 表示窄带滤光片的半峰宽; $D_{i,j}$ 表示信道间隔)

Fig. 3. (color online) Channel crosstalk generate because of overlapping spectra for two channels (λ_i and λ_j are peak wavelengths of sub-channel i and sub-channel j , respectively. B represents the FWHM of the filter. The channel-spacing between two sub-channels is $D_{i,j}$).

3.2 LED 光谱模型

过去的十几年里, 各国科学家已建立了一些 LED 光谱模型, 这些模型在一些应用中得到认可 [11–15]. 然而, 这些模型中的一些参数需要经过

实际 LED 光谱测量后得到. 本文根据已有模型, 结合 LED 发光的物理机制和 LED 光谱的实验结果重新建立 LED 光谱模型.

根据 LED 自发辐射的物理机制, 考虑到能带宽度、少子分布及能态分布 [11], 最大辐射能量和半峰宽分别为

$$E_{\text{peak}} = E_g + \frac{1}{2}k_B T_j, \quad (1)$$

$$\Delta E = 1.8k_B T_j, \quad (2)$$

其中 E_g 表示禁带宽度, T_j 表示温度, k_B 是玻尔兹曼常数.

然而由于 Stark 效应, 自吸收效应 [12] 和其他一些展宽机制, 在室内温度下观察到的 III 族氮化物 LED 的线宽通常为 $5k_B T_j - 8k_B T_j$ [13]. 本文通过对大量 LED 光谱的研究发现, 对于峰值波长小于 560 nm 的 InGaN 和 AlInGaN 型 LED, ΔE 通常在 $4.3k_B T_j - 6.8k_B T_j$ 之间, 而对于峰值波长大于 560 nm 的 InAlGaP 型 LED, ΔE 通常在 $2.1k_B T_j - 3.3k_B T_j$ 之间. 为了降低分析的复杂度, 本文取一中间值作为代表:

$$\Delta E = \begin{cases} 5.5k_B T_j & \lambda \leq 560 \text{ nm}, \\ 3.0k_B T_j & \lambda > 560 \text{ nm}. \end{cases} \quad (3)$$

大量实验观察表明, LED 辐射光谱形状类似高斯函数. 根据文献 [14] 和 (1), (2) 式, 建立 LED 光谱辐射模型如下:

$$\begin{cases} S(\lambda) = p \times \exp\left(-3.2213\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_{0.5}}\right)^2\right) \\ \quad \exp\left(-0.3\left|\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_{0.5}}\right|\right), \\ \Delta\lambda_{0.5} = \frac{5.5k_B T_j \lambda_0^2}{hc} & \lambda_0 \leq 560 \text{ nm}, \\ \Delta\lambda_{0.5} = \frac{3.0k_B T_j \lambda_0^2}{hc} & \lambda_0 > 560 \text{ nm}, \end{cases} \quad (4)$$

其中 p 峰值功率参数, λ_0 表示峰值波长, $\Delta\lambda_{0.5}$ 表示半峰宽 (full width at half maximum, FWHM). 在室温下, 该模型仅需知道中心波长和峰值功率, 就可对 LED 光谱进行拟合.

一些实验测得的 LED 光谱 (红、黄、绿、蓝) 和其高斯光谱模型 ($T_j = 300 \text{ K}$) 如图 4 所示. 可以看出, 所建立的光谱模型可以很好地与实验测得的 LED 光谱拟合.

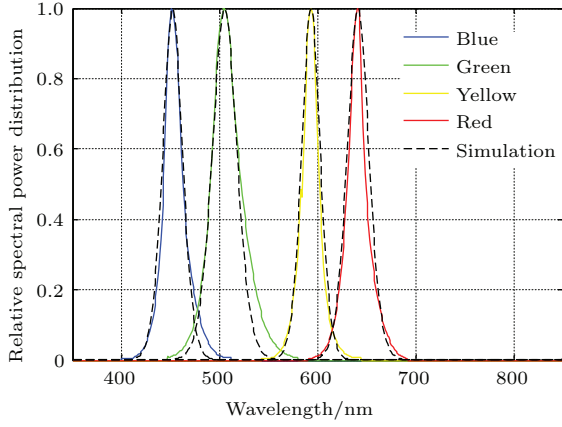


图4 (网刊彩色) 实验LED光谱及高斯光谱模型
Fig. 4. (color online) Experimental spectra of LEDs and the simulations of Gaussian model.

3.3 光谱重叠信道串扰公式推导

可见光通信系统中, 等效交流光功率为

$$P = \int S(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

其中, $S(\lambda)$ 为LED光源的等效交流光谱.

可见光通信信道直流增益为^[16]

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A_R}{2\pi r^2} \cos^m(\phi) \\ \times T(\lambda, \psi) G(\lambda) \cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq \psi_c, \\ 0 & \psi > \psi_c, \end{cases} \quad (6)$$

其中 m 是朗博辐射因子, 由LED辐射半角 $\Phi_{1/2}$ 决定, $m = \ln 2 / \ln(\cos \Phi_{1/2})$; A_R 表示接收器有效面积; r 为传输距离; ψ 为接收器光线入射角; ϕ 为LED发射角, $T_s(\lambda, \psi)$ 滤波片透过率函数; $G(\lambda)$ 为接收天线增益; ψ_c 表示接收器视场角. 暂时假设接收天线增益为 $G(\lambda) = 1$.

经过自由空间传输后, 接收器视场角内接收到的信号光功率及光电转换后电信号可分别表示为

$$P_R = \frac{(m+1)A_R}{2\pi r^2} \cos^m(\phi) \cos(\psi) \times \int T(\lambda, \psi) S(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

$$i_R = \frac{(m+1)A_R}{2\pi r^2} \cos^m(\phi) \cos(\psi) \times \int \gamma(\lambda) T(\lambda, \psi) S(\lambda) d\lambda, \quad (8)$$

其中 $\gamma(\lambda)$ 表示接收器响应.

对于某一个子信道, 例如第 i 信道, 其信道信

号及来自第 j 信道的串扰可分别表示为

$$i_{si} = \frac{(m+1)A_R}{2\pi r^2} \cos^m(\phi_i) \cos(\psi_i) \times \int_{Bf,i} \gamma(\lambda) T_i(\lambda, \psi) S_i(\lambda) d\lambda, \quad (9)$$

$$i_{ci,j} = \frac{(m+1)A_R}{2\pi r^2} \cos^m(\phi_j) \cos(\psi_j) \times \int_{Bf,i} \gamma(\lambda) T_i(\lambda, \psi) S_j(\lambda) d\lambda, \quad (10)$$

其中 Bf, i 和 $T_i(\lambda, \psi)$ 分别表示第 i 信道所用的滤光片通带宽度及透过率函数.

对于一般的F-P (Fabry-Perot) 窄带滤光片, 其透过率函数为: $T = T_0 / (1 + F \sin^2 \theta)$, 其中 T_0 为中心波长透过率, F 是与各层薄膜的反射率有关的系数, θ 是与各层薄膜相移及位相厚度有关的系数. 本文将窄带滤光片透过率函数理想为门函数, 即

$$T_i(\lambda) = \begin{cases} T_0 & |\lambda - \lambda_0| \leq B/2, \\ 0 & |\lambda - \lambda_0| > B/2, \end{cases} \quad (11)$$

其中 B 表示滤光片透过率曲线的半峰宽. 根据市面上的窄带滤光片参数, 暂时取窄带滤光半峰宽 B 为 10 nm, 峰值透过率为 50%.

本文暂时使用APD(参考型号: First Sensor APD, AD1900-11)作为接收器进行分析. 表1和图5分别为一个典型可见光APD的参数和光谱响应曲线. 为了简化计算过程, 各通道APD光谱响应取对应滤光片通带内的平均值 γ_i , 工作温度取室温.

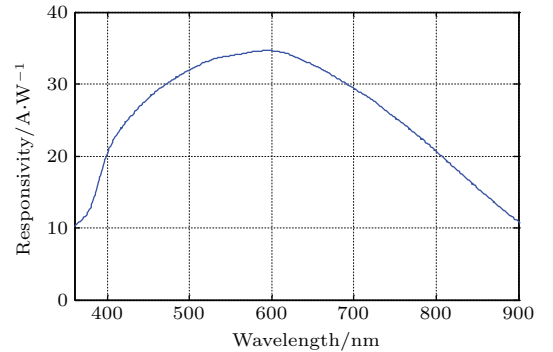


图5 APD光谱响应曲线 ($M = 100$)

Fig. 5. Spectral response of APD ($M = 100$).

定义第 i 信道受到第 j 信道的串扰为

$$C_{\text{cross},ij} = 20 \log_{10} \frac{i_{ci,j}}{i_{si}}. \quad (12)$$

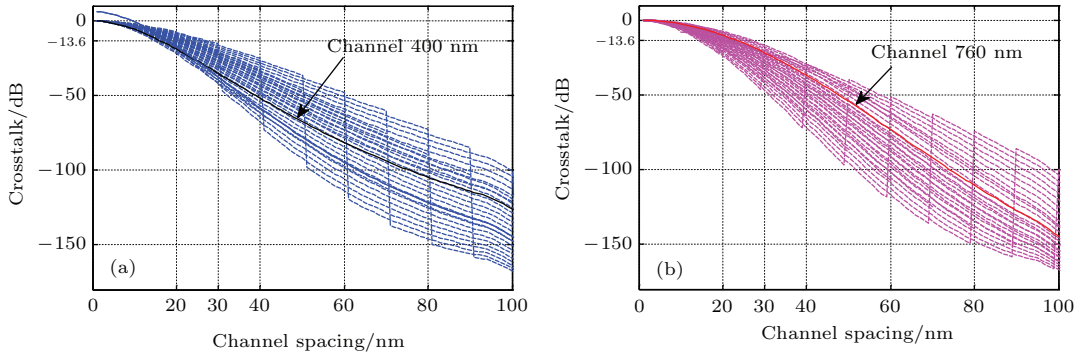


图6 (网刊彩色) 信道串扰与信道间隔关系 ($\varphi = 0, \psi = 0$) (a) 右侧光谱信道串扰; (b) 左侧光谱信道串扰
 Fig. 6. (color online) Crosstalk versus channel-spacing when $\varphi = 0, \psi = 0$: (a) Crosstalk from right channel; (b) crosstalk from left channel.

假设LED辐射半角为 60° (即 $m = 1$) 且等效信号光谱功率均为1 W; 所有LED密集排列以便在自由空间混光; 各LED的间距相对于传输距离可以忽略. 考虑接收信号功率最大的情况: $\varphi = 0$ 且 $\psi = 0$, 根据(5)—(12)式, 不同信道下信道串扰 $C_{\text{cross},ij}$ 与信道间隔关系如图6所示.

表1 APD参数
 Table 1. Parameters of APD.

名称	数值
APD增益 (M)	100
有效接收面积	3 mm^2
工作温度	$-40 \sim -85 \text{ }^\circ\text{C}$
波长响应	$350 \sim 750 \text{ nm}$

图6(a)为目标信道的右侧光谱信道带来的串扰; 图6(b)为目标信道左侧光谱信道带来的串扰. 从图6中可以看出, 信道间隔相同时, 不同信道受到的信道串扰不同, 这是由于各通道LED光谱形状不同使得重叠部分各不相同引起的. 从所有信道的信道串扰曲线组成的包络可以看出, 对于某个信道而言, 距离该信道28 nm以外的信道对其信道串

扰不会超过 -13.6 dB . 这意味着利用OOK调制误码率达到 10^{-6} 时 (此时所需信噪比为 13.6 dB), 两信道的信道间距至少28 nm.

如果考虑可见光波段上所有信道, 如图3所示, 则第 i 信道受到的串扰为

$$C_{\text{cross},i} = 20 \log_{10} \frac{i_{ci}}{i_{si}},$$

$$i_{ci} = \sum_{j=1, j \neq i}^N i_{ci,j}. \quad (13)$$

4 信道串扰实验

基于LED光源的信道串扰实验的原理框图如图7所示, 发射端为两组相同的发射系统, 一个作为信号信道, 另一个作为串扰信道. 两个任意波形发生器 (Agilent 33250A) 发出两个频率的正弦波经过前放和Bias-T加载到直流偏置上. Bias-T的输出直接驱动各自不同颜色的LED发光. 经过窄带滤光片后, 信号光和串扰光均被APD接收, 利用信号分析仪 (Agilent N9020A) 观察信号和串扰. 表2为实验中的一些参数.

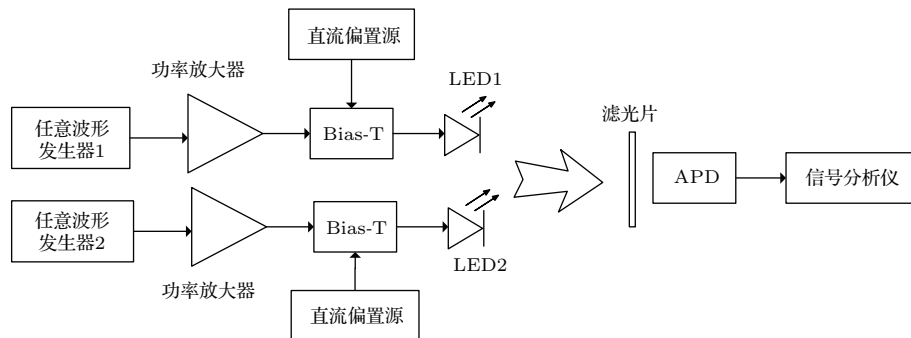


图7 信道串扰实验原理图

Fig. 7. Diagram of crosstalk testing.

表2 实验参数
Table 2. Parameters of experiment.

名称	数值
LED 峰值波长	635 nm/620 nm/596 nm
LED 发光辐射半角	60°
滤光片中心波长	634.9 nm/595.8 nm
滤光片中心透过率	55.0% / 49.4%
滤光片半峰宽度	8.4 nm/8.2 nm
正弦波频率	15 MHz/15.2 MHz
发射端到接收端距离	50 cm
LED 间隔	4 mm

图8为信道串扰实验的实物系统。

由于在信道串扰公式的推导过程中假设各通道的等效交流光功率相等, 为满足该前提, 在实验过程中首先去掉滤光片将两信道的信号功率调成基本相等的状态(在信道间隔较小时, 暂时忽略APD光谱响应的差别), 而后加上滤光片观察APD

接收到的信号。根据串扰公式, 信号分析仪中两信号的差值为实际串扰。

表3和图9为四组串扰实验结果。对应理论结果可以看出, 实验结果与理论计算两者基本符合。如此证明上述基于LED光源的多光谱WDM-VLC系统的信道串扰分析的正确性。

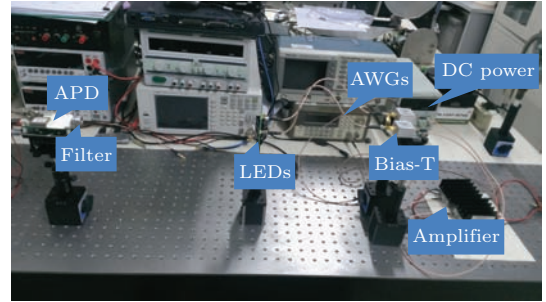


图8 (网刊彩色) 信道串扰实验实物系统

Fig. 8. (color online) The real system of crosstalk testing.

表3 信道串扰实验结果
Table 3. Experiment results of crosstalk testing.

信号信道	滤光片	串扰信道	信道间隔/nm	实验测量串扰/dB	理论计算串扰/dB
635 nm	634.9 nm	620 nm	15	-10.02	-7.82
		596 nm	39	-44.32	-47.45
596 nm	595.8 nm	620 nm	24	-21.61	-19.83
		635 nm	39	-35.72	-41.22

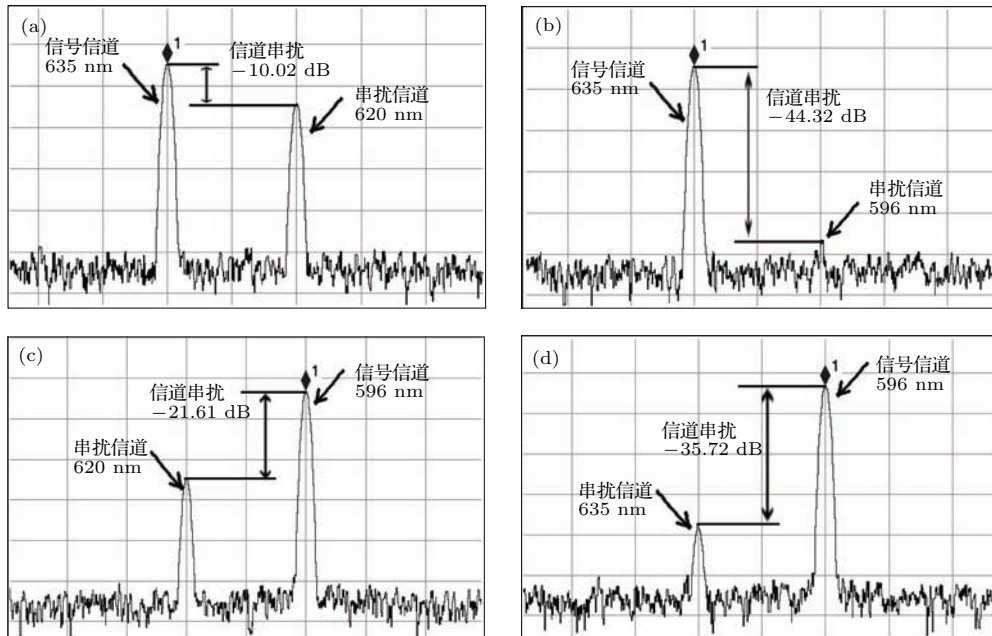


图9 信道串扰实验结果 (a) 信号信道 635 nm, 信道间隔 15 nm; (b) 信号信道 635 nm, 信道间隔 39 nm; (c) 信号信道 596 nm, 信道间隔 24 nm; (d) 信号信道 596 nm, 信道间隔 39 nm

Fig. 9. The experimental results of crosstalk measurements: (a) Signal channel of 635 nm with channel-spacing 15 nm; (b) signal channel of 635 nm with channel-spacing 39 nm; (c) signal channel of 596 nm with channel-spacing 24 nm; (d) signal channel of 596 nm with channel-spacing 39 nm.

5 信道串扰结果讨论

当利用OOK (on-off key) 调制时, 其误码率为 $BER_{\text{OOK}} = Q(\sqrt{SNR})$, 其中

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2/2} dy;$$

当误码率为 10^{-6} 时, 所需信噪比为 13.6 dB. 根据串扰分析, 当信道间隔 ≥ 28 nm 时, 两通道之间的信道串扰不会超过 -13.6 dB (图 6(b)). 这意味着在此情况下, 如果将可见光波段 (400—760 nm) 等间隔分配信道的话, 则多光谱 WDM-VLC 系统最多可容纳 13 个信道. 但是根据 (13) 式, 每个信道都会受到另外所有信道的影响, 以相邻两侧信道的串扰最为显著 (如图 3), 再加上接收器本身噪声影响, 那么实际可容纳信道数会小于 13 个.

6 结 论

在可见光通信领域, WDM 通过增加信道个数是提高系统通信速率的有效方法. 由于光电接收器的光谱响应是固定的, 不具备光谱分辨能力, 因此通常用滤光片进行通道选择. 然而, 由于 LED 辐射光谱有一定的线宽, 当信道个数增加, 信道间隔变小时, LED 辐射光谱会出现重叠, 滤光片无法区别光谱重叠部分使得产生信道串扰. 本文基于 LED 光谱重叠现象分析了多光谱 WDM-VLC 通信系统的信道串扰问题. 首先针对 LED 光源建立了 LED 光谱模型; 然后结合可见光通信信道推导出信道串扰公式; 最后利用两通道可见光通信系统验证了信道串扰公式的正确性. 仿真和实验结果表明, 当两信道间隔大于 28 nm 时, 信道串扰不超过 -13.6 dB. 这意味着对于 OOK 调制, 在误码率达到 10^{-6} 的情况下, 多光谱 WDM-VLC 系统的信道个数不会超过 13, 考虑到每个信道都会受到另外所有信道的影响和接收器本身的噪声, 多光谱 WDM-VLC 系统在上述情况下的可容纳信道个数

会小于 13. 本文对多光谱 WDM-VLC 系统的信道串扰分析对未来可见光通信增加信道数量有一定指导作用.

参考文献

- [1] Langer K D, Grubor J 2007 *Proceedings of IEEE 9th International Conference on Transparent Optical Networks* Rome, Italy, July 1-5, 2007 p146
- [2] Lu Q F, Ji X S, Huang K Z, Luo W Y 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0706004 (in Chinese) [陆庆峰, 季新生, 黄开枝, 罗文字 2014 光学学报 **34** 0706004]
- [3] Wu Y S, Yang A Y, Feng L H, Sun Y 2013 *Chin. Opt. Lett.* **11** 030601
- [4] Sewaiwar A, Tiwar S V, Chung Y H 2015 *Opt. Exp.* **23** 13015
- [5] Komine T, Nakagawa M 2004 *IEEE Trans. Consum. Electron* **50** 100
- [6] Zhang Y L, Lan T, Gao M G, Zhao T, Shen Z M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 164201 (in Chinese) [张逸伦, 蓝天, 高明光, 赵涛, 沈振民 2015 物理学报 **64** 164201]
- [7] Cossu G, Khalid A M, Choudhury P, Corsini R, Ciaramella E 2012 *Opt. Exp.* **20** B501
- [8] Wang Y Q, Wang Y G, Chi N, Yu J J, Shang H L 2013 *Opt. Exp.* **21** 1203
- [9] Wang Y G, Huang X X, Tao L, Shi J Y, Chi N 2015 *Opt. Exp.* **23** 13626
- [10] Chang C C, Wu C T, Lee K, Woo S, Choi H G 2014 *Proceedings of the 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications* Hangzhou, China, June 9-11, 2014 p2195
- [11] Schubert E F 2003 *Light-Emitting Diodes* (Cambridge: Cambridge University Press) p89
- [12] Wen Y M, Zhao X M, Li P, Wen J, Zhang M 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 0130001 (in Chinese) [文玉梅, 赵学梅, 李平, 文静, 张敏 2012 光学学报 **32** 0130001]
- [13] Chhajed S, Xi Y, Gessmann T, Xi J Q, Shah J M, Kim J K, Schubert E F 2005 *Proc. SPIE* **5739** 16
- [14] Shen H P, Feng H J, Pan J G, Hu H Y 2005 *Proceedings of About CIE26th-China Illuminating Engineering Society Annual Meeting* Shanghai, China, November 26-27, 2005 p83
- [15] Keppens A, Ryckaert W R, Deconinck G, Hanselaer P 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 043104
- [16] Komine T, Nakagawa M 2004 *IEEE Trans. Consum. Electr.* **50** 102

Analysis of channel crosstalk in muliti-spectrum visible light communication system*

Cui Lu Tang Yi[†] Zhu Qing-Wei Luo Jia-Bin Hu Shan-Shan

(Key Laboratory of Photo-electronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 3 December 2015; revised manuscript received 31 December 2015)

Abstract

In visible light communication, the wavelength division multiplexing (WDM) technology can improve system data rate by increasing the number of channels. However, because the emission spectrum of the light emitting diode (LED) has a certain width, a phenomenon of spectral overlapping will occur when the number of channels increases and channel-spacing decreases, which results in channel crosstalk although optical filters are adopted. The channel crosstalk will restrict the capacity of WDM-VLC (visible light communication) system, which has great research significance. In this paper, the channel crosstalk based on LED spectra overlapping is discussed. The LED emission spectrum is modeled by combining the physical mechanism of LED emission with real shape of LED spectrum. According to the literature, the LED shape can be fitted greatly by Gauss function, and the full-width at half-maximum ΔE is in a range from about $4.3k_B T_j$ to $6.8k_B T_j$ when the peak wavelengths of InGaN and AlInGaN LEDs are both less than 560 nm, ΔE values range from $2.1k_B T_j$ to $3.3k_B T_j$ when the peak wavelength of InAlGaP LED is larger than 560 nm. In order to reduce the overall system complexity we use the following values: when the peak wavelength is less than 560 nm, $\Delta E = 5.5k_B T_j$; when the peak wavelength is larger than 560 nm, $\Delta E = 3.0k_B T_j$. Then, according to the overlapping spectra and VLC channel with considering optical filter transmittance and detector spectral response, the channel crosstalk formula is derived. Some quantities are given before simulation such as the semi-angle at half illuminance of an LED is 60° ; all LEDs are so closely arranged together to mix light in free space that spacing between LEDs can be ignored with respect to the propagating distance; the strongest signal situation is considered. The simulation result shows that although at the same channel spacing, different channels have different crosstalks because spectra are different. And the crosstalk from one adjacent channel will not exceed -13.6 dB when channel-spacing is larger than and equal to 28 nm, which means that when OOK modulation is used and the BER achieve 10^{-6} , the channel-spacing should not be less than 28 nm. Finally, an experiment of channel crosstalk with using two-channel WDM VLC system and LEDs with different wavelengths is conducted and the correctness of the crosstalk analysis is verified. The colors of red (635 nm), red-orange (620 nm) and amber (596 nm) LEDs are used and two of them are used each time. Two sine signals with different frequencies are launched by AWGs (Agilent 33250A) and through amplifiers and Bias-Tees, drive two LEDs. The signal analyzer (Agilent N9020A) is used to observe the signal power. The experimental results of channel crosstalk are close to theoretical results. The analysis of channel crosstalk in muliti-channel WDM-VLC system will give some guidance in increasing the number of channels for optical communication in the future.

Keywords: visible light communication, wavelength division multiplexing, spectra overlap, channel crosstalk

PACS: 42.79.Sz, 85.60.Jb

DOI: 10.7498/aps.65.094208

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB329202), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61571067).

[†] Corresponding author. E-mail: tangyi4510@bit.edu.cn