

室内光无线通信技术研究与硬件设计

潘乐园* 100645

导师：赵春明* 教授

* 东南大学 移动通信国家重点实验室

National Mobile Communications Research Laboratory

Southeast University

Nanjing, China, 210096

2013 年 1 月 17 日

目录

1 研究背景

- 室内光无线通信系统概况

2 光无线信道建模

- 线性光无线信道建模
- 非线性光无线信道建模

3 光无线通信中的基带技术研究

- 光无线通信中基带调制技术的研究
- 均衡技术在光无线通信中的应用

4 光无线通信硬件设计

- 光无线通信硬件设计原理
- 光无线通信演示效果

5 总结

关于光无线通信

近年来，随着无线通信技术的高速发展，射频频谱资源越来越紧张，利用现有射频频谱资源进行高速无线通信的实现成本已经越来越高。电磁波辐射对人体带来的影响也逐渐受到人们的关注。基于发光二极管（LED）的光无线通信系统因“绿色”、“安全”而成为研究热点。

光无线通信系统与射频无线通信系统的对比

- 光：带宽不受限；射频：带宽受限（需考虑对其它用户的干扰）
- 光：保密性好；射频：保密性差
- 光：无需牌照；射频：需要牌照
- 光：“绿色”、“健康”；射频：电磁辐射对人体影响大
- 光：使用能量表达信号；射频：使用幅度和相位表达信号
- 光：路径损耗大；射频：相对于光，路径损耗小
- 光：噪声源包括热噪声和光噪声；射频：噪声源主要为热噪声

关于光无线通信

近年来，随着无线通信技术的高速发展，射频频谱资源越来越紧张，利用现有射频频谱资源进行高速无线通信的实现成本已经越来越高。电磁波辐射对人体带来的影响也逐渐受到人们的关注。基于发光二极管（LED）的光无线通信系统因“绿色”、“安全”而成为研究热点。

光无线通信系统与射频无线通信系统的对比

- 光： **带宽不受限**；射频：带宽受限（需考虑对其它用户的干扰）
- 光： **保密性好**；射频：保密性差
- 光： **无需牌照**；射频：需要牌照
- 光： **“绿色”、“健康”**；射频：电磁辐射对人体影响大
- 光： **使用能量表达信号**；射频：使用幅度和相位表达信号
- 光： **路径损耗大**；射频：相对于光，路径损耗小
- 光： **噪声源包括热噪声和光噪声**；射频：噪声源主要为热噪声

光无线通信的研究成果简介

- 2008 年, Minh 等人使用白色 LED 实现 **40Mbps** 的通信速率, 基带调制方案为 OOK[Minh 2008]
- 2009 年, Minh 等人使用白色 LED 实现 **100Mbps** 的通信速率, 基带调制方案为 OOK[Minh 2009]
- 2010 年, Vucic 等人使用白色 LED 作为发射源, Si-APD 作为接收二极管, 在使用蓝光滤光片的基础上实现了 **230Mbps** 的通信速率, 基带调制方案为 OOK[Vucic 2010]
- 2010 年, Vucic 等人在相同的硬件基础上, 使用 DCO-OFDM 调制方案实现了 **513Mbps** 的通信速率 [Vucic 2010]
- 2011 年, Vucic 等人将磷激发 LED 更换为 RGB 三色混光 LED, 在 RGB 三个通道中实现了 **803Mbps** 的总通信速率 [Vucic 2011]
- 2012 年, Kottke 等人仅使用 RGB 三色混光 LED 中的红色通道实现了 **806Mbps** 的通信速率, 基带调制方案为 DCO-OFDM[Kottke 2012]

光无线通信系统的主要特性

信道特性

- 信号能量衰减正比于距离的四次方[Kahn 1997]
- 信道环境一般为单径 LOS 低通信道
- 在不含直达径的环境中通信效率很低

光电器件

- 电光器件：发光二极管（LED）、激光二极管（LD）
- 光电器件：P-I-N 光电二极管（PIN-PD）、雪崩光电二极管（APD）

光系统噪声

- 电子元器件的热噪声
- 光电二极管的暗电流噪声
- 背景光噪声，包括日光和照明用灯光

光无线通信系统的主要特性

信道特性

- 信号能量衰减正比于距离的四次方[Kahn 1997]
- 信道环境一般为单径 LOS 低通信道
- 在不含直达径的环境中通信效率很低

光电器件

- 电光器件：发光二极管（LED）、激光二极管（LD）
- 光电器件：P-I-N 光电二极管（PIN-PD）、雪崩光电二极管（APD）

光系统噪声

- 电子元器件的热噪声
- 光电二极管的暗电流噪声
- 背景光噪声，包括日光和照明用灯光

光无线通信系统的主要特性

信道特性

- 信号能量衰减正比于距离的四次方[Kahn 1997]
- 信道环境一般为单径 LOS 低通信道
- 在不含直达径的环境中通信效率很低

光电器件

- 电光器件：发光二极管（LED）、激光二极管（LD）
- 光电器件：P-I-N 光电二极管（PIN-PD）、雪崩光电二极管（APD）

光系统噪声

- 电子元器件的热噪声
- 光电二极管的暗电流噪声
- 背景光噪声，包括日光和照明用灯光

线性光无线信道建模基础

线性光无线信道的建模基础与方法

- 光无线通信系统主要受光传播信道和光电器件的影响：其中光传播信道为线性信道，而光电器件则为非线性系统。当发射功率较小时，光电器件工作于线性区间，则光系统表现为线性系统，可以在这个条件下建立线性光信道模型 [Hranilovic 1999]。
- 建立线性光信道模型的基础是测量光信道时域冲激响应。
- 论文中采用 PN 序列作为导频测量信道时域冲激响应 [Gallager 2002]。

测量光信道时域冲激响应的理论基础

导频信号为 PN 序列 $u_j = \pm a$, 满足

$$\sum_{j=1}^n u_j u_{j+m}^* \approx \begin{cases} na^2, & m = 0 \\ 0, & m \neq 0 \end{cases} = a^2 n \delta_m \quad (1)$$

接收信号为

$$V_m = \sum_{k=0}^{n-1} h_{k,m} u_{m-k} + Z_m \quad (2)$$

将导频信号与接收信号作相关操作, 可得

$$K_j = \sum_m V_m u_{m+j}^* = na^2 h_{-j} + \sum_m Z_m u_{m+j}^* \quad (3)$$

因此, 信道的抽头系数为

$$h_{-j} = \frac{K_j}{na^2} + Z'_j \quad (4)$$

使用 PN 序列测量信道时域冲激响应的误差分析

使用 PN 序列作为导频测量信道冲激响应的测量误差为

$$Z'_j = \frac{1}{na^2} \sum_{m=-j+1}^{-j+n} Z_m u_{m+j}^* \quad (5)$$

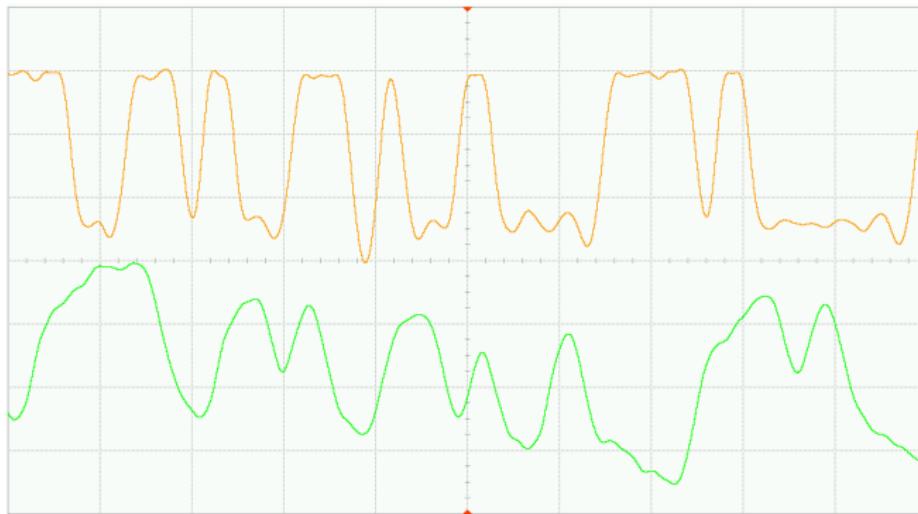
因为 $Z_m \sim N(0, N_0/2)$, 其中, $N(\cdot, \cdot)$ 表示高斯分布, N_0 表示噪声的功率谱密度, 所以,

$$\begin{aligned} E\{Z'_j\} &= 0 \\ VAR\{Z'_j\} &= \frac{N_0}{2na^2} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $E\{\cdot\}$ 表示统计期望, $VAR\{\cdot\}$ 表示统计方差。

从中可以看出, 增大 n 的值, 即使用长 PN 序列, 可以有效的降低测量误差。

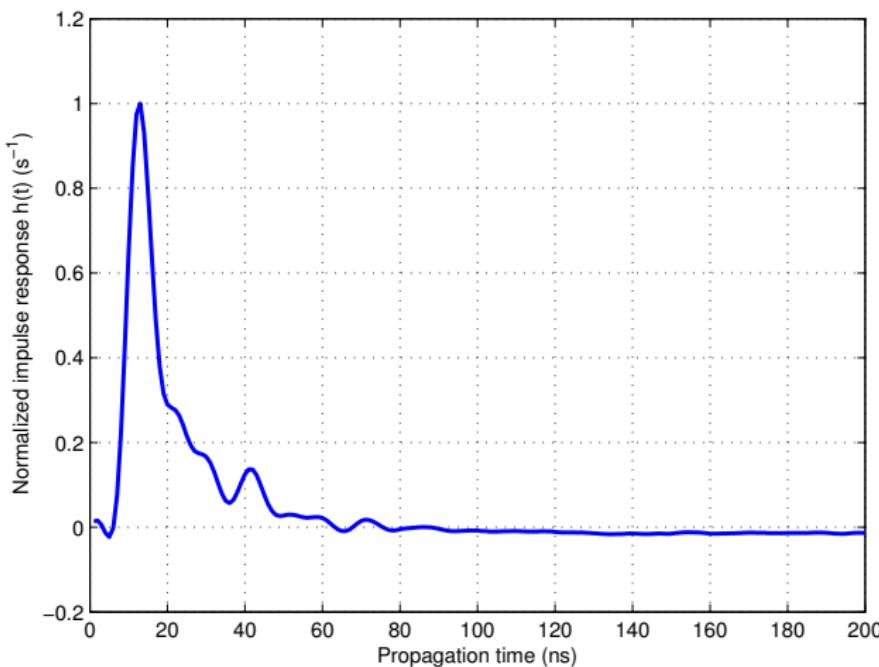
测量与建模结果（1）



图：发送的 PN 序列和接收到的 PN 序列

线性光无线信道建模

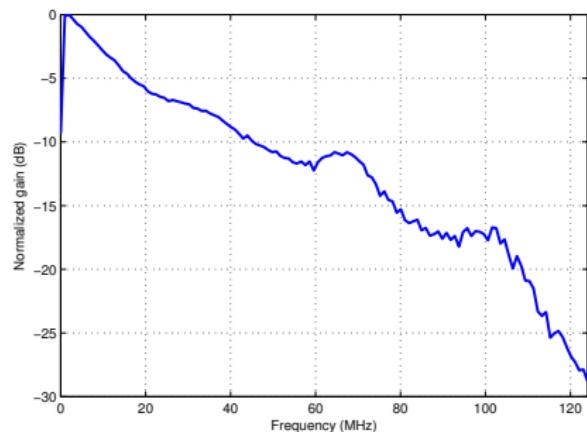
测量与建模结果（2）



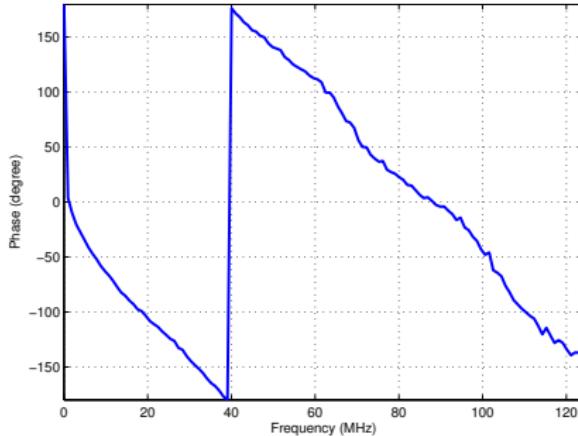
图：光信道时域冲激响应测量结果

线性光无线信道建模

测量与建模结果（3）



(a) 幅频响应



(b) 相频响应

图：光信道时域冲激响应所对应的频域特性

非线性光无线信道的建模基础

非线性光无线信道的建模基础与方法

- 光无线通信信道受发光二极管和接收二极管的影响。在大功率发射情景下，发光二极管和接收二极管均会出现非线性失真。为了更深入的研究光无线通信信道，需要建立更加符合实际情况的非线性光信道模型。
- 分析模型与经验模型[Gharaibeh 2012]。
- 论文中采用经验模型（Three-Box 模型）建立了光无线通信系统的非线性信道模型。

非线性光无线信道建模

非线性光无线信道的建模方法

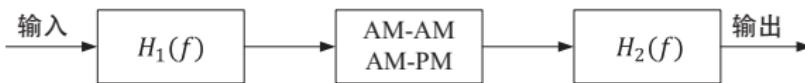


图: Three-Box 模型框图

论文中所采用的经验模型为 **Three-Box** 模型，此模型包括三个部分：输入滤波器、输出滤波器和无记忆非线性失真模块。

输入输出滤波器的传递函数分别为

$$H_1(f) = \frac{H_{ss}(f)}{G_{ss}|H_{sat}(f)|} \quad (7)$$

和

$$H_2(f) = \frac{H_{sat}(f)}{|G_{sat}|} \quad (8)$$

非线性光无线信道的建模方法

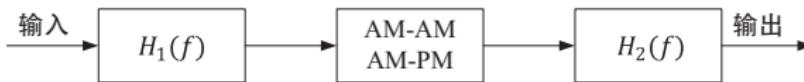


图: Three-Box 模型框图

论文中所采用的经验模型为 **Three-Box** 模型，此模型包括三个部分：输入滤波器、输出滤波器和无记忆非线性失真模块。

输入输出滤波器的传递函数分别为

$$H_1(f) = \frac{H_{ss}(f)}{G_{ss}|H_{sat}(f)|} \quad (7)$$

和

$$H_2(f) = \frac{H_{sat}(f)}{|G_{sat}|} \quad (8)$$

非线性光无线信道的建模方法（续）

无记忆非线性失真模块的多项式表达式为

$$y_n = \sum_{k=1}^N b_k |x_n|^{k-1} x_n \quad (9)$$

使用矩阵形式表示为

$$\mathbf{Y} = \Phi_{\mathbf{X}} \mathbf{b} \quad (10)$$

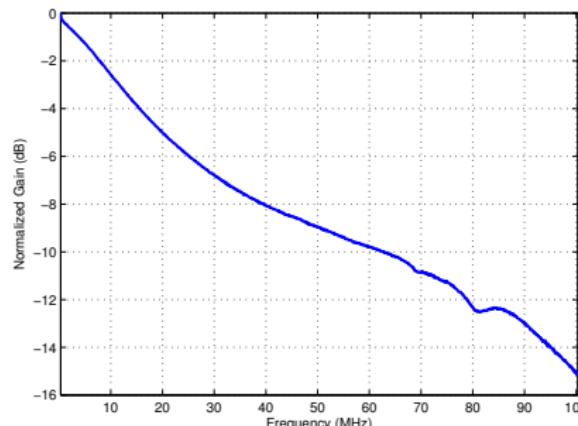
使用最小二乘（Least squares, LS）算法拟合出的多项式系数为

$$\mathbf{b} = \Phi_{\mathbf{X}}^\dagger \mathbf{Y} \quad (11)$$

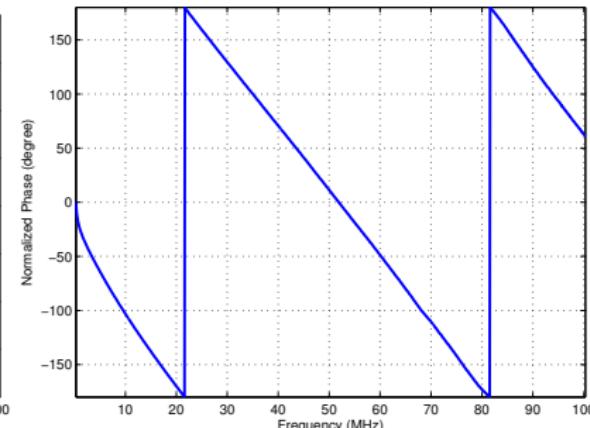
其中， $\Phi_{\mathbf{X}}^\dagger = (\Phi_{\mathbf{X}}^H \Phi_{\mathbf{X}})^{-1} \Phi_{\mathbf{X}}^H$ 表示 $\Phi_{\mathbf{X}}$ 的 Moore-Penrose 广义逆。

测量与建模结果（1）

测得的小信号（Output Power: -20dBm）频率响应结果：



(a) 幅频响应

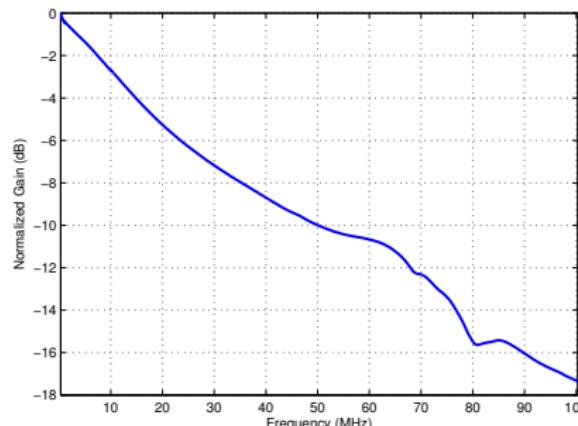


(b) 相频响应

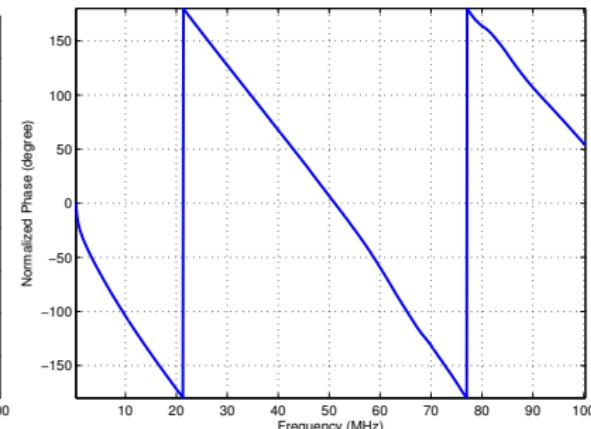
图：系统小信号频率响应测量值

测量与建模结果（2）

测得的大信号（Output Power: +5dBm）频率响应结果：



(a) 幅频响应

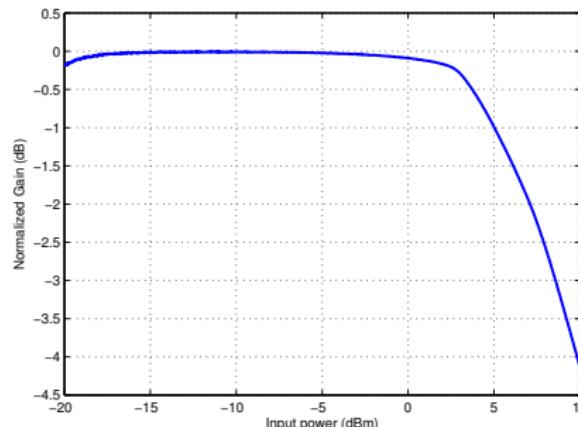


(b) 相频响应

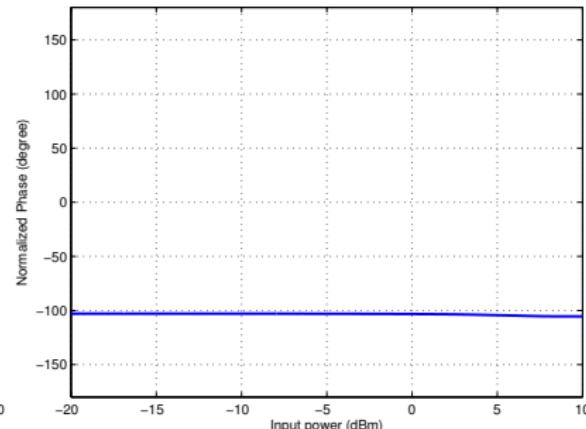
图：系统大信号频率响应测量值

测量与建模结果（3）

测得的功率（Reference Frequency: 10MHz）响应结果：



(a) AM-AM 参数

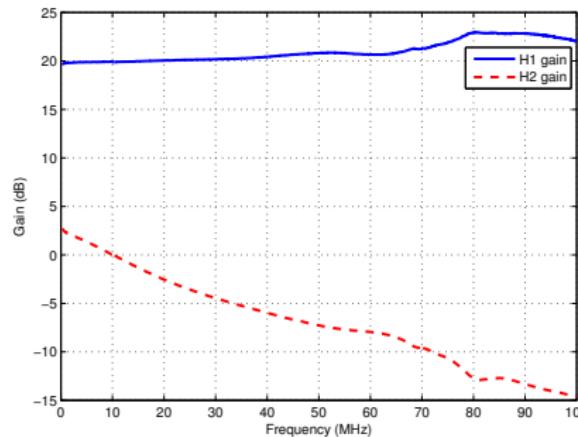


(b) AM-PM 参数

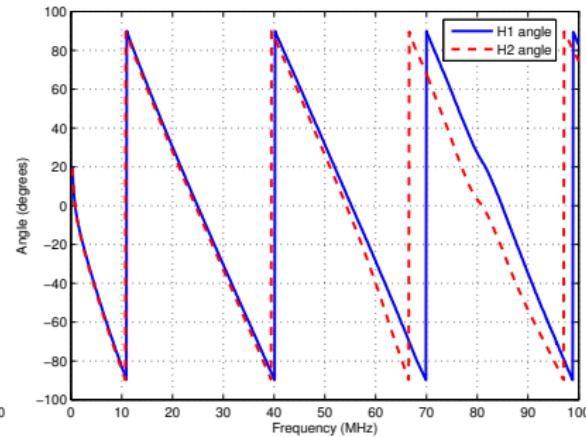
图：系统功率响应测量值

测量与建模结果（4）

输入输出滤波器的幅频响应与相频响应建模结果：



(a) 幅频响应



(b) 相频响应

图：Three-Box 模型输入滤波器 H_1 和输出滤波器 H_2 的频率响应曲线

测量与建模结果（5）

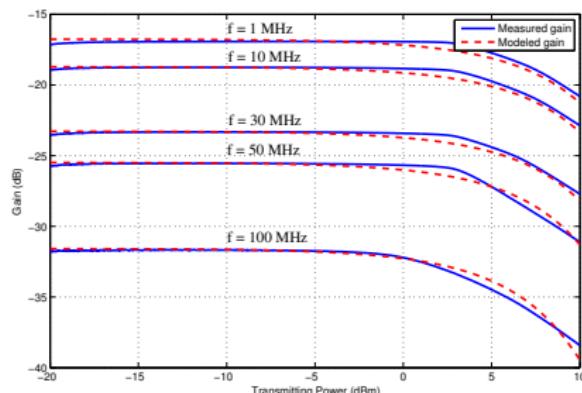
使用 5 阶失真多项式拟合出的非线性失真模块多项式系数为：

表：根据实测参数拟合出的 AM-AM 和 AM-PM 失真模块多项式系数

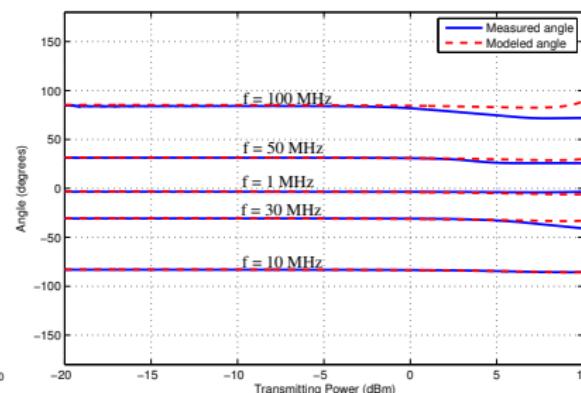
多项式系数名称	多项式系数值
b_1	$-0.1273 + 1.0322i$
b_3	$0.1599 - 0.4940i$
b_5	$-0.0800 + 0.0695i$

测量与建模结果（6）

实测结果与模型输出结果对比：



(a) 幅度响应曲线



(b) 相位响应曲线

图：Three-Box 模型信道响应与实测值对比图

测量与建模结果 (7)

建模误差 (相对于实测数据):

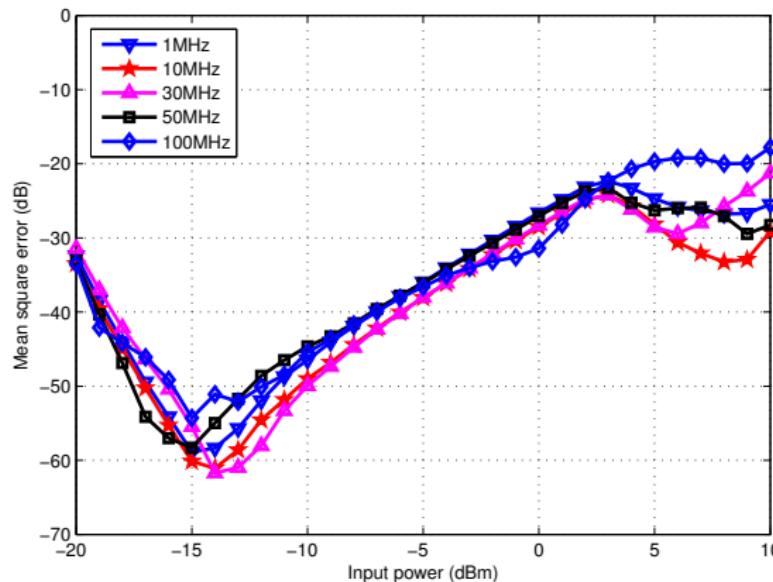


图: Three-Box 模型建立的信道模型的均方误差值 (MSE)

光无线通信中的基带调制技术

光无线通信系统是基带直流偏置系统，需要对传统的基带调制方案加以改进。光系统中各种基带调制方案的带宽效率和功率效率对比如下：

- 带宽效率：M-DCO-PAM > NRZ-OOK > RZ-OOK > M-PPM
- 功率效率：M-DCO-PAM > M-PPM > RZ-OOK > NRZ-OOK
- M-PPM 的带宽效率随着调制阶数 M 的提高而下降，但功率效率随着调制阶数的提高而上升
- M-DCO-PAM 的带宽效率均随着调制阶数 M 的提高而上升，但是随着 M 的提高，需要更高的信噪比才能保证达到相同的误比特率

在低通系统中，需要很复杂的均衡器才能实现宽带单载波通信，而 OFDM 技术可以有效地解决这个问题。

因此，论文基于 DCO-OFDM 研究了自适应调制技术在光无线通信系统中的应用。

自适应调制在光无线通信中的应用

自适应调制（Adaptive modulation, AM）技术可以有效地应对不同的接收信噪比环境，是保证服务质量（QoS）的有效技术。尤其是 OFDM 调制，可以在不同子载波上分别采用合适的调制方案，自由度更高 [Xu 2005]。OFDM 中自适应调制的根本原理是，对于每个子载波，根据所估计的等效信噪比选择适当的调制方案，从而在保证整体误比特率的前提下，提高系统频谱效率。

自适应调制算法

- 所选择的目标误比特率为 $BER = 2 \times 10^{-3}$ [Vucic 2011]。
- 可选调制方案集合为
{不传输, BPSK, QPSK, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM, 256-QAM}
- 每种调制方案对应的等效信噪比门限为
 $\{0, \tilde{\gamma}_{BPSK}, \tilde{\gamma}_{QPSK}, \tilde{\gamma}_{8-QAM}, \tilde{\gamma}_{16-QAM}, \tilde{\gamma}_{32-QAM}, \tilde{\gamma}_{64-QAM}, \tilde{\gamma}_{128-QAM}, \tilde{\gamma}_{256-QAM}\}$
- 对于每个子载波，根据计算所得的等效信噪比选择并使用频谱效率尽量高的调制方案。

自适应调制在光无线通信中的应用

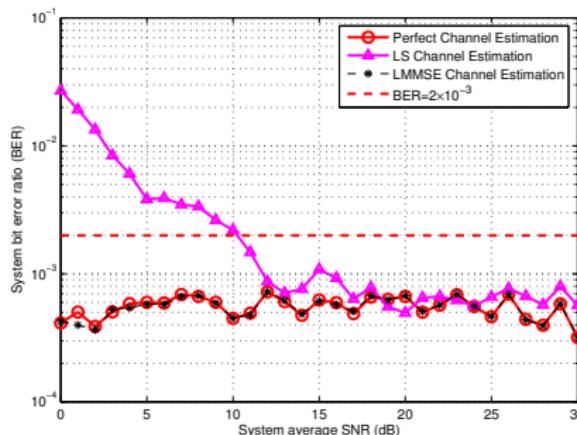
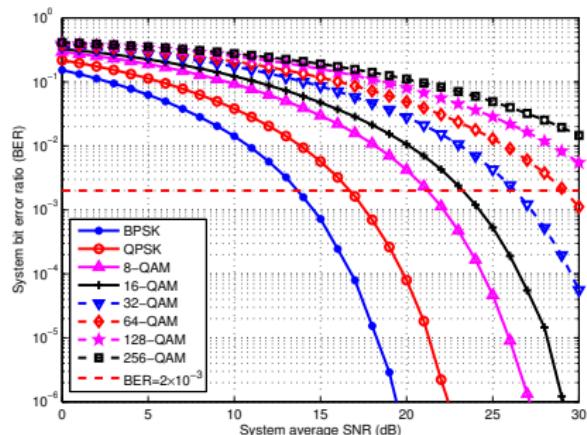
自适应调制（Adaptive modulation, AM）技术可以有效地应对不同的接收信噪比环境，是保证服务质量（QoS）的有效技术。尤其是 OFDM 调制，可以在不同子载波上分别采用合适的调制方案，自由度更高 [Xu 2005]。OFDM 中自适应调制的根本原理是，对于每个子载波，根据所估计的等效信噪比选择适当的调制方案，从而在保证整体误比特率的前提下，提高系统频谱效率。

自适应调制算法

- 所选择的目标误比特率为 $BER = 2 \times 10^{-3}$ [Vucic 2011]。
- 可选调制方案集合为
{不传输, BPSK, QPSK, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM, 256-QAM}
- 每种调制方案对应的等效信噪比门限为
 $\{0, \tilde{\gamma}_{BPSK}, \tilde{\gamma}_{QPSK}, \tilde{\gamma}_{8-QAM}, \tilde{\gamma}_{16-QAM}, \tilde{\gamma}_{32-QAM}, \tilde{\gamma}_{64-QAM}, \tilde{\gamma}_{128-QAM}, \tilde{\gamma}_{256-QAM}\}$
- 对于每个子载波，根据计算所得的等效信噪比选择并使用频谱效率尽量高的调制方案。

光无线通信中基带调制技术的研究

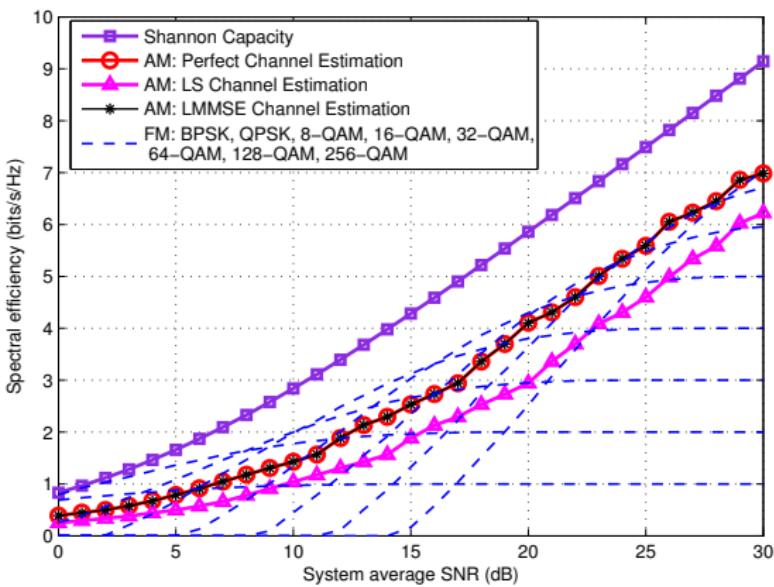
仿真结果 (1)



图：光无线信道下固定调制与自适应调制对应的误比特率曲线对比图

光无线通信中基带调制技术的研究

仿真结果 (2)



图：光无线信道下自适应调制 (AM) 和固定调制 (FM) 的频谱效率对比图

均衡技术在光无线通信中的应用

数字预均衡

在室内光无线通信系统中，可以在估计信道参数之后，在发射端做预均衡，从而有效扩展通频带。这里，将不考虑信道估计和信道反馈过程，认为信道估计是理想的，通过推导设计出满足最小二乘（LS）准则的数字预均衡滤波器。

使用 LS 准则估计预均衡滤波器系数

接收信号为

$$y(n) = x(n) * g(n) * h(n) + z(n) \quad (12)$$

改写成矩阵形式可得

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{H}\mathbf{g} + \mathbf{z} \quad (13)$$

使用 LS 准则估计预均衡滤波器 \mathbf{g} 可得

$$\hat{\mathbf{g}} = \arg \min_{\mathbf{g}} \{ \| \mathbf{X}\mathbf{H}\mathbf{g} - \mathbf{y} \|^2 \} = \mathbf{H}^\dagger \mathbf{D} \quad (14)$$

其中， $\mathbf{H}^\dagger = (\mathbf{H}^\text{T}\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^\text{T}$ 表示信道矩阵 \mathbf{H} 的 Moore-Penrose 广义逆， $\mathbf{D} = [1, 0, \dots, 0]^T$ 为单位冲激向量。

数字预均衡

在室内光无线通信系统中，可以在估计信道参数之后，在发射端做预均衡，从而有效扩展通频带。这里，将不考虑信道估计和信道反馈过程，认为信道估计是理想的，通过推导设计出满足最小二乘（LS）准则的数字预均衡滤波器。

使用 LS 准则估计预均衡滤波器系数

接收信号为

$$y(n) = x(n) * g(n) * h(n) + z(n) \quad (12)$$

改写成矩阵形式可得

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{H}\mathbf{g} + \mathbf{z} \quad (13)$$

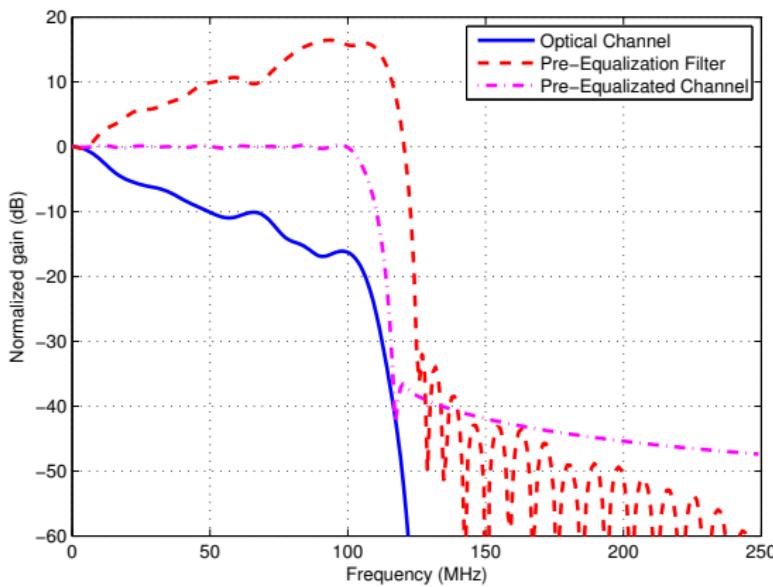
使用 LS 准则估计预均衡滤波器 \mathbf{g} 可得

$$\hat{\mathbf{g}} = \arg \min_{\mathbf{g}} \{ \| \mathbf{X}\mathbf{H}\mathbf{g} - \mathbf{y} \|^2 \} = \mathbf{H}^\dagger \mathbf{D} \quad (14)$$

其中， $\mathbf{H}^\dagger = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H$ 表示信道矩阵 \mathbf{H} 的 Moore-Penrose 广义逆， $\mathbf{D} = [1, 0, \dots, 0]^T$ 为单位冲激向量。

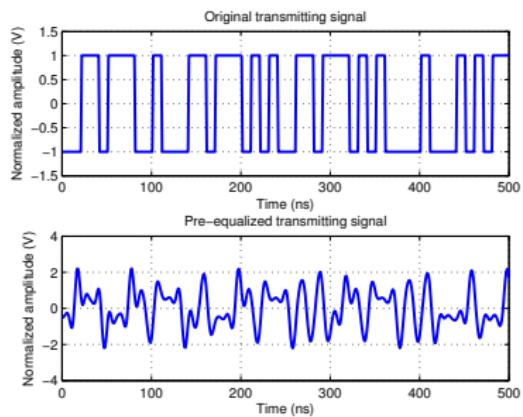
均衡技术在光无线通信中的应用

数字预均衡的仿真结果（1）

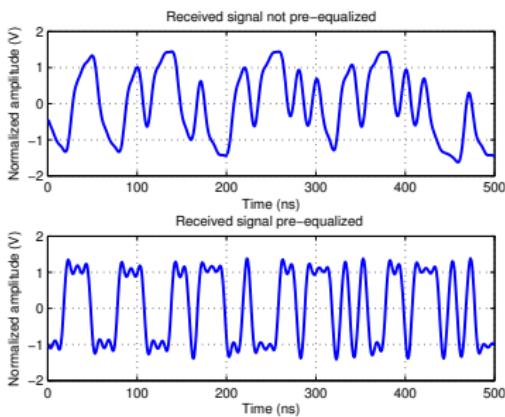


图：预均衡前后信道幅频响应对比图

数字预均衡的仿真结果 (2)



(a) 发送信号

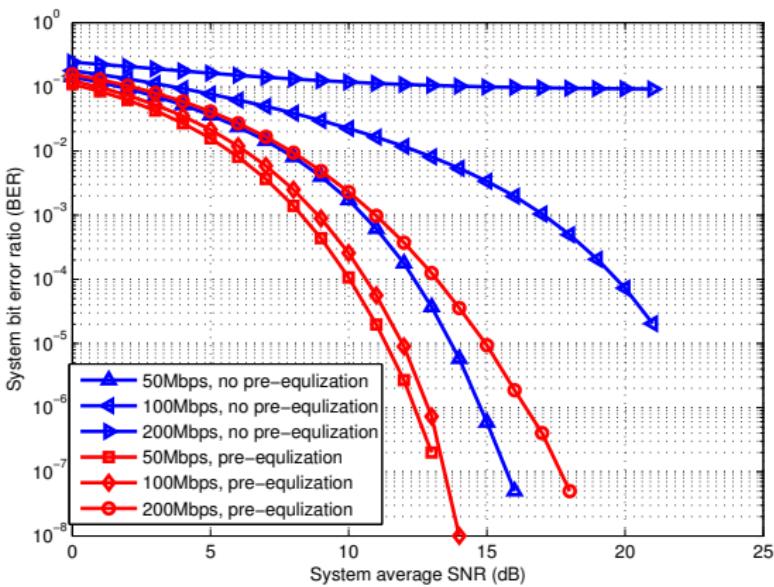


(b) 接收信号

图: 100Mbps OOK 调制预均衡与不预均衡的接收信号对比图

均衡技术在光无线通信中的应用

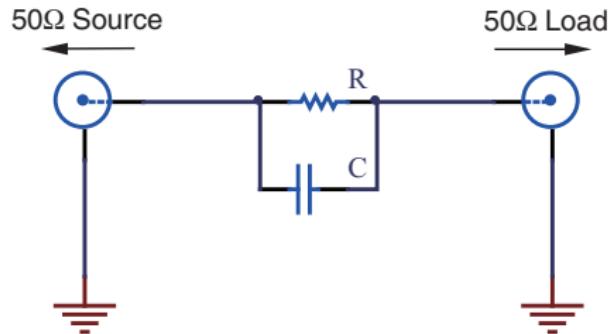
数字预均衡的仿真结果 (3)



图：预均衡前后的误比特率对比图

模拟后均衡

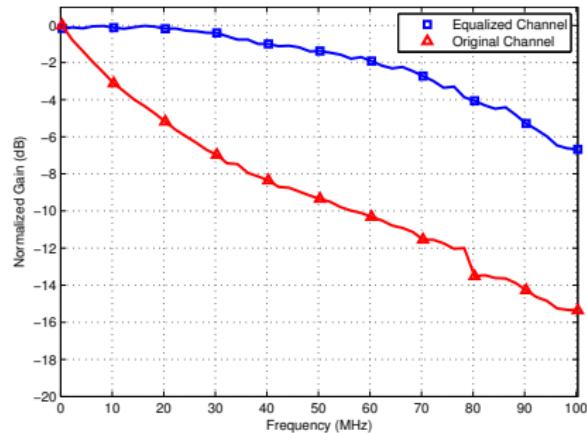
模拟后均衡电路可以有效降低发射机和接收机的基带计算复杂度。虽然无法获得的均衡效果比数字预均衡器差一些，但仍然可以有效地扩展通频带，同时不改变基带计算复杂度。下图给出了一阶模拟后均衡电路结构。



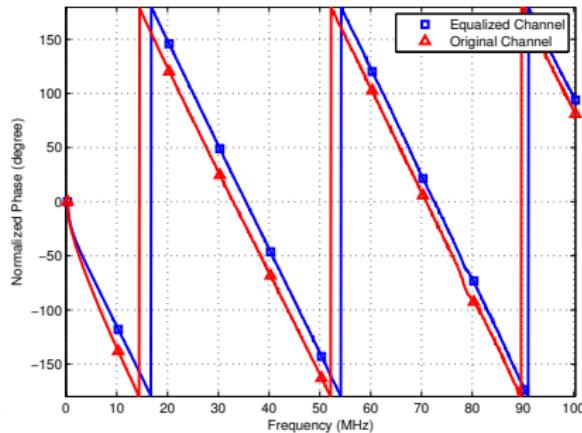
图：接收前端模拟后均衡电路结构图

均衡技术在光无线通信中的应用

模拟后均衡电路实测结果



(a) 均衡前后信道幅频响应对比

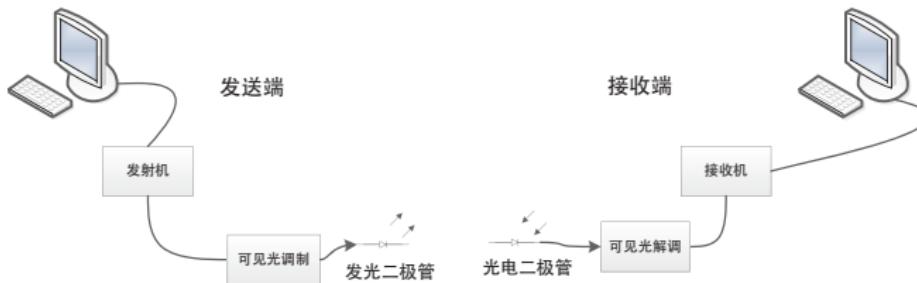


(b) 均衡前后信道相频响应对比

图：使用模拟均衡器的信道频响与不适用模拟均衡器的信道频响对比图 ($R = 150\Omega$, $C = 100pF$)

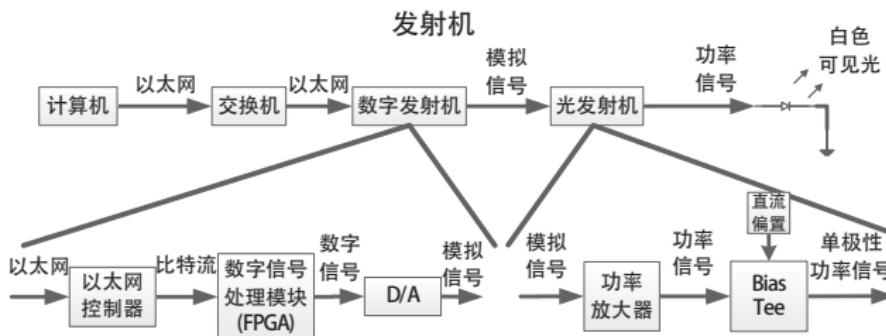
光无线通信硬件设计原理

硬件设计结构



图：演示平台结构简图

发射机设计



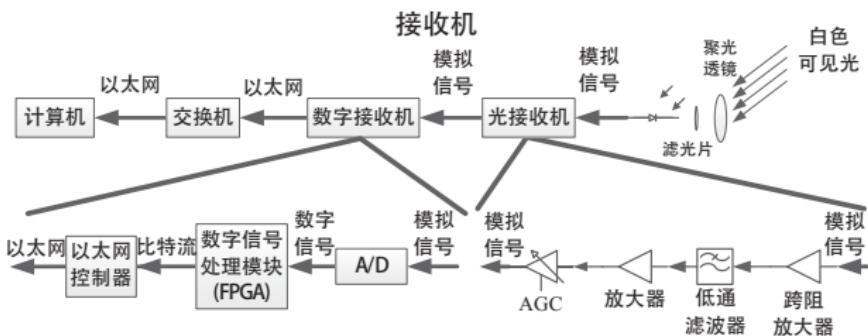
图：室内光无线通信系统发射机设计方案详细结构图



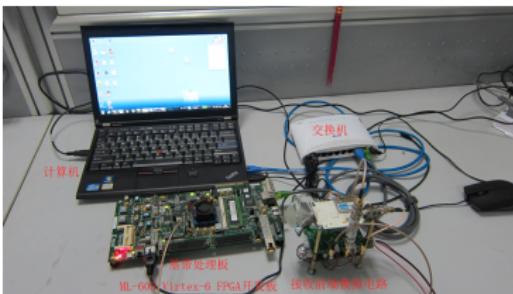
图：室内光无线通信系统发射机实物图

光无线通信硬件设计原理

接收机设计



图：室内光无线通信系统接收机设计方案详细结构图



图：室内光无线通信系统接收机实物图

演示平台效果图



图：室内光无线通信系统视频传输演示平台

总结

论文主要研究内容包括：

- 详细介绍了光无线通信系统的结构与特性
- 使用实测数据建立了光无线通信系统的线性和非线性**信道模型**
- 在所建立的信道模型基础之上深入研究了光无线通信中的各种**基带技术**，包括基带高效调制技术、自适应调制技术和均衡技术
- 完成了**硬件验证平台**的设计与调测，验证了光无线通信系统的可实现性

谢 谢 !

Question and Answer