

文章编号:1004-4213(2011)02-0161-8

# 长距离和多模接入网络中低密度奇偶 校验-正交频分复用的性能研究

高扬,陈林,余建军

(湖南大学 计算机与通信学院;微纳光电器件及应用教育部重点实验室,长沙 410082)

**摘 要:**研究了低密度奇偶校验编码与正交频分复用相结合的编码调制技术,从理论上分析了光纤链路中色散和频率选择性衰落的影响,并通过数值模拟仿真,比较了不同编码码率的编码调制信号在长距离单模光纤传输和多模光纤接入网络中的传输性能.仿真结果表明,采用码率为 0.75 的长码型非规则的低密度奇偶校验编码与正交频分复用相结合的编码调制技术更适合光纤通信系统中的长距离传输和多模接入网络.

**关键词:**光纤通信;接入网;低密度奇偶校验;正交频分复用;折射率渐变多模光纤

**中图分类号:**TN929.11

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20114002.0161

## 0 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)信号由于其频谱利用率高、良好的抗色散性和抗符号间干扰等能力,近年来,在光纤无线通信(Radio Over Fiber, ROF)、光标记交换、无源光网络(Passive Optical Network, PON)及多模接入等光纤通信领域得到了广泛的研究和应用<sup>[1-6]</sup>.在 ITU-T 提出 G-PON(Gigabit-capable-PON)网络后,采用 OFDM 技术实现高速率长距离的下一代 PON 接入网络继而成为了研究热点<sup>[7-8]</sup>.由于 OFDM 是一种多载波调制技术,在光纤信道中,一些子载波会受到频率选择性衰落的影响而导致部分子信道功率衰减很大,从而整个系统的误码率增大,并且这种情况会随着光纤传输距离的增长而加剧,同时高峰均功率比等缺点也严重影响了信号的传输距离<sup>[9]</sup>.因此,OFDM 系统需与前向纠错(Forward Error Correction, FEC)信道编码结合来提高系统的传输性能<sup>[10]</sup>.

低密度奇偶校验(Low-Density Parity-Check, LDPC)码凭借良好的纠错性能和实用价值,于 2003 年被欧洲采纳为 DVB-S2 标准中 FEC 方案之一<sup>[11]</sup>.近年来,将 LDPC 码应用在光纤通信系统已经得到了大量的研究<sup>[12-13]</sup>.在克服自相位调制和交叉相位调制方面,LDPC 码都优于 RS 码,并且长码型、低行重的

非规则 LDPC 码性能更为优越<sup>[14]</sup>,经 LDPC 编码的 OFDM 信号不仅频谱利用率高,能有效降低光纤色度色散、偏振模色散和非线性等影响<sup>[15]</sup>,同时也能抵抗多模光纤中的模间色散和带宽限制<sup>[16]</sup>,能较大改善光纤传输和接入系统的传输性能<sup>[17]</sup>.

本文通过仿真分析了三种不同码率长码型非规则 LDPC 编码的 OFDM 在两种不同光纤通信系统中的传输性能,表明码率为 0.7 的长码型非规则 LDPC 编码的 OFDM 信号是一种更适合光纤通信的长距离和多模接入的高效的编码调制技术:1)长距离光纤接入,利用 LDPC 编码得到的冗余校验比特能够提高信号的接收性能,LDPC 编码的 OFDM 能够提供很好的偏振模色散和差分群延时补偿<sup>[17]</sup>,有效地抵抗光纤信道中频率选择性衰减;2)折射率渐变多模光纤(Graded Index Multimode Fiber, GI-MMF)接入,由于 GI-MMF 具有模式带宽限制的特性,严重制约了 2.5Gb/s 及以上的传输带宽,因而文中采用高纠错性能的码长为 64800 的非规则 LDPC 作为 FEC 能够有效克服多模光纤的色散、模式带宽限制和模间色散.

## 1 LDPC 编码 OFDM 传输

### 1.1 系统结构

图 1 为 LDPC 编码的 OFDM 信号基带传输强

**基金项目:**国家高技术研究发展计划(No. 2009AA01Z220, No. 2009AA01Z222)和国家自然科学基金(No. 60977049/F050301)资助

**第一作者:**高扬(1986—),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤通信中前向纠错编码和先进调制技术. Email: gaoyang1223@163.com

**导师(通讯作者):**陈林(1968—),男,教授,主要研究方向为偏振模色散补偿、先进调制格式和光纤无线通信技术.

Email: linchenhnu@gmail.com

**收稿日期:**2010-08-10; **修回日期:**2010-10-22

度调制直接检测 (Intensity-Modulated Direct-Detection, IM-DD) 系统的原理图. LDPC 编码和 OFDM 调制都是由 MATLAB 编程实现, 对产生的伪随机比特序列先后进行 LDPC 编码和 OFDM 调制, 调制过程包括串并转换、64QAM 调制映射、导频插入、IFFT、并串转换和添加循环前缀, 产生的 OFDM 信号中有 256 子载波, 其中有 56 个保护间隔, 8 个导频信号载波和 1/32 时间周期的循环前缀. 而后产生的编码 OFDM 信号经由数模转换为模拟电信号后驱动光外部调制器直接进行强度调制生成光载带信号. 经光链路传输后, 基带光 OFDM

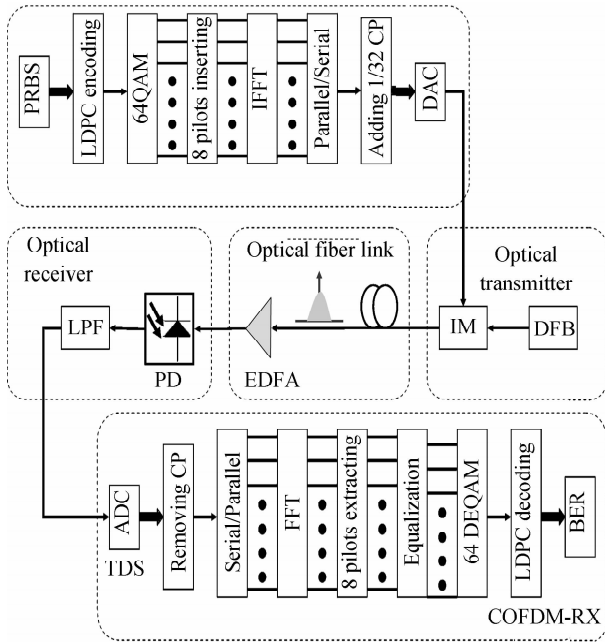


图 1 LDPC 编码 OFDM 的基带传输 IM-DD 系统原理  
Fig. 1 The principle of IM-DD optical LDPC coded OFDM baseband transmission system

信号被接收端的光电二极管实现检测转换为电信号, 在低通滤波和采样后, 使用 MATLAB 程序对采样数据实现 OFDM 解调和 LDPC 译码等离线处理和分析.

伪随机比特序列  $b_{\text{PRBS}}$  经 LDPC 编码后得到编码序列  $C_{\text{LDPC}}$ , 然后每 6 比特映射为一个 64 QAM 符号, 得到的 QAM 信号, 导频数据组合  $X=[X_0 X_1 \dots X_{N-1}]$  作为 IFFT 的输入, 其中导频个数为  $p$ , 则  $X$  中每个元素为相对应子载波搭载的数据, IFFT 后的数据可以表示为

$$x_m = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(\frac{j2\pi km}{N}\right), 0 \leq m \leq N-1 \quad (1)$$

设第  $i$  个 IFFT 输出符号为

$$x(i) = [x_0(i) x_1(i) x_2(i) \dots x_{N-1}(i)] \quad (2)$$

则加入循环前缀后的符号为

$$x_{\text{CP}}(i) = [x_{N-G}(i) \dots x_{N-1}(i), x_1(i) x_2(i) \dots x_{N-1}(i)] \quad (3)$$

由于得到的数据为复数, 则时域的 OFDM 信号可以表示为

$$S(t) = \sum_{k=1}^N (a_k \cos k\Omega t + b_k \sin k\Omega t) \quad (4)$$

式中,  $N$  为 OFDM 符号的子载波数,  $\Omega$  为载波间的频率差,  $a_k, b_k$  分别表示第  $k$  个子载波的复数信号的同相和正交分量. 下面分别对光纤链路中色度色散和模间色散的影响进行理论分析.

### 1) 色度色散分析

光纤的色度色散表现为信号中不同频率成分的延时不同. 不考虑光纤的非线性和噪音的影响, 则经过光调制器的双边带调制并传输单模光纤后得到的光 OFDM 可表示为

$$\begin{aligned} E_{\text{out}}(t) &= A_o \cos(\omega_o t) \left[ 1 + \gamma \sum_{k=1}^N (a_k \cos k\Omega t + b_k \sin k\Omega t) \right] = A_o \gamma \text{Att}(Z) \cdot \\ &\sum_{k=1}^N \cos\left(\omega_o t - \frac{\beta(\omega_o + k\Omega) + \beta(\omega_o - k\Omega)}{2} z\right) \times \left[ a_k \cos\left(k\Omega t - \frac{\beta(\omega_o + k\Omega) - \beta(\omega_o - k\Omega)}{2} z\right) + \right. \\ &\left. b_k \sin\left(k\Omega t - \frac{\beta(\omega_o + k\Omega) - \beta(\omega_o - k\Omega)}{2} z\right) \right] + A_o \text{Att}(Z) \cos[\omega_o t - \beta(\omega_o) z] \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $\omega_o$  为光载波频率,  $\gamma$  为光强度调制器的调制系数,  $\text{Att}(Z)$  为光纤中衰减系数,  $Z$  为传输单模光纤的长度 (单位 km),  $h(t)$  为光纤中色度色散传输函数. 经平方率光电检测器的检测转换, 可以得到光电流, 其表达式为

$$\begin{aligned} I &= \mu |E_{\text{out}}(t)|^2 = \left\{ A_o \gamma \text{Att}(Z) \sum_{k=1}^N \cos\left(\omega_o t - \frac{\beta(\omega_o + k\Omega) + \beta(\omega_o - k\Omega)}{2} z\right) \times \right. \\ &\left[ a_k \cos\left(k\Omega t - \frac{\beta(\omega_o + k\Omega) - \beta(\omega_o - k\Omega)}{2} z\right) + b_k \sin\left(k\Omega t - \frac{\beta(\omega_o + k\Omega) - \beta(\omega_o - k\Omega)}{2} z\right) \right] \left. \right\}^2 + \\ &2A_o \text{Att}(z) \cos(\omega_o t - \beta(\omega_o) z) \left\{ A_o \gamma \text{Att}(Z) \sum_{k=1}^N \cos\left(\omega_o t - \frac{\beta(\omega_o + k\Omega) + \beta(\omega_o - k\Omega)}{2} z\right) \times \right. \\ &\left[ a_k \cos\left(k\Omega t - \frac{\beta(\omega_o + k\Omega) - \beta(\omega_o - k\Omega)}{2} z\right) + b_k \sin\left(k\Omega t - \frac{\beta(\omega_o + k\Omega) - \beta(\omega_o - k\Omega)}{2} z\right) \right] \left. \right\} + \\ &A_o \text{Att}^2(Z) \cos^2[\omega_o t - \beta(\omega_o) z] \end{aligned} \quad (6)$$

由于光载波频率过高,可以将光波作为直流分量,则得到直接检测后的 OFDM 信号为

$$\begin{aligned}
 I_{\text{out}} &= A + B + C \\
 A &= A_0^2 \gamma A t t^2(z) \left\{ \sum_{k=1}^N \cos \left( \frac{\beta(\omega_0 + k\Omega) + \beta(\omega_0 - k\Omega) - 2\beta(\omega_0)}{2} z \right) \times \right. \\
 &\quad \left. \left[ a_k \cos \left( k\Omega t - \frac{\beta(\omega_0 + k\Omega) - \beta(\omega_0 - k\Omega)}{2} z \right) + b_k \sin \left( k\Omega t - \frac{\beta(\omega_0 + k\Omega) - \beta(\omega_0 - k\Omega)}{2} z \right) \right] \right\} \\
 B &= A_0^2 \gamma^2 A t t^2(z) \left\{ \sum_{k=1}^N \left[ a_k \cos \left( k\Omega t - \frac{\beta(\omega_0 + k\Omega) - \beta(\omega_0 - k\Omega)}{2} z \right) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. b_k \sin \left( k\Omega t - \frac{\beta(\omega_0 + k\Omega) - \beta(\omega_0 - k\Omega)}{2} z \right) \right] \right\}^2 \\
 C &= (\gamma + 1) A_0^2 A t t^2(z)
 \end{aligned} \tag{7}$$

从式(7)可以得知光电检测器输出的信号实际包括三分量: OFDM 信号 A、互拍干扰噪声 B 和直流 C。

## 2) 模间色散分析

光 OFDM 经过多模光纤传输后可表示如下

$$\begin{aligned}
 E_{\text{out}}(t) &= A_0 \cos(\omega_0 t) \left[ 1 + \gamma \sum_{k=1}^N (a_k \cos k\Omega t + \right. \\
 &\quad \left. b_k \sin k\Omega t) \right] \int e^{\frac{-\ln(2) \cdot \omega^2}{[2\pi \cdot B_m \cdot (\frac{1}{L})^2]^2}} \cdot e^{j\omega t} d\omega
 \end{aligned} \tag{8}$$

式中,  $B_m$  为多模光纤的模式带宽,  $\omega$  为基带角频率,  $L$  为多模光纤的长度。为了便于分析,令

$$h_m(t) = \int e^{\frac{-\ln(2) \cdot \omega^2}{[2\pi \cdot B_m \cdot (\frac{1}{L})^2]^2}} \cdot e^{j\omega t} d\omega, \text{ 则有}$$

$$E_{\text{out}}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t) [1 + \gamma_{\text{SOFDM}}(t)] * h_m(t) \tag{9}$$

由 PD 检测得到光电流,并将高频的光波作为直流分量处理为

$$\begin{aligned}
 I_{\text{out}} &= \eta |E_{\text{out}}(t)|^2 = A_0^2 A t t^2(t) \times [\cos(\omega_0 t) * \\
 &\quad h_m(t) + \gamma_{\text{SOFDM}}(t) * h_m(t)]^2 \approx A_0^2 A t t^2(t) \times \\
 &\quad [1 + \gamma_{\text{SOFDM}}(t) * h_m(t)]^2 = A_0^2 A t t^2(t) \times \{1 + \\
 &\quad 2\gamma_{\text{SOFDM}}(t) * h_m(t) + \gamma^2 [S_{\text{SOFDM}}(t) * h_m(t)]^2\}
 \end{aligned} \tag{10}$$

可以看出,式(10)中的信号中第二项为 OFDM 信号,第一项直流分量,而第三项为互拍干扰噪声。

因此,OFDM 信号在单模和多模光纤中传输时,互拍干扰噪声是信号接收质量的主要影响因素,为此本文采用 LDPC 码作为信道纠错编码方式来降低 OFDM 子载波间的互拍干扰噪声和色散引起的选择性衰减的影响。光 OFDM 信号在转变为电信号后先经过低通滤波器,然后进行采样并离线实现 OFDM 解调、均衡、译码和误码分析。

## 1.2 LDPC 编译码

所有 OFDM 系统中发射机的第一个模块都是交织和编码,这是因为在存在频率选择性衰减的信道中并行的数据流亦即很多相邻的子载波会受到深度衰减。由于 LDPC 奇偶校验矩阵的稀疏性,在长码型 LDPC 编码分组时,参与同一个校验方程的信息比特数量小并且分散,使得编码本身具有抵抗

连续突发差错的特性,从而避免引入交织器,同时使其存在高效的译码算法,其译码复杂度与码长成线性关系。

本文采用了码长为 64800,最短环长为 6 的 LDPC 非规则结构,在仿真中选取了 1/2、3/4 和 4/5 三种码率来进行数字仿真分析。该码字的校验矩阵是由两部分组成:  $H_{M \times N} = [A_{M \times K} B_{M \times M}]$ ,其中  $A_{M \times K}$  是一个稀疏的随机矩阵,  $B_{M \times M}$  为一阶梯状的下三角矩阵。根据线性分组码的性质,所有正确的码字  $c$  满足:  $Hc^T = 0, \forall c \in C$ 。则可得校验方程组有如下规律:第一个校验方程只与第一个校验比特有关,第二个校验方程只与第一、二个校验比特有关,依次类推。因此 LDPC 码的编码过程可分为两步:首先将码字与一个稀疏矩阵  $A_{M \times K}$  相乘,然后对得到的值递推累加,计算出各个校验比特,得到最终的传输码字。LDPC 译码利用建立在 Tanner 图上的 BP 迭代算法实现的<sup>[18]</sup>,即通过在变量节点和校验节点之间反复的进行软信息交换实现译码,其译码可以分为三步:首先初始化信息节点和校验节点的信息,然后将信息节点发送的信道值通过校验约束方程计算更新校验节点的信息,再根据反馈值对信息节点进行更新修正,最后对信息节点上的修正值进行硬判决。

## 2 单模光纤传输系统仿真分析

图 2 是基带 LDPC 编码 OFDM 信号单模光纤

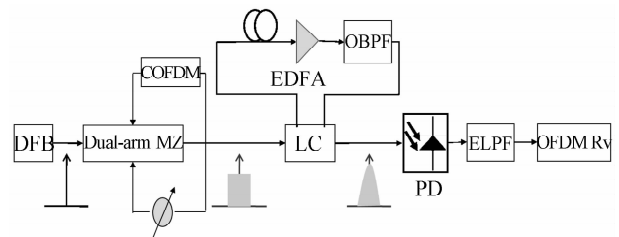


图 2 基带 LDPC 编码 OFDM 信号单模光纤传输系统仿真图(LC:循环控制器)

Fig. 2 The simulation configuration for LDPC coded OFDM baseband transmission over SSMF(LC: loop control)

传输系统的仿真图. DFB 激光源发射功率为 7.74 dBm 频率为 193.1 THz 的 5 MHz 线宽的激光, 经过由 COFDM 信号驱动的双臂马赫曾德尔调制器实现强度调制, 调制器的调制电压为 1.5 V, 偏置电压为 2 V, 信号入纤功率为 0 dBm. 在光纤链路中, 利用循环控制器来控制传输光纤的距离, 每段单模光纤为 70 km, 损耗为 0.2 dB/km. 在接收端, 经灵敏度为 1 A/W 的 PD 检测和低通滤波后, 对接收信号进行采样并进行离线处理, 离线处理均是在 MATLAB 平台上编程实现的. 系统中器件的具体参量如表 1.

表 1 单模光纤传输系统的器件参量

Table 1 Parameters of the simulation transmission over SSMF

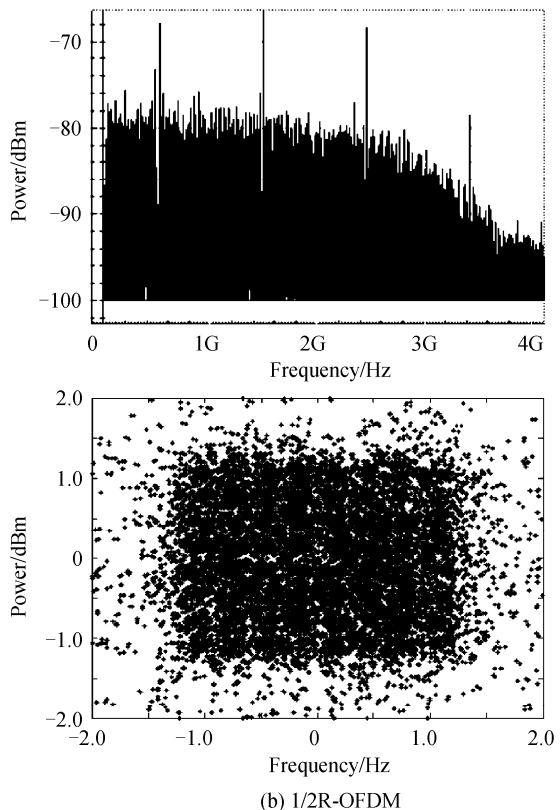
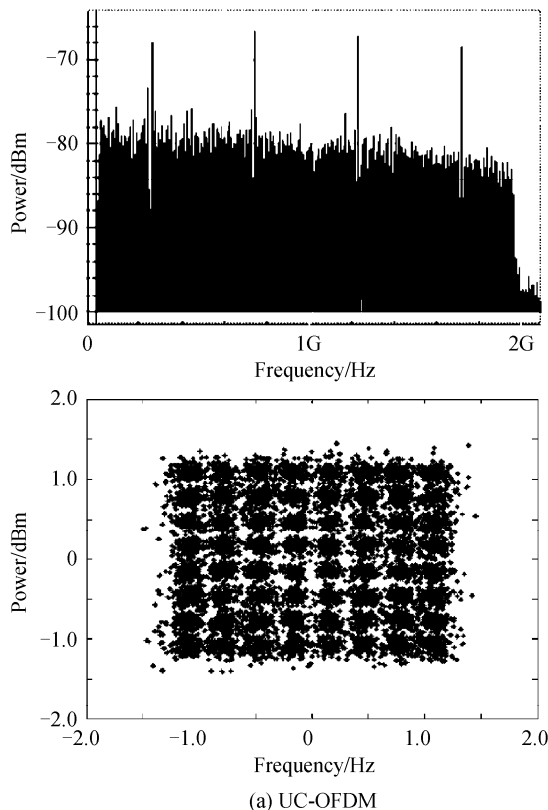
Name	Parameter	Value
DFB	Frequency	193.1 THz
	Linewidth	5 MHz
	Power	7.74 dBm
Dual-arm MZ	Modulation voltage	1.5 V
	Bias voltage	2 V
PD	Responsivity	1 A/W
	Dark Current	10 nA
EDFA	Gain	14 dB
	Noise figure	3 dB
SSMF	Attenuation	0.2 dB/km

在系统中, 比较传输了四种信号: 未编码的 OFDM 信号(UC-OFDM)、码率为 0.5 的 LDPC 编

码的 OFDM 信号(1/2R-OFDM)、码率为 0.75 的 LDPC 编码的 OFDM 信号(3/4R-OFDM)和码率为 0.8 的 LDPC 编码的 OFDM 信号(4/5R-OFDM), 信号的实际接收比特率都为 18 Gbit/s, 则四种信号的传输比特率分别为: 18 Gbit/s、36 Gbit/s、24 Gbit/s 和 22.5 Gbit/s, 相应的信号带宽分别为: 2 GHz、4 GHz、2.67 GHz 和 2.5 GHz.

图 3 给出了四种信号在传输 280 km 后接收频谱图和星座图, 从频谱图分析可知, 由于经编码后的数据携带用于校验信息比特的冗余校验比特位, 其信号带宽明显大于未经编码的原始信息带宽, 由于频谱带宽愈大受衰减的影响也愈大, 其中  $R=0.5$  的信号带宽达到 4 GHz, 因而其高频部分受衰减影响功率降低最为明显, 其星座图也较为发散, 误码性能较差.

图 4 分析比较了四种信号的接收 BRE 性能. 图中(a)~(e)分别是 1/2R-OFDM 信号在不同传输距离的接收频谱图和星座图, 可以明显看到, 随着传输距离的增大, OFDM 信号的频率选择性衰减现象趋于显著, 其高频部分载波的功率明显出现下降, 信噪比降低, 星座图扩散加剧, 接收误码率必然会增大. 虽然编码会导致带宽增大、衰减加剧, 从而提高了原始比特误码率, 但是在一定误码范围内, LDPC 译码能够对其进行校验纠正, 反而能较大幅度提升信息



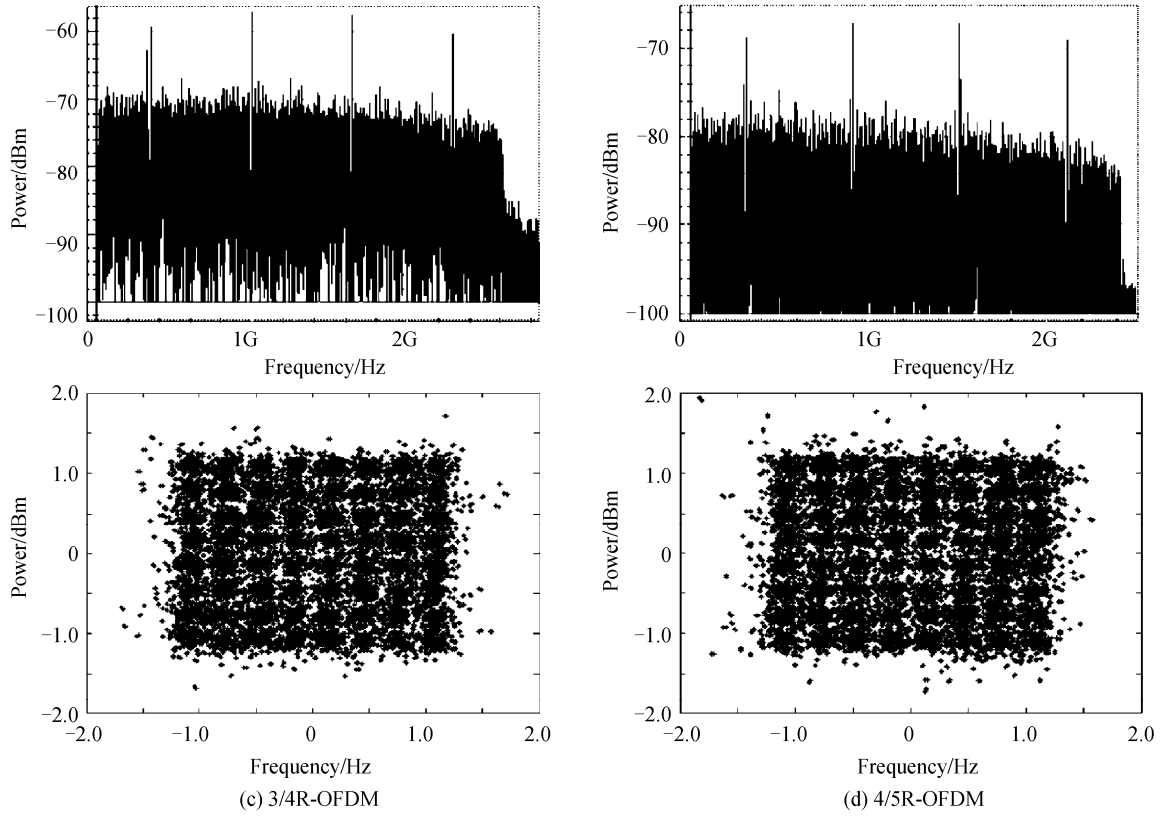


图 3 四种信号的接收频谱图和星座图

Fig. 3 Received spectrums and constellation diagrams of four signals

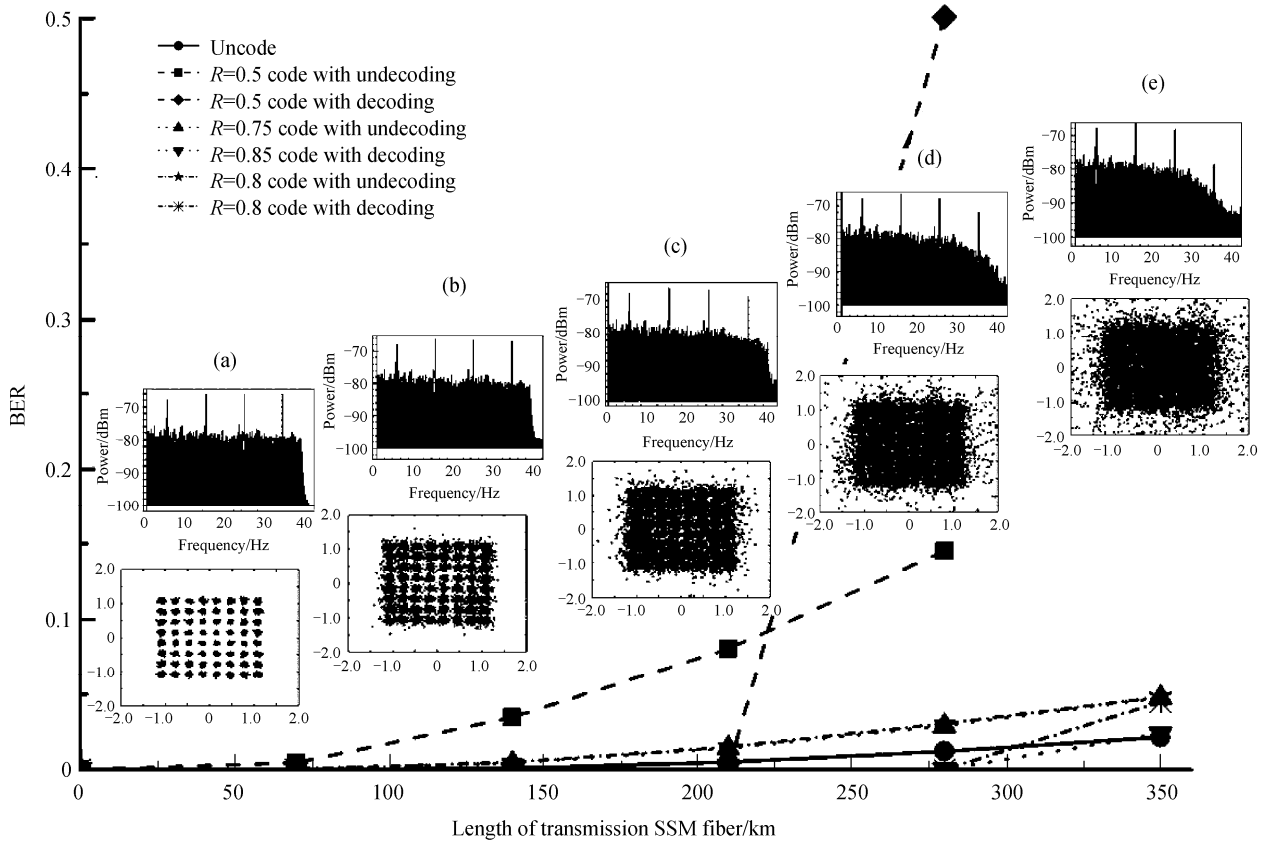


图 4 四种 OFDM 信号随传输距离变化的误码曲线以及不同长度时的信号频谱和星座图

Fig. 4 Curves of BER vs. SMF distance and spectrums and constellations of four signals at different distance

的接收性能. 从 UC-OFDM 接收误码曲线来看, 在传输 70 km 后其误码率已达到  $6.1728 \times 10^{-5}$ , 其接

收结果对于高质量通信已经不可取. 相比较而言, 经 LDPC 编码后的信息虽然初始比特误码率比较高,

但是译码后的误码率大大得到改善,1/2R-OFDM 信号能无误码传送 210 km,而 3/4R-OFDM 和 4/5R-OFDM 信号则都能无误码传送长达 280 km,这凸显了经 LDPC 编码的信号在长距离传输的性能优势,即以一定带宽的代价换取高质量远距离的信息传输.虽理论上低码率的编码信号的误码纠正能力高于高码率的,但是由于 OFDM 信号在光纤传输中会存在频率选择性衰减,使得大带宽信号衰减对误码的影响大于译码纠正能力,因而后两种信号的性能要优于 1/2R-OFDM 信号.对比码率为 0.75 和 0.8 两种信号的误码曲线图,3/4R-OFDM 在传输 350 km 后的误码性能要优于 4/5R-OFDM 信号,可知 3/4R-OFDM 更适合长距离传输.

同时,本文还比较了三种不同码率的译码迭代次数对信号接收误码的影响,如图 5.在初始误码率同为 0.033 4 的情况下,0.5 码率的编码信号随着译码迭代次数的增加能够快速收敛,在第 4 次迭代时能够实现 0 误码译码;0.75 码率的编码信号则要收敛的缓慢,在第 11 次迭代时才能完成正确译码;而 0.8 码率的编码信号已经无法进行正常的译码,经 21 次迭代后其误码依然达到 0.008 371 9,表明比特误码超过该码率的纠错能力.在相同码长时,由于 0.5 码率的码型有一半的比特作为校验比特,校验比特携带的校验信息更多、更靠近正确值,因而一次迭代译码正确的信息比特也会更多.而 0.75 和 0.8 码率只有少部分的比特位是校验比特,一次迭代完成正确译码的可能性低、比特数较少,因此需要更多次迭代计算,其译码计算量继而增大,提高了译码速度和译码器的开销.

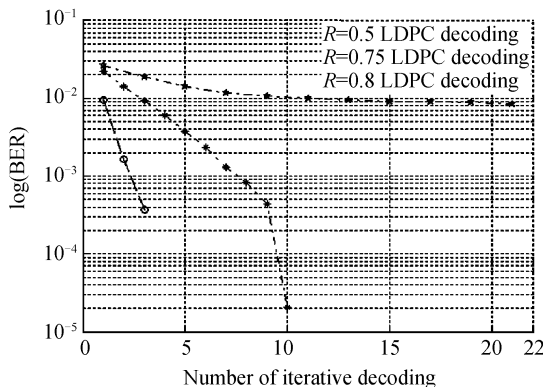


图 5 误码率随 LDPC 译码迭代次数变化曲线  
Fig. 5 Curves of BER vs. iterative number of decoding

### 3 多模光纤接入系统仿真分析

图 6 为 LDPC 编码 OFDM 信号多模光纤接入系统的仿真图. DFB 激光源工作波长为 1 300 nm,线宽为 5 MHz,经过由 COFDM 信号驱动的双臂马赫曾德尔调制器实现强度调制,调制器的调制电压

为 1.5V,偏置电压为 2 V,信号进入单模光纤功率为 0 dBm.信号先后传经 30 km 单模光纤和 200~1 000 m 渐变折射率多模光纤(GI-MMF),其中多模光纤的模式带宽为 500 MHz·km,其折射率为线性变化,具体参量如表 2.光信号到达接收端,经灵敏

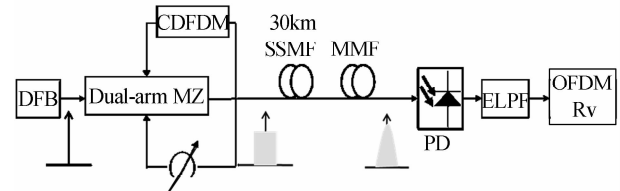


图 6 基带 LDPC 编码 OFDM 信号多模光纤接入系统仿真图

Fig. 6 The simulation configuration for LDPC coded OFDM baseband transmission in multi-mode fiber access network

表 2 多模光纤参量表

Table 2 Parameters of MMF

Parameter	Value
Frequency	1 300 nm
Attenuation	3 dB/km
Modal bandwidth	500 MHz·km
Cutback factor	1
Delay skew	0 ps/km
Noise dynamic	3 dB
Zero dispersion wavelength	1 300 nm
Zero dispersion slope	0.06 ps/(nm <sup>2</sup> ·km)

度为 1A/W 的 PD 检测和低通滤波后,最后对接收信号进行采样和离线处理.

由于接入网下一个目标速率高达 10Gbit/s,因而在仿真中设定接收比特率为 10 Gbit/s,传输的信号依然为 UC-OFDM、1/2R-OFDM、3/4R-OFDM 和 4/5R-OFDM 四种,带宽分别为:1.1 GHz、2.2 GHz、1.5 GHz 和 1.39 GHz.图 7 给出了三种信号的多模传输性能比较.由于多模光纤的模式带宽为 500 MHz·km,输入信号的带宽越大、传输距

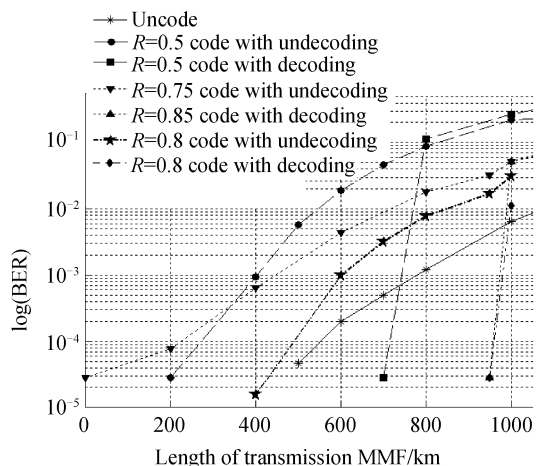


图 7 BER 随多模光纤距离变化曲线  
Fig. 7 Curves of BER vs. MMF distance of signals

离越长,传输带宽窗口越小,衰减越大. UC-OFDM 信号的带宽为 1.1 GHz,且 OFDM 调制格式能够有效的克服多径衰减,因此可以大概推算其无误码传输距离在 400 m 附近,一旦超过这个距离,光纤的通过频谱窗口会继续缩小,导致信号的边频部分功率急剧下降,接收误码率增大. 而经 LDPC 编码后的信号会因编码而使得带宽展宽,因而受多模光纤影响更大. 但是经 LDPC 编码后的信息能以较少的冗余带宽来换取高质量的接收,从误码曲线图中可以看到,1/2R-OFDM 信号能实现长达 700 m 多模光纤无误码传输,而 3/4R-OFDM 和 4/5R-OFDM 信号都能无误码传输 900 m,当距离大于 900 m 时误码增大,接收性能下降,其中 4/5R-OFDM 信号的误码增加要缓慢,即误码性能略优.

#### 4 结论

本文对提出的高速率长距离和多模光纤接入网络结构进行了数值模拟仿真,比较分析了未编码、经码长为 64 800 码率分别为 0.5、0.75 和 0.8 的 LDPC 编码的四种 OFDM 信号在长距离 SMF 传输和 GI-MMF 接入网络中的接收性能,利用基带传输结构和简单的直接检测技术实现了下行数据率 18 Gbit/s 传输长达 280 km 的 SMF 和 10Gbit/s 传输 900 m 的 GI-MMF 后无误码接收. 仿真结果表明:使用码率在 0.75 附近的长码型 LDPC 编码作为信道编码,能够有效的抑制和克服信道中的频率选择性衰减和 OFDM 子载波间互拍干扰噪声的影响及减少模式带宽的限制,验证了长码型非规则的 LDPC 与 OFDM 相结合的编码调制技术是适合长距离和多模光纤网络高速率传输和接入的.

#### 参考文献

- [1] LEI Xiao-yan, CHEN Lin, DONG Ze, *et al.* Research on performances of single sideband modulated OFDM signals in ROF optical transmission system [J]. *Journal on Communications*, 2009, **30**(11): 120-126.  
雷小燕, 陈林, 董泽, 等. ROF 系统中单边带光载 OFDM 信号传输性能研究[J]. *通信学报*, 2009, **30**(11): 120-126.
- [2] YU Jian-jun, HUANG Ming-fang, QIAN Da-you, *et al.* OFDM label swapping for a 112-Gb/s Pol-RZ-QPSK payload system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(17): 1259-1261.
- [3] ZHANG Chao-li, CHEN Lin, SHAO Yu-feng, *et al.* An optical packet switching system with a novel scheme for using optical OFDM label signal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 84-88.  
张超俐, 陈林, 邵宇丰, 等. 采用 OFDM 信号作为标记的光分组交换方案[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 84-88.
- [4] HU Shan-mei, CHEN Lin. A radio over fiber system with frequency sextuple optical millimeter-wave generation carrying OFDM signal utilizing phase modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 699-703.  
胡善梅, 陈林. 基于相位调制器产生六倍频光毫米波的 OFDM 信号光传输系统研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(4): 699-703.
- [5] DAVEY R P, GROSSMAN D B, MICHAEL R W, *et al.* Long-reach passive optical networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(3): 273-291.
- [6] YU Jian-jun, QIAN Da-you, HUANG Ming-fang, *et al.* 16Gbit/s radio OFDM signals over graded-index plastic optical fiber[J]. *in Optical Communication*, 2008, *ECOC 2008, 34th European Conference on*, 2008, P. 6. 16, 5:237-238.
- [7] CHEN Lin, YU Jian-Guo, WEN Shuang-chun, *et al.* A novel scheme for seamless integration of rof with centralized lightwave OFDM-WDM-PON system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(14): 2786-2791.
- [8] YU Jian-jun, HUANG Ming-Fang, QIAN Da-you, *et al.* Centralized lightwave wdm-pon employing 16-QAM intensity modulated OFDM downstream and OOK modulated upstream signals[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(18): 1545-1547.
- [9] BULAKCI O, SCHUSTER M, BUNGE C A, *et al.* Reduced complexity precoding based peak-to-average power ratio reduction applied to optical direct-detection OFDM [C]. *Optical Communication*, 2008, *ECOC 2008, 34th European Conference on*, 2008, P. 4. 11, .5:153-154.
- [10] PERISOARA L A, NEGHINA M, STOIAN R. Performances of FEC coded MIMO OFDM systems [C]. *Circuits and Systems for Communications*, 2008, *ECCSC 2008. 4th European Conference on*, 2008; 295-300.
- [11] MORELLO A, MIGNONE V. DVB-S2: The second generation standard for satellite broad-band services [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2006, **94**(1): 210-227.
- [12] SAHUGUEDE S, FAFCHAMPS D, VERGONJANNE A J, *et al.* LDPC code design and performance analysis on OOK chi-square-based optical channels [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(17): 1190-1192.
- [13] ARABACI M, DJORDJEVIC I B, SAUNDERS R, *et al.* High-rate nonbinary regular quasi-cyclic LDPC codes for optical communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(23): 5261-5267.
- [14] YOUN J, JANG H, KIM K, *et al.* BER performance due to irregularity of row-weight distribution of the parity-check matrix in irregular LDPC codes for 10-gb/s optical signals [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(9): 2673-2680.
- [15] DJORDJEVIC I B, VASIC B, NEIFELD M A. LDPC-coded OFDM for optical communication systems with direct detection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, **13**(5): 1446-1454.
- [16] DJORDJEVIC I B. LDPC-Coded OFDM transmission over graded-index plastic optical fiber links[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(12): 871-873.
- [17] DJORDJEVIC I B, XU Lei, WANG Ting. Beyond 100Gb/s optical transmission based on polarization multiplexed coded-OFDM with coherent detection[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2009, **1**(1): 50-56.
- [18] DJAHANSHAH A H, SIEGEL P H, MILSTEIN L B. Decoding on graphs: LDPC-Coded MISO systems and belief propagation [C]. *Wireless Communications and Networking Conference*, 2008, *WCNC 2008, IEEE*, 2008.

## Performances of Low-density Parity-check Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing in Long Reach and Multi-mode Fiber Access Networks

GAO Yang, CHEN Lin, YU Jian-jun

*(School of Computer and Communication; Key Laboratory for Micro/Nano Opto-Electronic Devices  
Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China)*

**Abstract:** The systems of optical OFDM high-speed transmission over single-mode fiber and multimode access network by employing the long LDPC coding technique were investigated. The dispersion and frequency selective fading effects of optical fiber link were theoretically analyzed, and the transmission performance of LDPC coded OFDM signals with three different rates in the long-distance transmission and multi-mode fiber access networks through the numerical simulation were compared. Simulation results show that the coded modulation technique of long irregular LDPC coded OFDM with 0.75 coding rate is the most effective for long-distance single mode fiber transmission and multi-mode fiber access networks.

**Key words:** Optical communication; Access network; Low-Density Parity-Check (LDPC); Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Graded-Index Multi-Mode Fiber (GI-MMF)