

缩略词

ACO-OFDM	Asymmetrically-clipped optical OFDM	非对称光 OFDM 调制
APD	Avalanche Photo Diode	雪崩型光电二极管
BA	BER Adaptive	最小误比特率准则
BER	Bit Error Rate	误比特率
CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function	互补累积分布函数
CIR	Channel Impose Response	信道冲激响应
CP	Cyclic Prefix	循环前缀
CSI	Channel State Information	信道状态信息
DCO-OFDM	DC-biased optical OFDM	直流偏置光 OFDM 调制
DD	Direct Detection	直接检测
DMT	Discrete Multi-Tone	离散多音调制
DOW	Diffuse Optical Channel	漫反射光信道
DSL	Digital Subscriber Line	数字用户线路
EVM	Error Vector Magnitude	误差向量幅度
FOV	Field of View	接收机视场角
FPGA	Field Programmable Gate Array	现场可编程门阵列
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	美国电子电气工程师协会
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform	逆傅里叶变换
IM	Intensity Modulation	强度调制
ISI	Inter Symbol Interference	符号间干扰
LD	Laser Diode	激光二极管
LED	Light Emitting Diode	发光二极管
LMMSE	Linear Minimum Mean Square Error	线性最小均方误差准则
LOS	Light of Sight	直达径
LS	Least Square	最小二乘法准则
MA	Margin Adaptive	最小发射功率准则
MMSE	Minimum Mean Square Error	最小均方误差估计准则
MSE	Mean Square Error	均方误差
NSF	National science foundation	美国国家科学基金会
OFDM	Orthogonal Frequency Division Modulation	正交频分复用调制
OOK-RZ	On-Off Keying Return-to-Zero	归零开关键控

PAPR	Peak to Average Power Ratio	峰均比
PD	Photo Diode	光电二极管
PN Seq.	Pseudo-Noise Sequence	伪随机序列
QAM	Quadrature amplitude modulation	正交幅度调制
RA	Rate Adaptive	最大速率准则
SBLA	Simple Blockwise Loading Algorithm	简单分组分配算法
SNR	Signal Noise Ratio	信噪比
SVD	Singular Value Decomposition	奇异值分解
VLC	Visible Light Communication	可见光通信
VLCC	Visible Light communication consortium	可见光通信协会
WDM	Wavelength Division Multiplexing	波分复用
WPAN	Wireless Personal Area Network	无线私域网
ZC Seq.	Zadoff-Chu Sequence	ZC 序列

第 1 章 可见光多波段自适应通信系统硬件设计

1.1 引言

我们在前面四章介绍了可见光通信的基本原理及关键技术，特别针对自适应传输这个核心重点研究了信道估计及比特功率分配算法，并且针对本课题对应的硬件平台的实际情况进行了别要的仿真，选出了合适的技术方案，如使用低复杂度的 LS 算法进行信道估计、使用高精度的 EVM 方法进行信噪比估计、使用专为可见光通信设计的 Improved-SBLA 比特功率分配算法得到自适应参数。本章将对可见光通信的硬件系统做一个简要的介绍，还将概述自适应模块的逻辑设计。

1.2 硬件系统概述

本课题对应的硬件演示平台如图1.1所示，该系统目前已经实现了“编译级”的自适应传输，所谓“编译级”就是代码支持通过改变调制参数然后需要再编译来实现调制的改变，而真正的自适应传输系统因为时间紧迫及反向链路方案尚未确定等因素没有完成。不过本系统已有了自适应传输的雏形了，只是信道估计、计算自适应参数、改变调制等需要离线进行，下面对该系统进行概述。

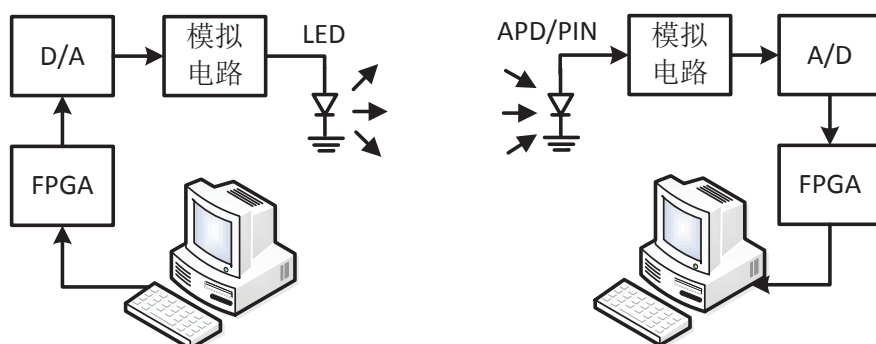


Figure 1.1 可见光通信硬件平台示意图

首先信源比特通过以太网接口（UDP 协议）按帧发送到用于基带处理的 FPGA 芯片（整个传输过程都是按帧进行的，并且用于同步和信道估计的 ZC 序列符号只在帧头处放置，整个帧中所有的 OFDM 符号都使用这个 ZC 序列估计出来的信道参数解调），接

着在 FPGA 中完成扰码、信道编码、调制和 IFFT 等数字处理过程，然后将时域数字信号输入到数字模拟变换器（Digital to Analogue Converter, DAC）变成模拟信号，最后该模拟信号加上偏置电流之后去驱动 LED 灯，整个发射过程完成。接收端通过 PD 接收 LED 光信号，并将光信号强弱的变化转换成电信号的大小，然后将此模拟电信号送入模拟/数字变换器（Analog to Digital Converter, ADC）中抽样量化为数字信号，再送到接收端基带处理 FPGA 进行解调、解码和校验等操作，最后输出接收到的帧到接收端计算机。

1.2.1 发射端基带处理

发射端 FPGA 基带处理流程如图 2 所示，本演示系统信源帧长定为 1358 byte（设置为该值主要是因为本系统主要以视频传输演示为主，而视频帧帧长就是 1358 byte），为了系统设计简便起见，当通过以太网接口接到的帧不足 1358 byte 时，会自动在后面补零再传输。

基带处理芯片接收到信源帧之后，第一步就是对其加 CRC，这里我们使用 24 bit 的循环校验码，循环校验比特的生成模块其实就是一个由生成多项式决定的除法电路，输入数据就是被除数，而余数就是我们需要的校验比特，当然为了加快计算速度，本系统 CRC 使用 8 位并行计算方法，即不是想真的除法电路那样逐比特地输入，而是一次输入 8 比特，整个运算速度提高了 8 倍。由于篇幅限制，在这里就不对 CRC 模块再进行过多的展开。得到 24 bit(3 byte) 校验位之后添加到原信源数据之后，又因为本系统使用的是输入为 1362 byte 的低密度奇偶校验码（Low Density Parity Code, LDPC）作为信道编码，所以 1358 byte 数据帧加入 3 byte 的校验码之后还要补零 1 byte。为了防止过长的连 0 连 1 影响系统传输性能，所以还要把加了 CRC 及补零后的数据进行扰码再送入 LDPC 编码器。

信道编码是通过在发射数据中增加冗余以便在接收端可以进行信道解码纠错，本系统使用码率为 3/4 的 LDPC 码，输入数据长度为 1362×8 bit，输出为 14528 bit 选择 LDPC 码的原因是其纠错性能佳，几乎适合所有信道，并且相对于 Turbo 码而言其解码器实现复杂度要低很多。这里使用的 LDPC 码的编码矩阵大小为 48×227 ，所以输入数据位宽要为 48 bit，而我们在 CRC 模块中输出数据位宽为 8 bit，所以这里需要位宽变换，可以使用 FPGA 提供的 RAM 或先入先出队列（First In First Out, FIFO）数据结构来实现。编码之后的校验比特插在等间隔的插在信息数据中间，具体数据结构变化如下图所示。

经过编码的帧数据长度变为 1816 byte，送入自适应调制模块，其功能是将信息比特分配到 OFDM 各个子载波上，并映射到星座图中的点，输出 OFDM 符号频域数据，这部分属于自适应设计的核心部分，将在下一节详细介绍。

经自适应模块调制后得到 N 个 OFDM 符号，N 的值也调制的选择有关，假设根据自适应参数每个 OFDM 符号传输 R 比特，则有 $N = \lceil 14528/R \rceil$ ，其中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整运算。为了提高传输速率，要保证所有的操作在一个 OFDM 帧周期内完成，所以要将将已调制符号交替存入两个 RAM 中，进行乒乓操作，即如果自适应模块再往其中 RAM

中写数据，则 IFFT 模块应该在另一个 RAM 中读数据去进行 IFFT 运算，到下一帧时这两个 RAM 的角色交换。IFFT 模块可以使用 Xilinx 公司提供的 IP 核实现，并且可以通过设置自动添加添加循环前缀，非常方便。得到 OFDM 时域符号之后，在每帧的头部再加上 ZC 导频序列之后输入到 DAC 芯片输出，整个发射端基带处理就完成了。

1.2.2 接收端基带处理

1.3 自适应模块 FPGA 方案设计

1.4 本章小结

心於至善

