

重庆大学线上学术讲座

可见光通信挑战与研究现状

邓雄 副教授
信息光子与通信研究中心
西南交通大学-信息科学与技术学院

2021年6月22日
中国，重庆



西南交通大学
Southwest Jiaotong University

TU/e

Technische Universiteit
Eindhoven
University of Technology

Where innovation starts

汇报大纲



个人基本情况



前期学术成果



总结

个人基本情况



主要教育工作经历

- 2021. 05-至今 西南交通大学 信息科学与技术学院 信息光子与通信研究中心 副教授
- 2018. 04-2021. 04 荷兰埃因霍温理工大学 电子电气工程学院 博士后
- 2013. 09-2018. 04 荷兰埃因霍温理工大学 电子电气工程学院 博士

导师：Jean-Paul Linnartz教授 (**IEEE Fellow, Philips Research Fellow**)

研究方向及成果简介

主要研究方向为**无线光通信、光载无线、微波光子**，专注于**系统理论模型分析、信号处理算法及光电系统实现及应用**。在无线光通信领域**首次提出**基于LED物理模型的预失真算法、创新性研究驱动电路干扰对通信系统影响并提出解决方案、建立LiFi系统功耗模型等。共发表**论文60余篇**及撰写飞利浦技术文档，申请**专利 6 项**，包括物理光学顶级杂志Photonics Research、Laser Photonics Reviews、Optics Express，通信领域顶级杂志期刊IEEE Com. Mag.、IEEE Trans. Comm.、IEEE Trans. Wireless Comm.、IEEE Trans. Vehi. Tech.，功率电子顶级期刊 IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.邀稿文章等。参与过多个国际科研和产业化项目，如欧盟H2020信息技术ELIOT项目致力于将LiFi技术与物联网技术融合、飞利浦LiFi产品研发项目等。担任国际会议TPC、国际重要期刊客座编辑及审稿人。

研究领域及背景

可见光通信在微小区
通信中具有独特优势

- 通信网络小区 (Cells) 越来越密集



20s

Trans Atlantic
Morse Code



60s

Clear AM
channels



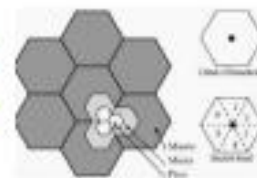
70s

FM Radio



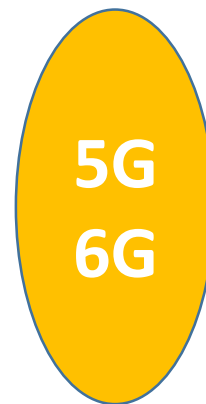
80s

Cellular
Reuse



90s

Cell splitting



21 世纪

Channels

Channels/Hz

Channels/Hz
/country

Traffic/Hz/km²

Channel/Hz/m²

Coverage area, "cell" size

5000 km

300 km

30 km

3 km

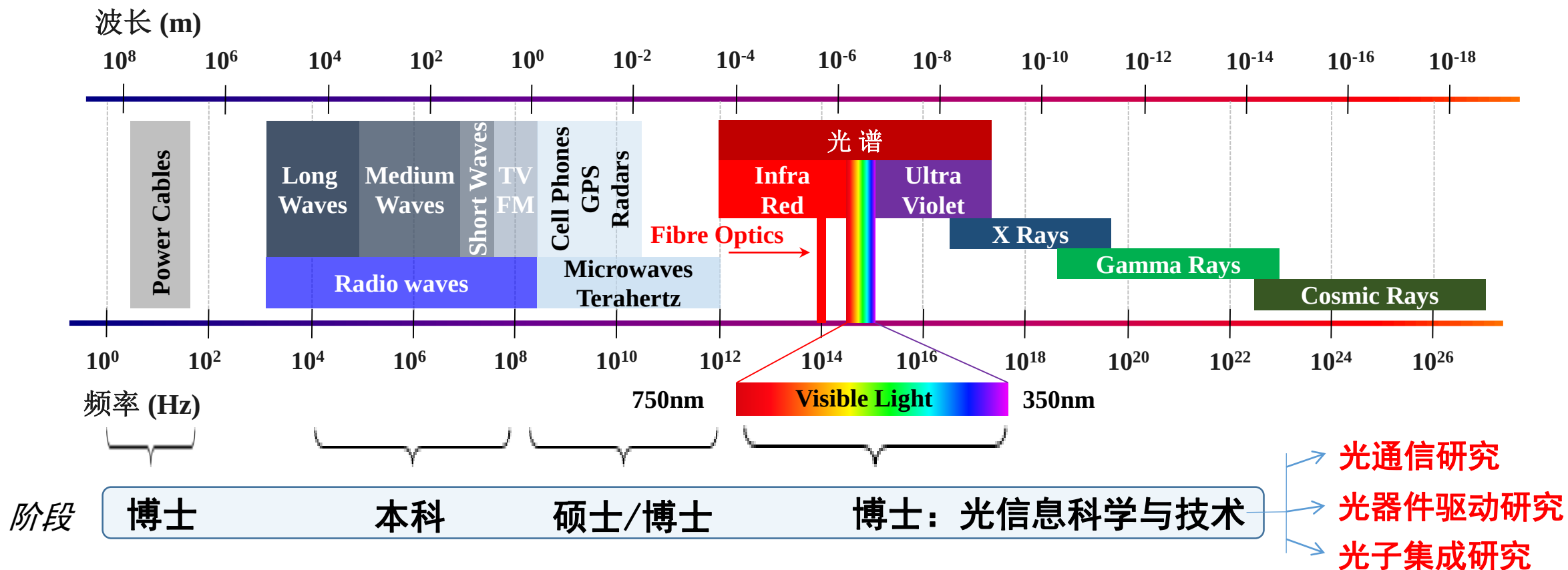
300 m

1-10 m



研究领域及背景

□ 频谱资源



□ 研究层次



可见光通信LiFi技术

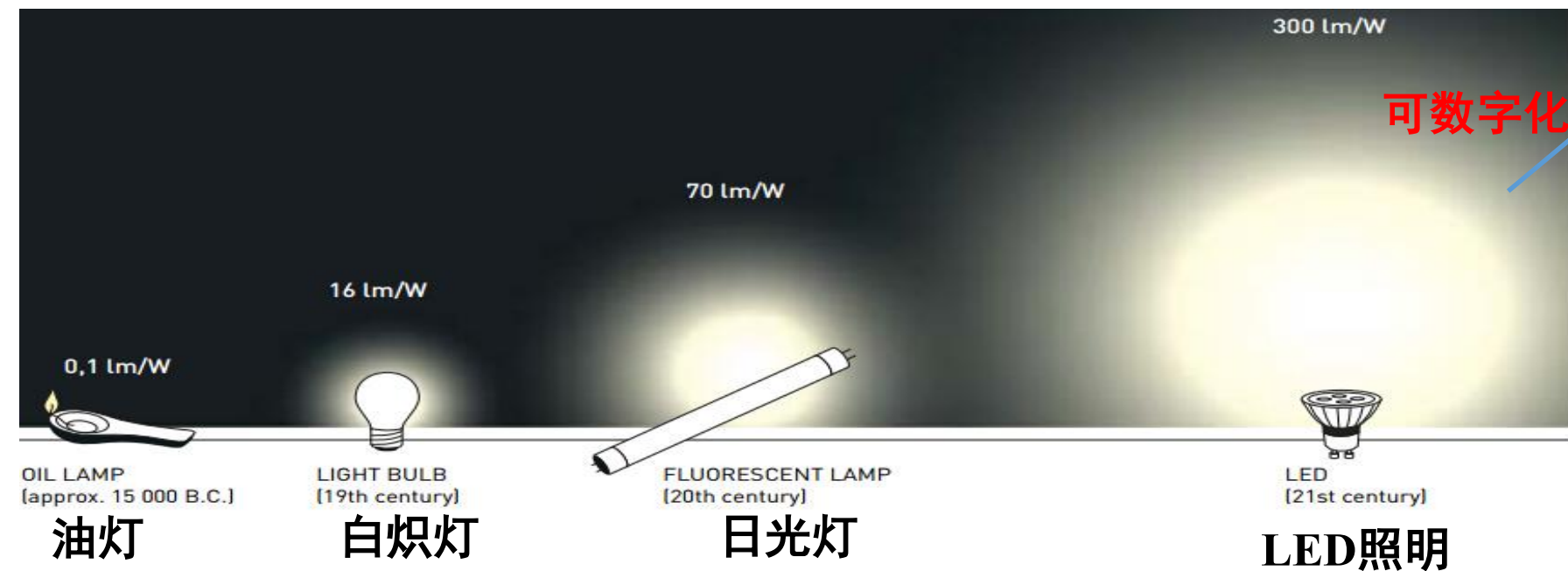
可见光通信

- 与照明融合
- 无电磁干扰
- 低成本
- 低功耗
- 对人体无害
- ...

6G新频谱通信关键技术

- [2019-中兴通讯：6G移动通信网络愿景、挑战与关键技术](#)
- [2021-IMT-2030\(6G\)推进组：《6G总体愿景与潜在关键技术》白皮书](#)

可数字化



室内通信



室内导航



机舱内网络接入

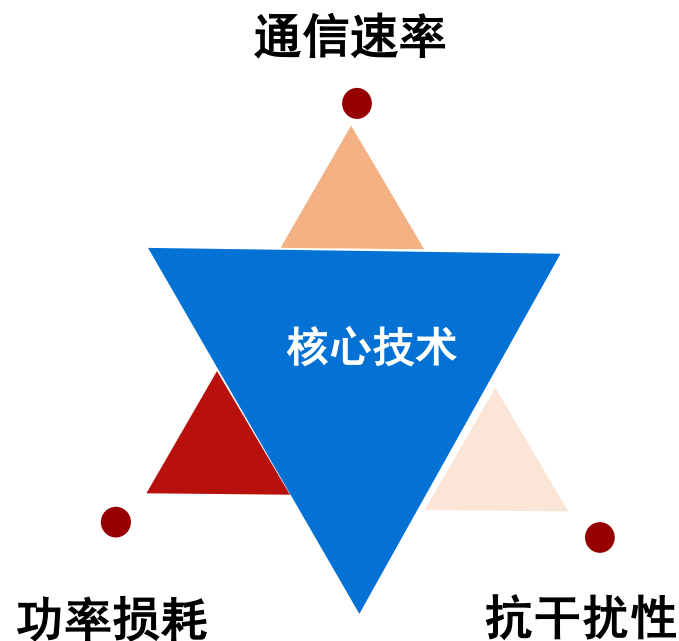


汽车导航/雷达

创新成果

申报人承担了可见光通信 LiFi 三个核心技术研究课题，包括LiFi 通信速率研究、 LiFi 功率损耗研究以及系统抗干扰研究。

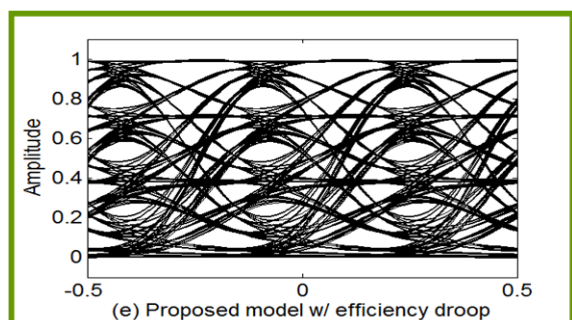
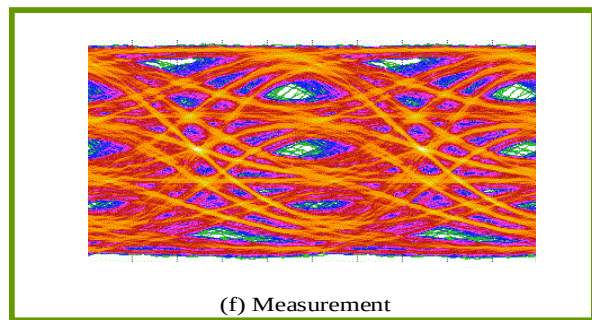
- **速率研究成果**（**一个信道模型，两个通信算法**）：创新性提出基于量子井速率方程的LED信道非线性数字模型及预/后失真方案，研究LED信道下 Bit-power loading算法，显著提高LiFi通信速率。
- **功耗研究成果**（**电路模型**）：创新性研究LiFi调制器、LED功耗机制，建立功耗模型，降低LiFi通信功耗。
- **干扰研究成果**（**系统模型**）：创新性建立驱动器纹波的系统干扰模型，分析非高斯噪声干扰下LiFi系统性能，丰富LiFi系统理论。



充分理解LED发光机理，建立LiFi系统功耗模型，提高LiFi系统抗干扰性能，
最终促进可见光通信LiFi的技术成熟及产业化。

创新成果1：LED信道非线性模型及算法

LED非线性的影响



LED非线性是进一步提高可见光通信速率的关键，因为该通信眼图中的**不对称闭合**和眼图中的**右偏现象**，传统通信技术无法修复。

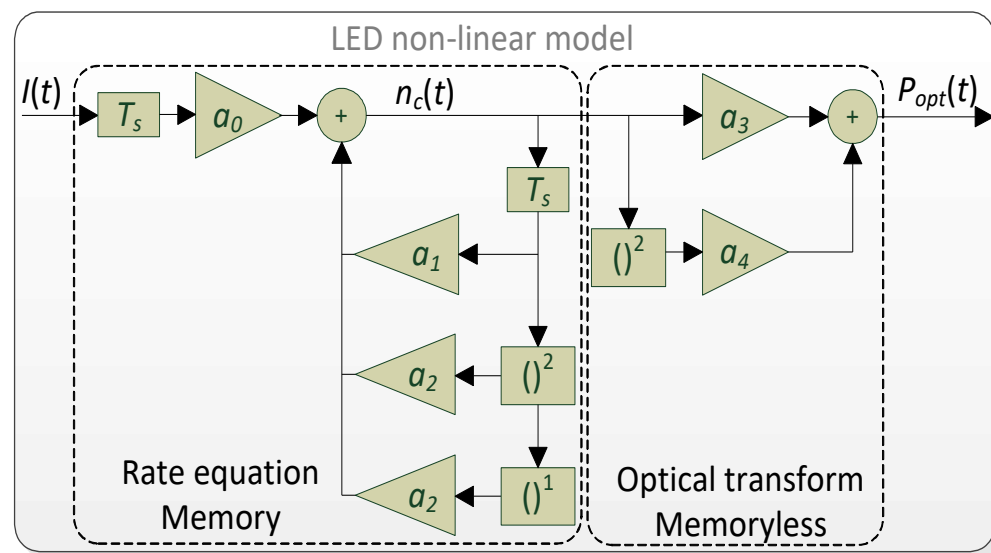
❖ 通信眼图是一种有效定性衡量信道特征及信号完整性的方法。

单抽头离散时间LED非线性模型

我们从LED量子阱(QW)中的**物理发光机制**出发，真正理解产生这些非线性的根源。

$$n_c(t + T_s) \approx n_c(t) + T_s \frac{dn_c(t)}{dt} \approx \frac{T_s I(t)}{q t_w A_w} + [1 - (B_r p_0 + A_{nr}) T_s] n_c(t) - B_r T_s n_c^2(t) - C_{nr} T_s n_c^3(t),$$

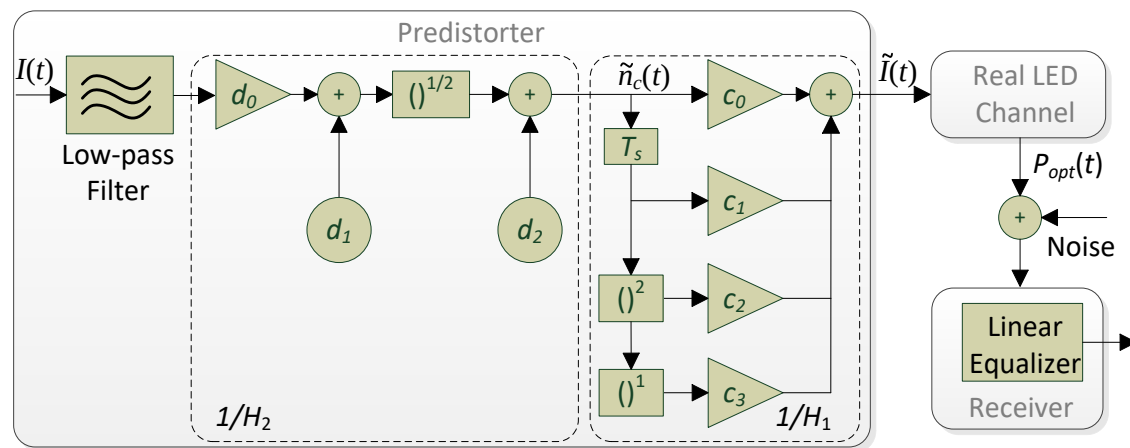
where the numerical LED nonlinear model is based on the Euler's method.



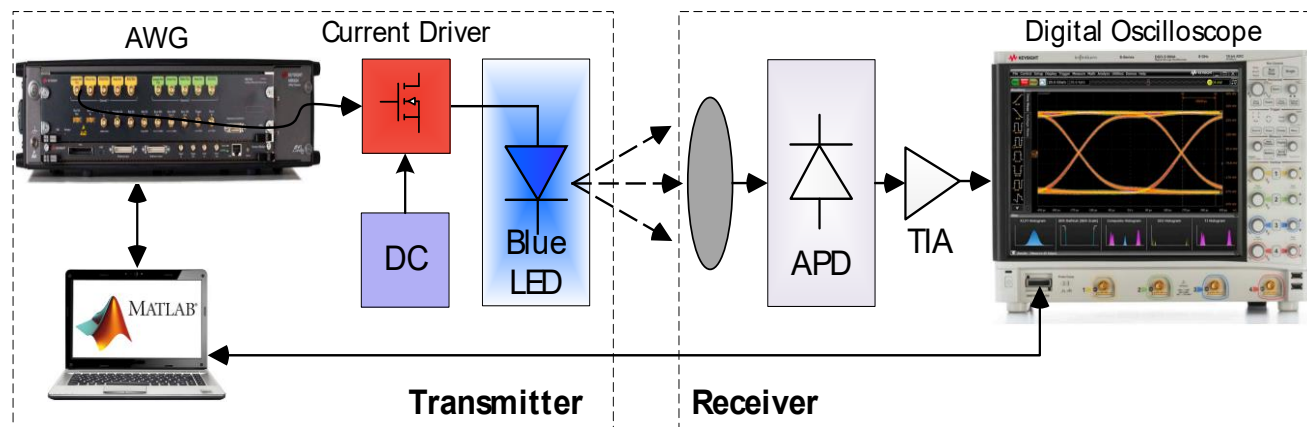
领域首次提出基于量子阱速率方程的LED非线性数字模型

创新成果1：LED信道非线性模型及算法

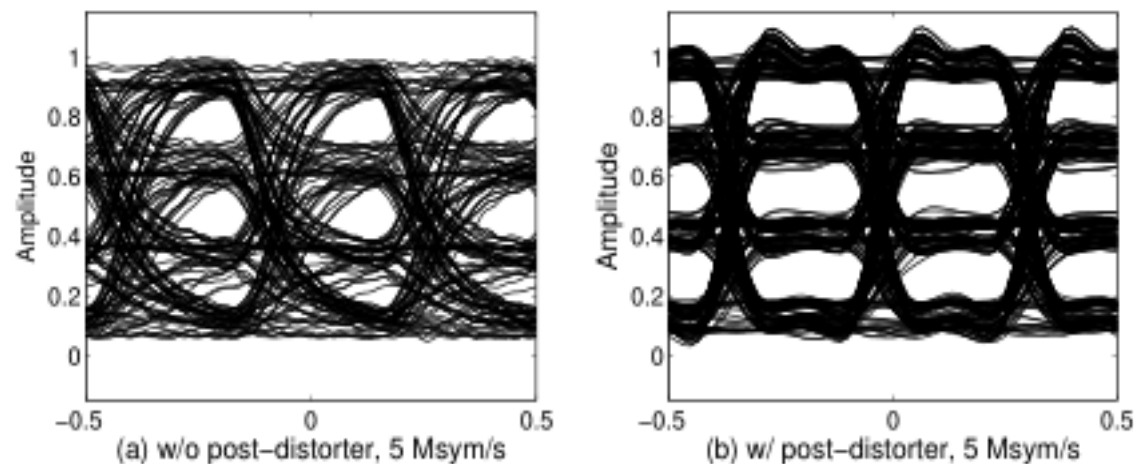
领域首次提出基于速率方程的LED非线性预失真方案



实验验证



实验结果



工作意义

- 我们创新的方法将可见光通信速率提高数十倍(25倍已验证)。这是该领域的重大突破。
- 该方法可以直接应用于宽带Micro LED，进一步提高无线光通信传输速率。

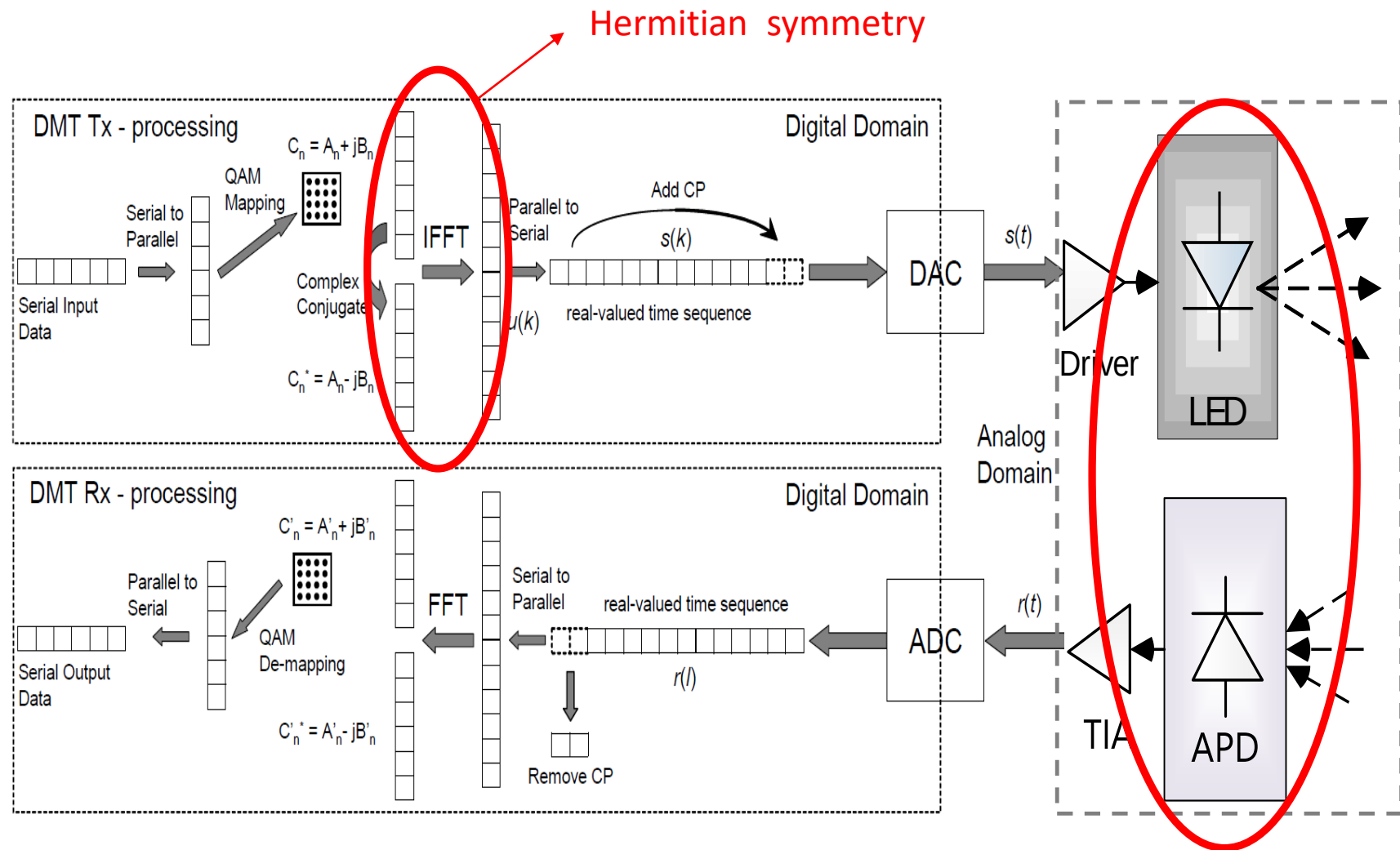
通信领域旗舰杂志及顶级会议

1. X. Deng et al., *IEEE Trans. on Comm.* 2018. (IF:4,7)

2. X. Deng et al., *IEEE Globecom* 2018.

创新成果1：LED信道下低复杂度Bit-Power loading算法

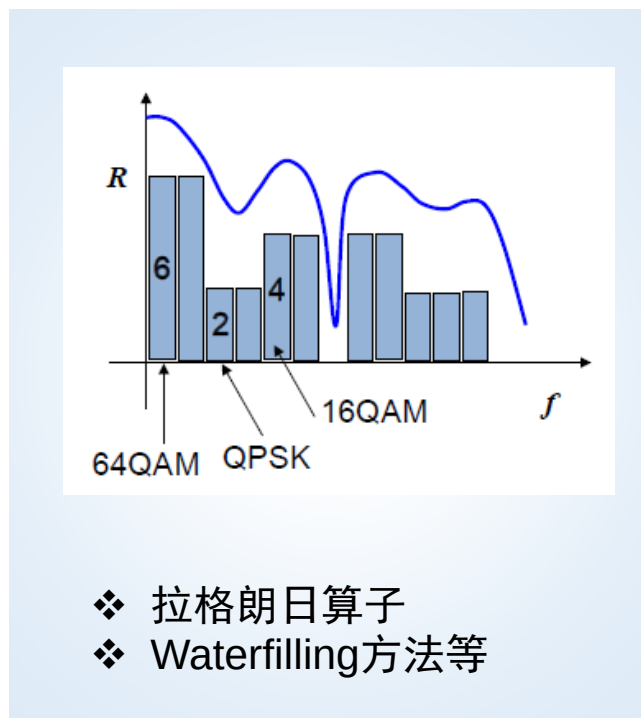
□ ITU G.9991 (G.vlc) 等LiFi标准



□ 速率优化

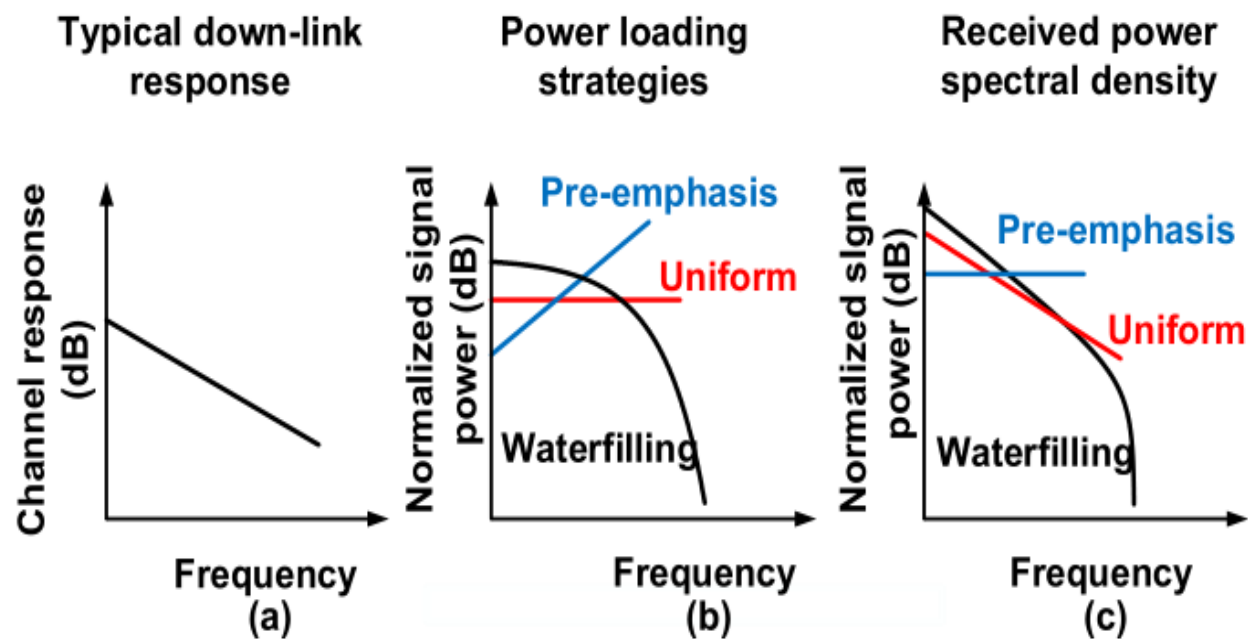
$$\max \int_f \ln \left(1 + P(f) \frac{|H(f)|^2}{N_0} \right) df$$

$$\text{subject to } \int_f P(f) df \ll P_{tot}$$



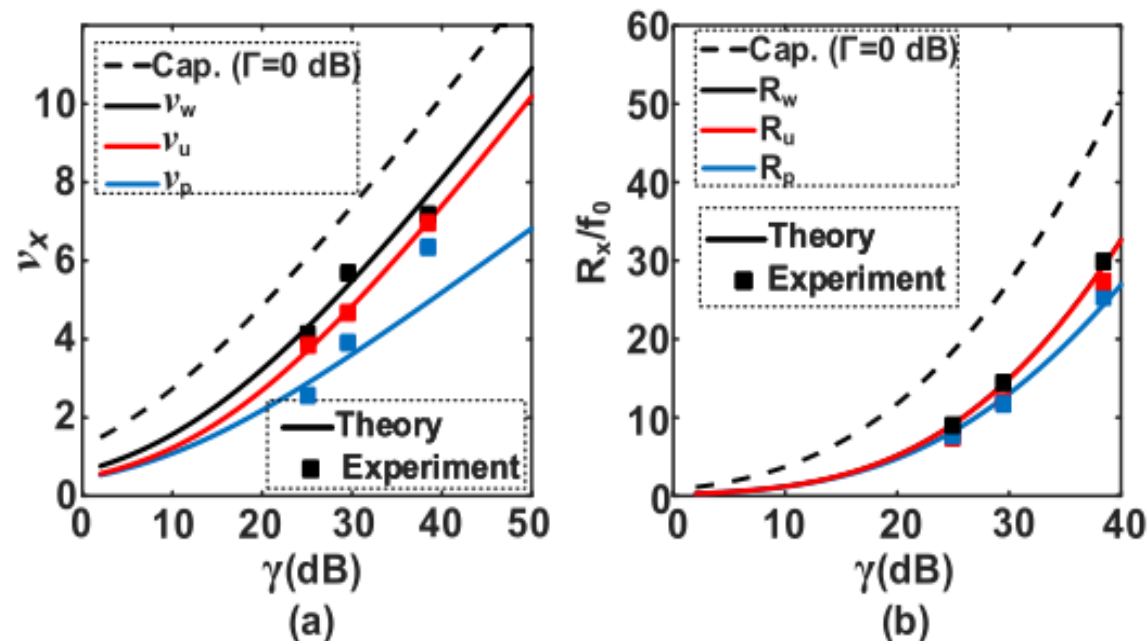
创新成果1：LED信道下低复杂度Bit-Power loading算法

□ Bit-Power loading方式



- LED信道具有平滑的频率响应。
- 在LED信道中，Uniform power loading 和最优Waterfilling方法具有相似香农信息速率。
- Pre-emphasis预加重方法信息速率低，但所需的系统带宽最低。

□ 理论/实验系统带宽及速率



通信领域旗舰杂志及顶级会议

1. S. Mardani, X. Deng et al., *IEEE Trans. on Comm.*, 2019. (IF:5.7) (通讯作者)

2. S. Mardani, X. Deng et al., *IEEE Globecom* 2018.

创新成果1: LiFi 国际标准贡献

May 2019

doc.: IEEE 802.11-19/xxxxr0

Introduction to the G.9991 PHY and its relevance to TGbb

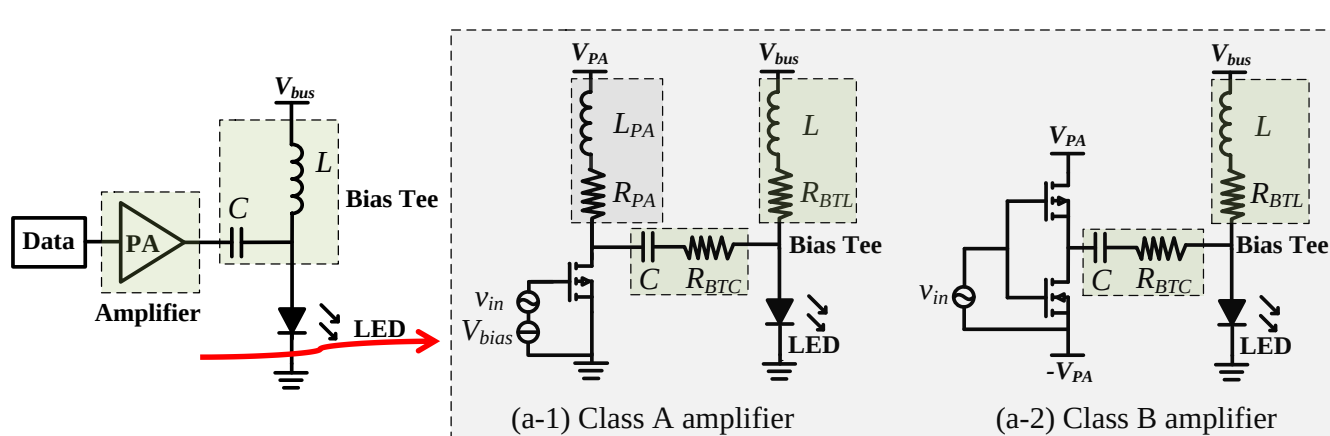
Date: 2019-05-12

Authors:

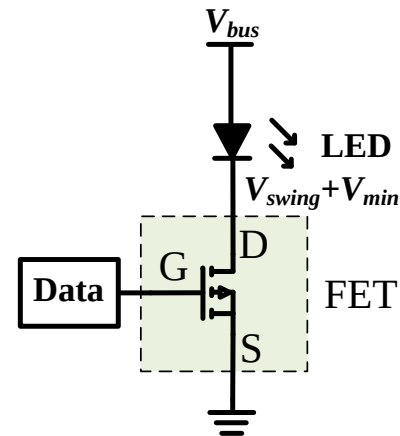
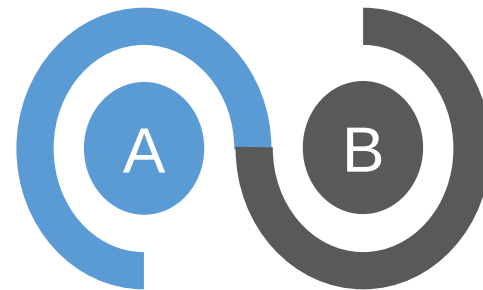
Name	Affiliations	Address	Phone	email
Kai Lennert Bober	Fraunhofer HHI			
Marc Emmelmann	Fraunhofer FOKUS			
Volker Jungnickel	Fraunhofer HHI			
Ancuta Corici	Fraunhofer FOKUS			
Deng Xiong	TU Eindhoven			

<https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/19/11-19-0865-00-00bb-lc-optimized-phy-for-tgbb.pptx>

创新成果2：调制器功率损耗



Bias-T based



Serial-FET based

□ 串行调制结构中量化的额外功率损耗总结

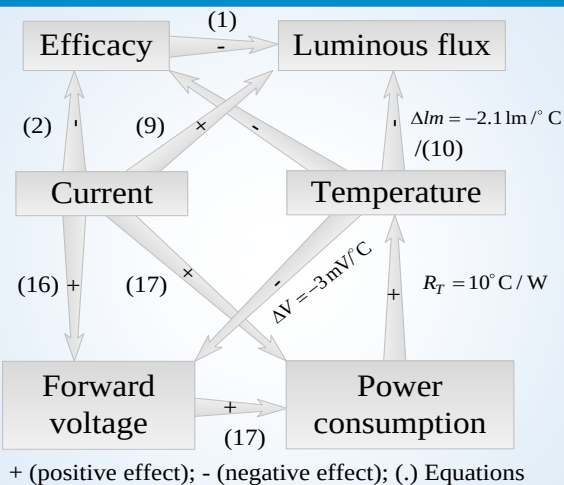
Cases	Normalized extra supply power for signal [†]		Serial-F (P_{SF})	Power consumption
	Class A	Class B		
General expression	α_{peak}^2	$\alpha_{peak}^2 \mathbb{E}[\alpha(t)]$	α_{peak}	N/A
$\alpha_{rms} = \alpha_{peak} = 1$ (OOK [*])	1	1	1	$P_{BT} = P_{SF}$
$\alpha_{peak} = \sqrt{2}\alpha_{rms} \leq 1$ (DCO-BPSK)	α_{peak}^2	$2\alpha_{peak}^2/\pi$	α_{peak}	$P_{BT} < P_{SF}$
$\alpha_{peak} = 3\alpha_{rms} \leq 1$ (DCO-OFDM)	α_{peak}^2	$\alpha_{peak}\alpha_{rms}\sqrt{2/\pi}$	α_{peak}	$P_{BT} < P_{SF}$



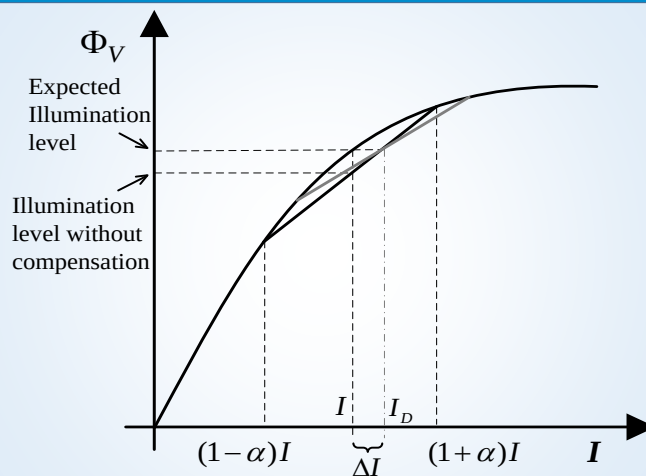
X. Deng et al., *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2018 (IF: 5.4)

创新成果2: LED功耗模型

影响LED光输出的因素



LED输出/输入是非线性特征

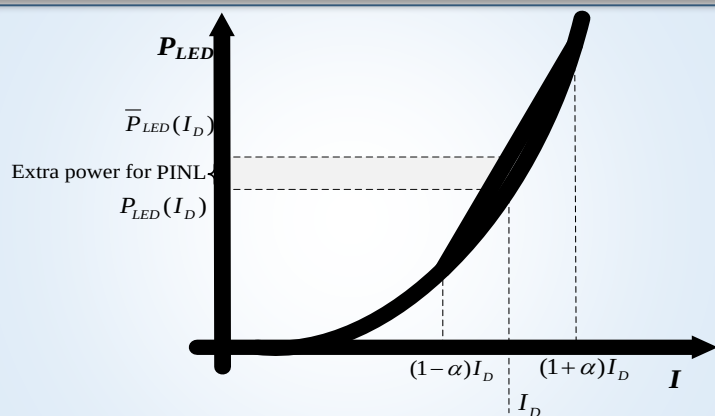


中科院物理光学顶级杂志
X. Deng et al., *Optics Express*, OSA,
2017 (IF: 3.6)

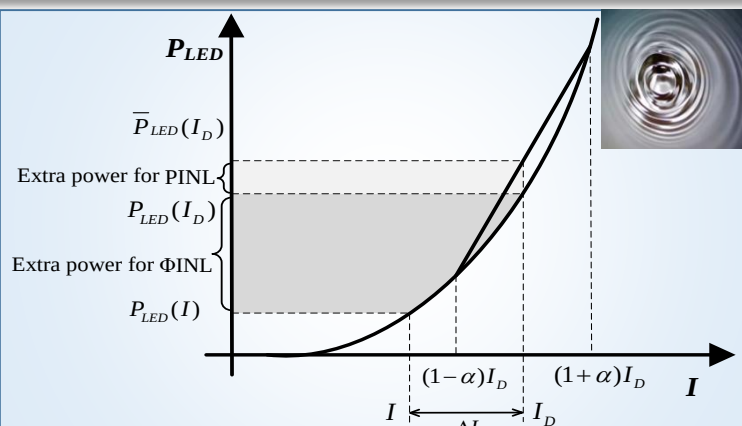
工作意义

- 阐述了LiFi调制器、LED功耗机制.
- 建立了调制器、LED的功率损耗模型.
- 发现了功率损耗与调制器结构、通信调制方式直接相关, 并可以量化.

电功率非线性特征



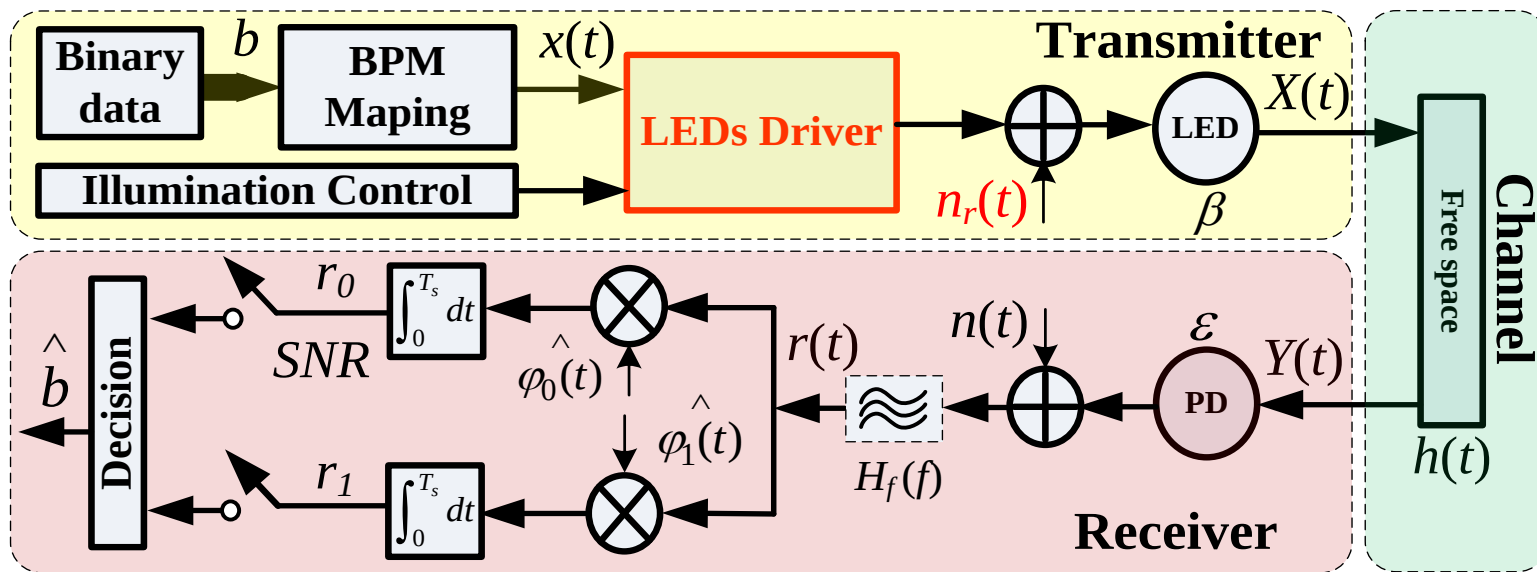
LED额外功率损耗两种机制



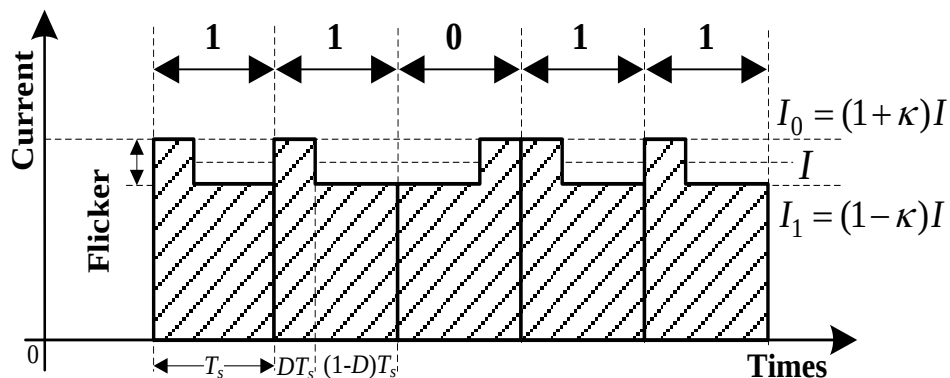
创新成果3：驱动器波纹干扰

基于二进制相位调制 (BPM)
的可见光通信系统

创新性建立驱动器纹波
对通信的干扰模型



二进制相位调制波形



误码率 (BER) 模型

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{H \sqrt{E_s} \cdot (1 - \alpha)}{\sqrt{2(\sigma_{n0}^2 + \sigma_{n1}^2 - 2\rho(\alpha))}} \right)$$

H : Channel gain

E_s : Energy for each symbol

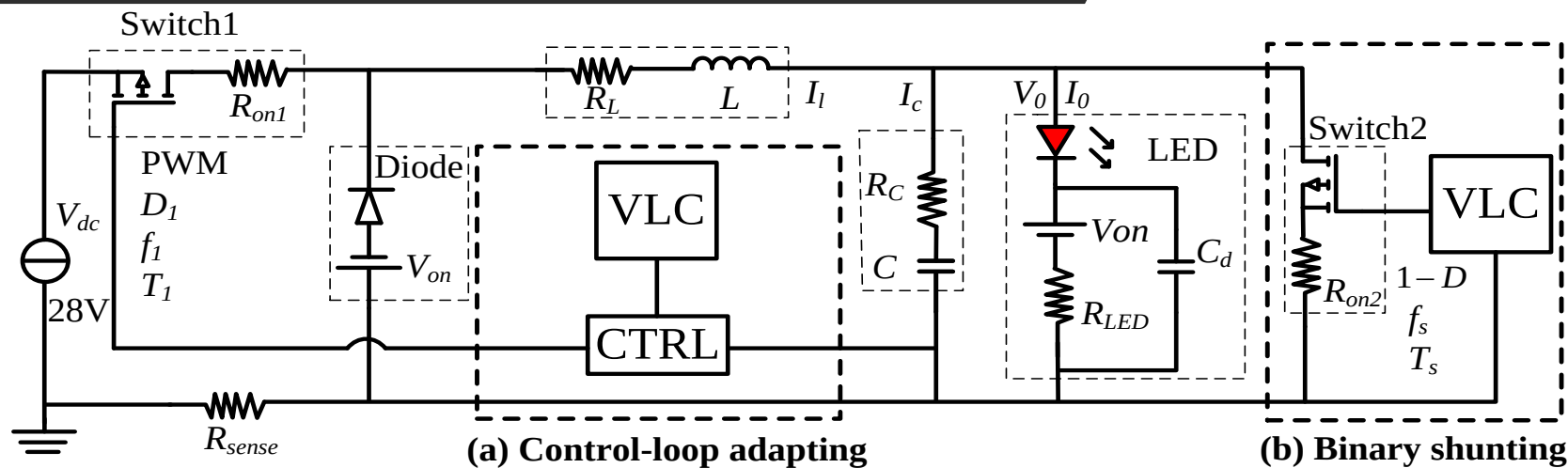
α : Correlation coefficient relating to K

$\sigma_{n0,1}^2$: Noise contribution

误码率BER用于量化驱动器纹波对通信性能的影响。

创新成果3：驱动器波纹干扰

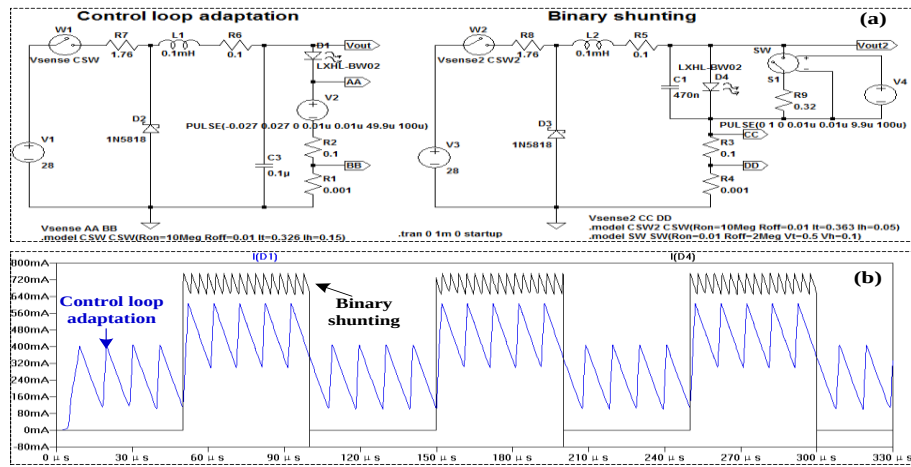
适用于二进制相位的驱动器电路结构



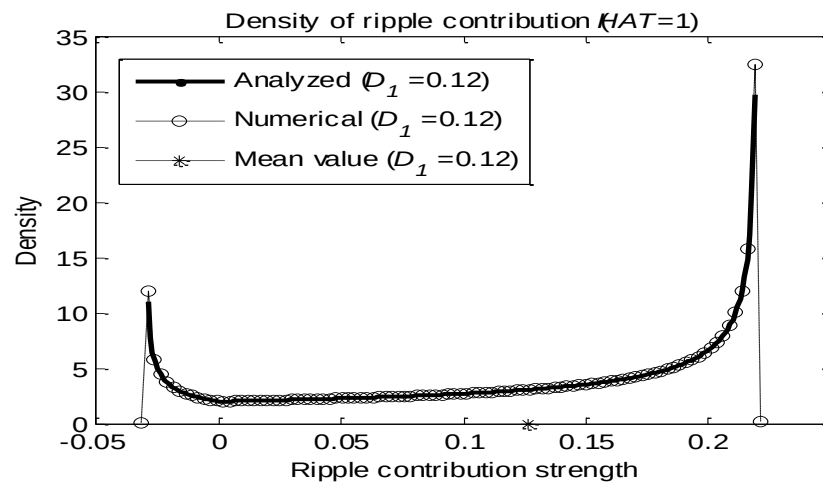
该工作在任何修改下直接
发表在通信领域旗舰杂志

X. Deng et al., *IEEE Transactions on Communications*, 2017 (IF: 5.7)

驱动器电路模拟仿真

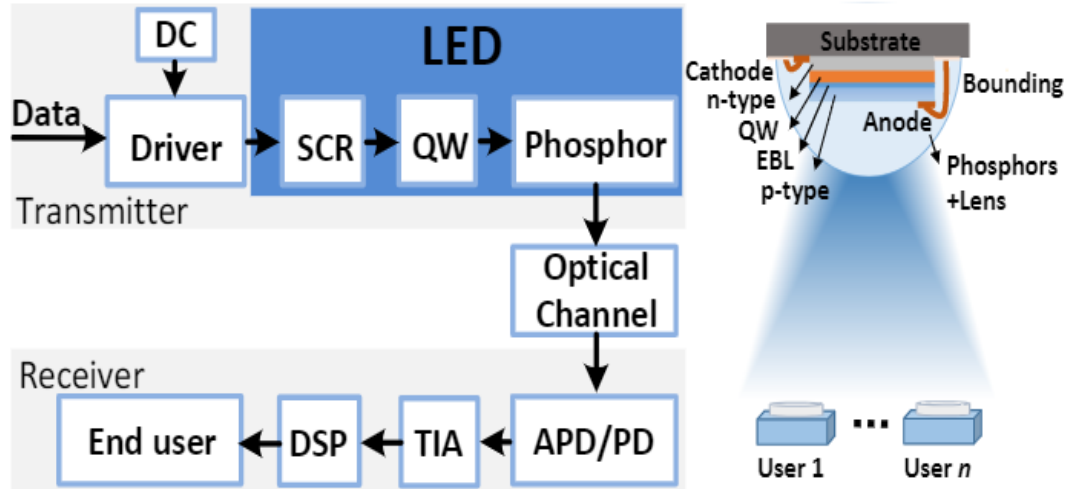


纹波干扰的统计特性

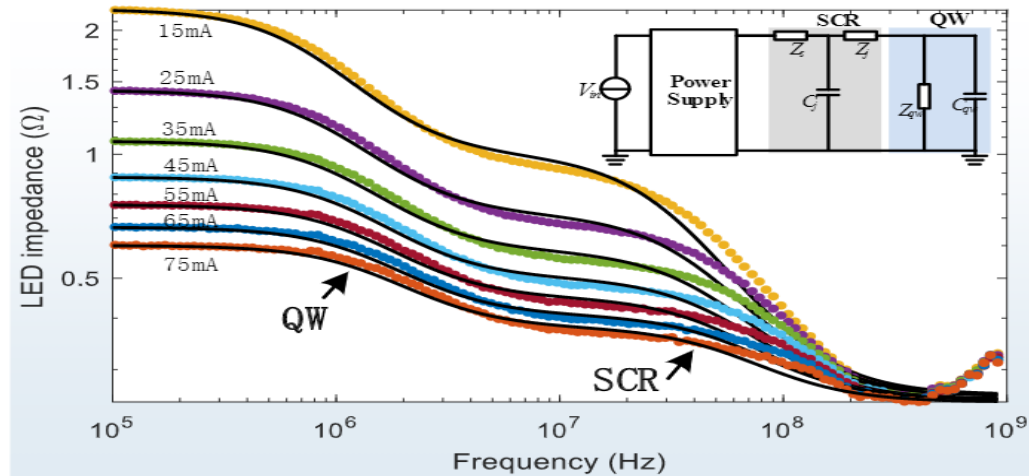


以上研究总结发表在IEEE COMMUNICATIONS MAGAZINE

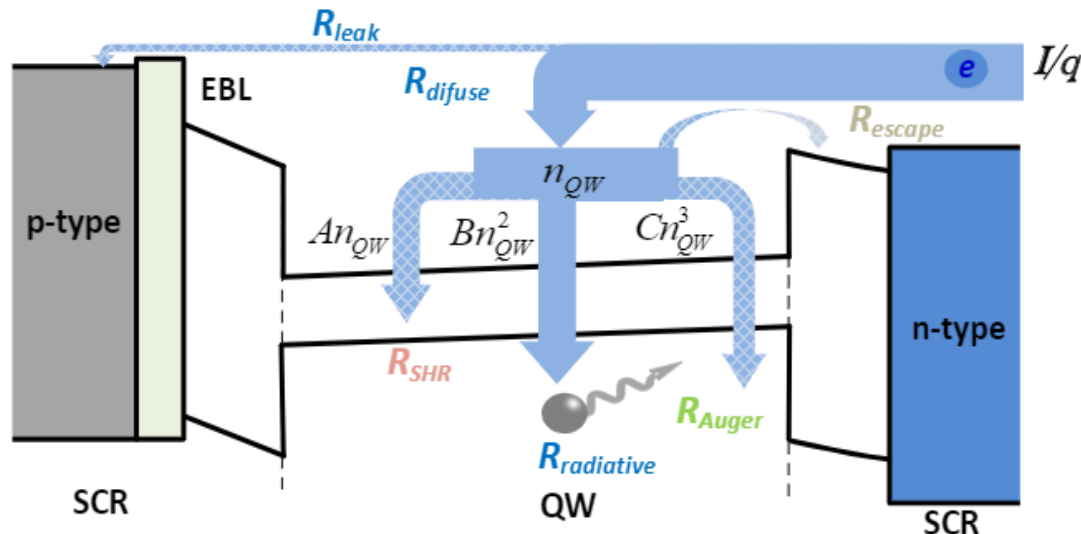
LiFi communication downlink



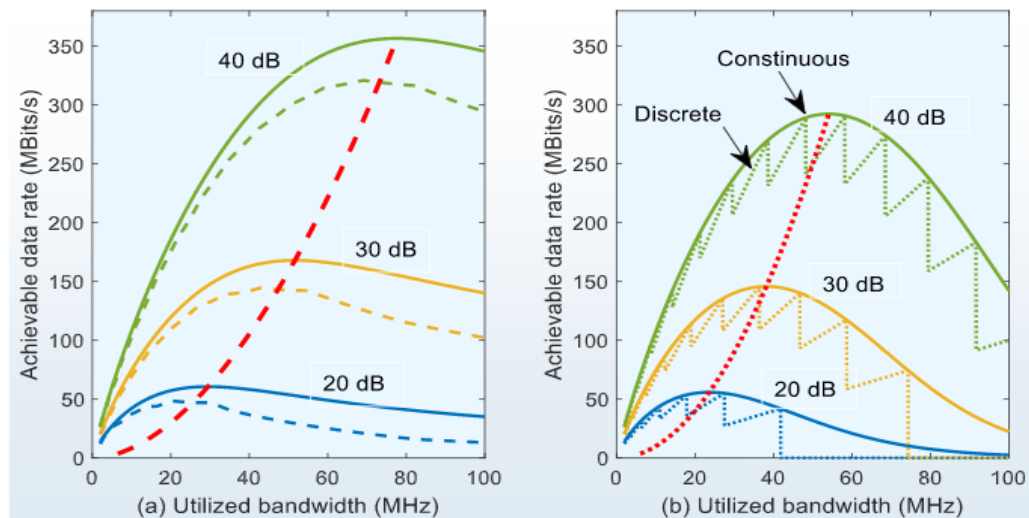
Small-signal model of blue GaN LED



Carrier transport by energy band in QW



Achievable rate by (a) uniform and (b) pre-emphasis



THANKS

欢迎各位老师和同学交流！

一起推动无线光通信技术进一步发展及应用！



xiongdeng@swjtu.edu.cn