

高速自适应无源光网络的功率优化

李立, 李宏杰, 赵建周

(安阳工学院 电子信息与电气工程学院, 河南 安阳 455000)

摘要: 为了在非线性约束条件下达到最大传输距离所需的最佳发射功率, 软件定义光纤接入网是发展的必然趋势。就线速为 STM-16 和 STM-64 在不同波数 (4λ 、 8λ 和 16λ) 条件下的商用波分复用无源光网络 (WDM-PON), 分别对最大传输距离和最佳传输功率进行了建模分析。该网络模型由标准单模光纤 SSMF-28、采用 1:64 的无源光分路器的远端 (RN)、光线路终端 (OLT) 和光网络单元 (ONU) 组成。为了提高网络利用率和接收端接收效率, 分析了不同波长数和传输距离对高速 WDM-PON 系统的性能影响; 以节约功耗为目的, 在发射功率方面, 优化了每一个多波段 PON 的功率配置。

关键词: 下一代光接入网; 波分复用无源光网络; 功率优化

中图分类号: TN929.11; TN914 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2020)05-0023-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.05.006

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Power optimization of high-speed adaptive passive optical networks

LI Li, LI Hongjie, ZHAO Jianzhou

(Departments of Electronic Information and Electrical Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang Henan 455000, China)

Abstract: In order to obtain the optimum transmitting power required to reach the maximum transmission distance under nonlinear constraints, makes it possible for software to customize optical access network. For the commercial wavelength division multiplexing passive optical network (WDM-PON) with STM-16 and STM-64 of external modulators are modeled and analyzed under different wavenumbers (4λ , 8λ and 16λ). The power of optimum transmitting and maximum transmission distance are analyzed, respectively. Network model were composed of standard single-mode fiber SSMF-28, 1:64 passive fiber branching at its far end (RN), optical line terminal (OLT) and optical network unit (ONU). In order to improve the network utilization and receiving efficiency, the influence of different wavenumbers and transmission distances on the performance of high data rate WDM-PON system is analyzed. In order to save power consumption, the configuration of each multi-band PON is optimized in terms of transmission power.

Key words: next generation optical access network; wavelength division multiplexing passive optical network; power optimization

0 引言

近年来, 由光接入网和无源光网络 (PON) 构成的宽带连接骨干网被认为是最有前途的光网络解决方案, 这是因为其为个人、企业用户提供了高性价比的

收稿日期: 2019-10-06。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61762039) 资助; 河南省科技厅科技攻关项目 (172102310671) 资助; 安阳工学院培育基金项目 (YPY2019004) 资助。

作者简介: 李立 (1984—), 男, 河南安阳人, 副教授, 主要从事光接入网技术研究。美国光学学会会员 (OSA)、河南省仪器仪表学会理事, 河南省青年骨干教师。近 5 年主持完成省市科研项目 6 项, 获得省市级科研成果 6 项, 发表学术论文 15 篇, 其中 SCI、EI 期刊检索 10 篇, 参编教材 3 部, 获国家各类专利 4



宽带服务^[1,2]。

随着 100 Gb/s 和未来超 100 Gb/s 光传输技术时代的到来, 仅仅通过采用更高阶调制码型来进一步提升频谱利用率已经不具备长距离、大容量应用的意义^[3,4]。因此, 2011 年, 在雅虎、Google 和德国电信等公司倡议下成立了网络基金会 (ONF), 主要关注软件定义网络 (SDN) 及 OpenFlow 技术的标准化和商业化^[5]。SDN 最初由美国斯坦福大学的研究组提出, 并于 2007 年率先提出并开发了 OpenFlow 协议, 通过开放的流表支持用户对网络功能行为进行控制。软件定义光纤接入网是 SDN 概念在光网络上的扩展, 以实现光网络统一、灵活和集成的控制需求, 实现了由控制功能与光传输功能的紧耦合到控制功能与运营能力的紧耦

合,由以连接过程为核心的闭合控制到以组网过程为核心的开放型控制的转变^[6,7]。软件定义光纤接入网包含灵活收发器技术、灵活交换技术和软件可编程控制技术这三大关键技术。而灵活收发器技术主要基于相干接收和发射端数字信号处理(DSP)技术,通过优化符号速率、调制格式和载波数量3个参数来满足传输速率和传输距离要求,同时尽可能占用更少的频谱带宽^[8-10]。

本文建立树形拓扑结构的波分复用无源光网络(WDM-PON),在无任何光或电补偿条件下对比分析4λ、8λ和16λ波长的STM-16和STM-64的发射功率,讨论不同传输距离和速率条件下的自适应网络接入问题^[11]。

1 自适应 PON 架构

在C波段信道上调制的2.5 Gb/s(STM-16)或10 Gb/s(STM-64)速率的自适应PON原理图如图1所示。使用波分复用多路复用器(WDM-MUX)复用4~16个波长,并在光线路终端(OLT)使用掺铒光纤放大器(EDFA)对其进行放大。1:64分频器将信号平均分配到远端节点(RN)的光纤的每个分支上。光网络单元(ONU)连接到无源分配器的每个分支,每个ONU的信号分别连接到3R电路、误码率分析仪和眼图分析仪,其中接收机响应度为1 A/W。ONU由PIN光电二极管和高斯滤波器组成。由于放大器放置在OLT上,并且OLT和ONU之间的组件是无源的,因此可以满足PON标准。

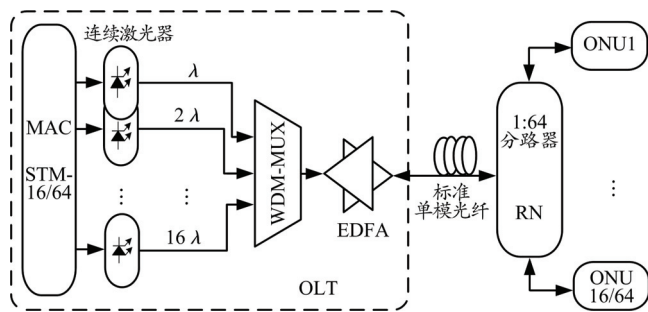


图1 速率自适应PON原理图

本文采用Optisystem15.0搭建系统,按照ITU-T规范的标称中心频率设置光载波频率参数:下、上行信号的波长均为C波段,其信道间隔为100 GHz,且分别开始于1561.42 nm(192 THz)和1533.47 nm(195.5 THz)。在OLT中,发送端由连续激光器和WDM-MUX组成,并通过EDFA进行放大,设置

WDM-MUX的插入损耗为3 dB,EDFA的增益和噪声系数分别为20 dB和7 dB。考虑群速度色散、三阶色散、自相位调制(SPM)和交叉相位调制(XPM)的实际影响,光纤采用衰减系数为0.2 dB/km、色散斜率为0.075 ps/(nm²·km⁻¹)、色散系数为16 ps/(nm·km⁻¹)和非线性系数为1.3 W⁻¹·km⁻¹的康宁标准单模光纤SSMF-28。RN带有一个1:64分频器,其损耗为18 dB,插入损耗为3 dB。ONU由10 GHz带宽的高斯滤波器以及灵敏度为1 A/W、暗电流为0.1 nA和热噪声为10⁻²² W/Hz的PIN光电二极管构成。3R电路由截止频率为7.5 GHz、插入损耗为0 dB和深度为100 dB的高斯低通滤波器(LPF)实现电信号的检测和恢复。

2 仿真结果与讨论

2.1 最佳发射功率

本文依照图1建立模型,按照NG-PON2标准,分别对4λ、8λ和16λ波长的最大和最佳发射功率进行了仿真分析。设定STM-16和STM-64的激光发射功率在-14~-2 dBm之间变化,得到平均Q因子和激光器发射功率的关系如图2和图3所示。

按照NG-PON2标准,多波长PON的传输性能可

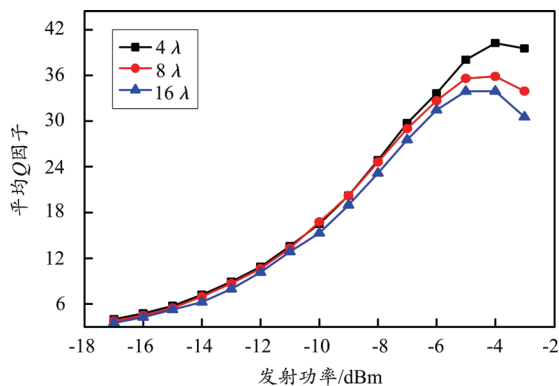


图2 平均Q因子与激光器发射功率的关系图(STM-16)

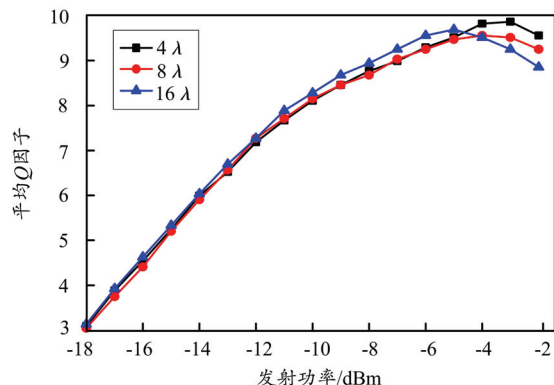


图3 平均Q因子与激光器发射功率的关系图(STM-64)

由各信道的平均 Q 因子进行衡量, 并认为当 Q 因子大于 6 时, 其传输性能被认为是无差错传输^[12,13]。从图 2 和图 3 可以看出, 平均 Q 因子随发射功率的增加而增加。最佳发射功率是在所有波长上均达到无差错传输时所需的最小功率, 最大发射功率是传输性能 (以 Q 因子表示) 达到峰值的功率。不同条件下最佳发射功率和最大发射功率值如表 1 所示。

表 1 速率自适应 PON 在 40 km 处的最佳和最大发射功率

波长数	STM-16		STM-64	
	最佳发射功率/dBm	最大发射功率/dBm	最佳发射功率/dBm	最大发射功率/dBm
4	-14	-4	-12	-3
8	-14	-4	-12	-4
16	-13	-5	-12	-4

根据仿真可知, 激光器发射功率的增大将引起光纤中非线性信号的衰减, 因此 PON 的发射功率被严格限制在最佳发射功率和最大发射功率之间, 则与发射功率有关的 PON 性能也被限制在最佳发射功率与最大发射功率之间。根据部署的实际配置, 功耗会进一步降低。分析表明^[14], NG-PON2 标准中最佳用户数为 64 个。若为了更大覆盖范围、更多用户数, 发射功率可以从最佳功率级别增加到最大功率级别, 在 FSAN 标准范围内以牺牲功率效率获得相应性能。

2.2 PON 覆盖范围分析

本文对比分析了 STM-16 和 STM-64 的有效覆盖范围, 分别分析了最佳发射功率和最大发射功率条件下各自的传输距离和 Q 因子的关系。按照 FSAN 标准, 根据 RN 的 1:64 分频器后的平均 Q 因子进行衡量, 得到 STM-16 和 STM-64 PON 的光传输性能分别如图 4 和图 5 所示。

从图 4 可以看出, 在表 1 列出的最大发射功率条件下, 当平均 Q 因子为 6 时, 对于 STM-16 PON, 4 λ 达到的传输距离为 83 km, 8 λ 为 81 km, 16 λ 为 77 km。从图 5 可以看出, 在表 1 列出的最大发射功率下, 当平均 Q 因子为 6 时, 对于 STM-64 PON, 4 λ 达到的传输距离为 81 km, 8 λ 为 76 km, 16 λ 为 75 km。另外, 从图 4、图 5 可知, 按照 NG-PON2 标准^[14],

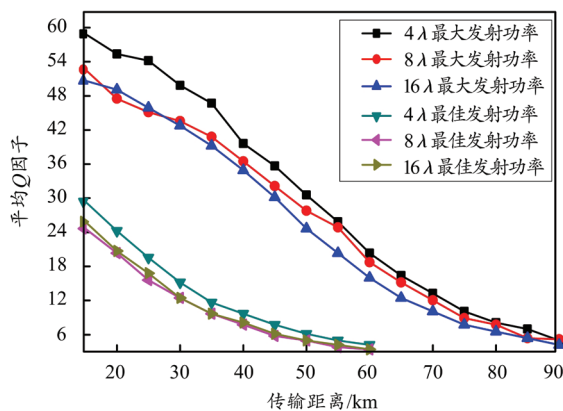


图 4 平均 Q 因子与传输距离的关系图 (STM-16)

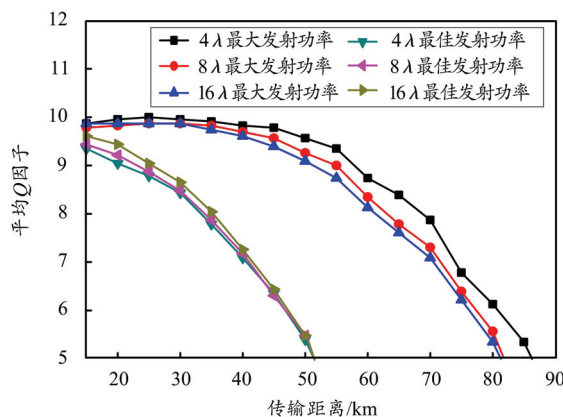


图 5 平均 Q 因子与传输距离的关系图 (STM-64)

最佳发射功率不仅可以满足 40 km 的无差错传输要求, 而且 PON 可以有效利用 OLT 的发射功率。

2.3 光谱特性分析

根据之前的分析, 随着激光发射功率的增大将引起光纤中非线性信号的衰减, 因此本文将从光谱的角度进一步分析不同线速条件下的传输性能。STM-16 线速下对 4 λ 、8 λ 和 16 λ 的 WDM-MUX 处的多路复用光谱进行分析, 取 40 km 无补偿传输后 RN 处的光谱图, 得到最大发射功率和最佳发射功率传输后的光谱图分别如图 6 和图 7 所示。

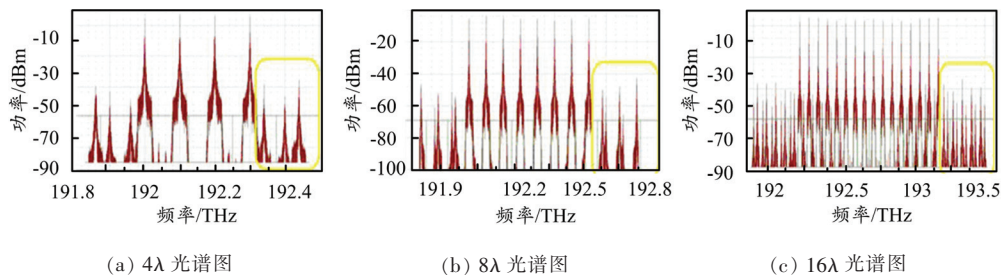


图 6 最大发射功率条件下的光谱图 (STM-16)

从图 6 和图 7 可以看出,随着波长数量的增加,光纤输出端的非线性增加,并导致本底噪声增加。最大发射功率时,光纤的非线性比在最佳发射功率时更突出。

同样条件下线速 STM-64 的光谱图如图 8 和图 9 所示。结合图 8 和图 9 可以看出,随着波长的数量从 4 λ 增加到 16 λ ,光纤的非线性增加,从而增加了本底噪声。另外,本文将图 8、图 9 与图 6、图 7 进行了对比,可以发现,高数据速率调制时,STM-64 的频谱更加密集。由于光纤的长度会线性增加信号衰减,并且高发射功率会在光纤传播过程中引入非线性。因此,在预算传输距离之前,有必要优化发射功率。在最佳发射功率水平和最大发射功率水平下每种配置的性能参数如表 2 所示。

根据 ONU 的范围,可进一步优化发射功率,并降低功耗。本文按照以上讨论的系统模型,得到了最佳和最大发射功率对应的传输距离,其详细参数如表 3 所示。

本文得到的速率自适应 PON 的参数配置结果可以用于根据用户的位置和数据速率需求自适应地为现有和新用户提供服务。本文以节约功耗为目的,在发射功率方面,优化了每一个多波段 PON 配置,使软件自定义光纤接入网成为可能。

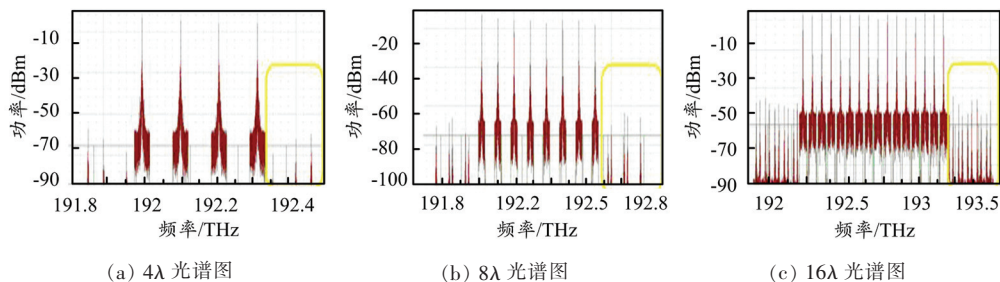


图 7 最佳发射功率条件下的光谱图(STM-16)

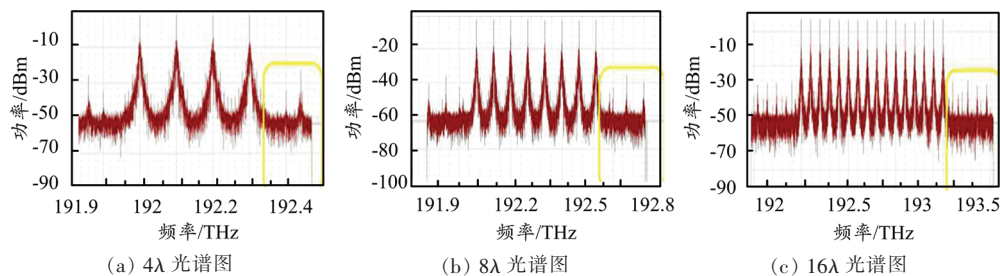


图 8 最大发射功率条件下的光谱图(STM-64)

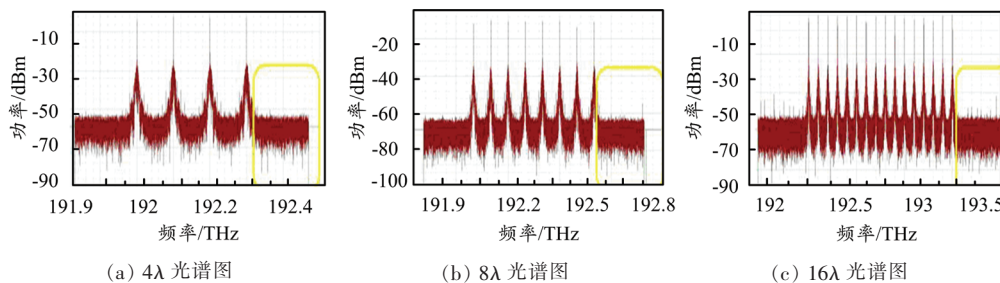


图 9 最佳发射功率条件下的光谱图(STM-64)

表 2 最佳传输性能参数

波波长数	STM-16 最佳发射功率时的 Q 因子		STM-64 最佳发射功率时的 Q 因子		STM-16 最大发射功率时的 Q 因子			STM-64 最大发射功率时的 Q 因子		
	传输距离	传输距离	传输距离	传输距离	传输距离	传输距离	传输距离	传输距离	传输距离	传输距离
	20 km	40 km	20 km	40 km	20 km	40 km	60 km	20 km	40 km	60 km
4	19.84	6.71	9.07	7.16	61.66	44.30	20.18	10.20	10.38	9.34
8	19.43	6.64	9.25	7.14	56.99	41.69	19.99	10.31	10.28	8.80
16	23.52	8.07	9.44	7.23	55.92	37.02	16.01	9.95	9.95	8.54

表 3 最佳传输距离参数

波波长数	最佳发射功率时的最大传输距离/km		最大发射功率时的最大传输距离/km	
	STM-16	STM-64	STM-16	STM-64
4 λ	40	40	83	81
8 λ	40	40	81	76
16 λ	40	40	77	45

3 结束语

本文在不同模式,不同波数等条件下,通过对 Q 因子和光谱图的分析,高速自适应 PON 在 STM-16 和 STM-64 的最佳功率水平(波长范围为 $4\lambda \sim 16\lambda$)下,可以满足 NG-PON2 标准下 1:64 的用户实现 40 km 的无差错传输。在最大发射功率下,传输过程中非线性带来的影响随着数据速率和波长数量的增加而进一步增加。对于高速自适应 PON,在 40 km 的传输距离内实现了功率优化。在 STM-16 线速下,对于 4λ 、 8λ 和 16λ 的最佳发射功率分别为 -14 dBm、-14 dBm 和 -13 dBm;而在 STM-64 线速下, 4λ 、 8λ 和 16λ 的最佳发射功率均为 -12 dBm。针对目前及今后一段时间内多波长和多标准 PON 并行存在的特点,本文分析了在非线性约束的条件下,达到最大传输距离时所需的功率。同时,以节约功耗为目的,在发射功率方面,对每个多波段 PON 优化配置,使其能够在不同标准的多个波长同时共享同一个 ODN,使软件自定义光纤接入网成为可能。

参考文献:

- [1] 侯林林, 马勇. 一种光接入网的组播隔离方案 [J]. 光通信技术, 2018, 42(3): 56-58.
- [2] WANG W, MA S, LI B, et al. Coflex: Navigating the fairness-efficiency tradeoff for coflow scheduling[C]//IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications. May 1-4, 2017, Atlanta, GA, USA. New York: IEEE, 2017: 1-9.
- [3] AREVALO G V, HINCAPIE R C, GAUDINO R. Optimization of multiple PON deployment costs and comparison between GPON, XGPON, NGPON2 and UDWDM PON[J]. Optical Switching and Networking, 2017 (25): 80-90.
- [4] BUTT R A, IDRUS S M, QURESHI K N, et al. Improved dynamic bandwidth allocation algorithm for XGPON [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(1): 87-97.
- [5] SHEN W, JUN W, WU Y, et al. 可编程软件定义网络的新架构与安全技术: 综述 (英文)[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2018, 19(12): 1500-1522.
- [6] 张海懿, 赵文玉, 李芳, 等. 宽带光传输技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [7] 曹畅, 唐雄燕, 王光全. 光传送网: 前沿技术与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [8] LIN Y D, LIU T L, WANG S H. Proactive multipath routing with a predictive mechanism in software-defined networks [J/OL]. International Journal of Communication Systems, 2019, 32(14)[2019-05-23]. <https://doi.org/10.1002/dac.4065>
- [9] MURTAZA C, ALI C. SDN-based wireless body area network routing algorithm for healthcare architecture[J]. ETRI Journal, 2019, 41(4): 1-13.
- [10] ELMAGZOUB M A, MOHAMMAD A B, SHADDAD R Q, et al. Physical layer performance analysis of hybrid and stacked TDM-WDM 40G-PON for next generation PON[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(20): 6194-6197.
- [11] 任丹萍, 武姗姗, 张丽静. EPON 中基于软件定义网络的带宽优化节能机制[J]. 光通信技术, 2015, 39(8): 33-36.
- [12] KAUR A, SINGH M L, SHEETAL A. Simulative analysis of co-existing 2.5G/10G asymmetric XG-PON system using RZ and NRZ data formats[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(14): 3637-3640.
- [13] BINDHAIQ S, SUPAT A S M, ZULKIFLI N, et al. Recent development on time and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation passive optical network stage 2 (NG-PON2)[J]. Optical Switching and Networking, 2015(15): 53-66.
- [14] International Telecommunication Union (ITU). 40-Gigabit-Capable Passive Optical Networks (NG-PON2): Definitions abbreviations and acronyms, ITU-T G.989.1-2015[S]. Switzerland: ITU-T, 2015.

新书推荐

《高速可见光通信关键技术》是国家重点研发计划项目“可见光通信关键技术及系统研发”研究团队的集体成果,是国之重器出版工程系列书之一。作者迟楠是该领域的知名专家,多次得到中央电视台、凤凰台和英国 BBC 等媒体的报道。

该书主要介绍了基于 LED 的高速可见光通信的技术原理。首先,给出了可见光通信的基本概念,对其发展历史进行了追溯,同时对其研究趋势进行了展望;其次,分别从高速可见光的系统结构、信道建模、调制技术、均衡技术和编码技术、复用技术和新材料技术等方面具体介绍了实现高速可见光通信所采用的先进技术和关键算法;接着,介绍了高速 VLC 通信系统实验,给出了本研究团队基于本书介绍的技术理论基础之上的实验成果;最后,对高速可见光通信技术的未来进行了展望。

本书适合从事通信领域尤其是可见光通信研究的工程技术人员,以及高等院校通信工程等相关专业的研究生和教师阅读。

