

LDPC 码的改进及在相干光 OFDM 系统中的应用

贺菲菲^{1,2},白成林^{1,2*},牛慧娟^{1,2},张帅^{1,2}

(1.聊城大学 物理科学与信息工程学院,山东 聊城 252059;

2.山东省光通信科学与技术重点实验室,山东 聊城 252059)

摘要:LDPC 码(低密度奇偶校验码)是一种具有超强纠错性能和接近香农极限性能的码型,将改进后的准循环 LDPC 码(QC-LDPC)和 LDPC 卷积码应用于相干光正交频分复用(CO-OFDM)系统中,采用典型的光纤信道的简化模型,基于 MATLAB 仿真软件得到了系统的频谱图、星座图及 LDPC 编码前后的误码率曲线图。研究表明 LDPC 码具有抑制信道色散、降低系统误码率和提高系统性能等优点。

关键词:低密度奇偶校验码 相干光正交频分复用系统 光纤信道 性能分析

中图分类号:TN929.11 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2013)01-031-04

Improvement of LDPC code and application in the coherent light OFDM system

HE Fei-fei^{1,2},BAI Cheng-lin^{1,2},NIU Hui-juan^{1,2},ZHANG Shuai^{1,2}

(1.School of Physics Science and Information Technology of Liaocheng University,
Liaocheng shandong 252059,China;2.Shandong Key Laboratory of
Modern Optical Communication, Liaocheng shandong 252059,China)

Abstract:The LDPC codes has the performances of super FEC and closes to the properties of the Shannon limit,Quasi-cyclic LDPC codes and LDPC convolutional codes designed are suitable for use in optical orthogonal frequency division multiplexing system with coherent detection,the article uses the simple model of typical fiber channel,through analyzing the time domain waveforms,spectrograms,constellations,error rate curves of LDPC encoded by Matlab simulation.It is shown that the LDPC codes has good performance in decreasing channel dispersion,reducing the bit error rate of system and improving the performance of the system.

Key words:low density parity check codes;optical orthogonal frequency division multiplexing with coherent detection;fiber-optical channel; performance analysis

0 引言

随着通信技术的发展和对通信要求的不断提高,单信道传输的数据速率大大增加。当数据速率达到 100Gb/s 时,传统的光纤分段补偿变得昂贵且耗时,对系统色散的补偿很难准确实现。无线移动通信与光通信技术的交叉和融合,使得正交频分复用(OFDM)和低密度奇偶校验码(LDPC)编码技术在宽带无线移动通信系统中广泛使用,成为超高速超大容量超长距离光通信系统研究的热点。

收稿日期:2012-09-29。

基金项目:区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放课题(2011GZKF031109)资助。

作者简介:贺菲菲(1985-),女,硕士生,主要研究方向为光通信技术。

通讯作者:白成林(E-mail:baichenglin@lcu.edu.cn)

光 OFDM 系统(O-OFDM)可分为相干光正交频分复用系统(CO-OFDM)和直接检测光正交频分复用系统(DD-OFDM)。CO-OFDM 系统的优势在于接收机灵敏度高、频谱效率高、对偏振模色散的鲁棒性和对高阶调制的兼容性。但对于高阶调制的应用^[1],其代价是要求提高光信噪比(OSNR)和光纤非线性灵敏度,而且要折中考虑频谱效率、系统性能,同时考虑到 O-OFDM 系统的部分子载波频率选择性衰落和高峰均功率比等缺点,所以有必要结合高效的编码技术提高系统的传输性能。在现有的码型中 LDPC 码已经被证明是一种更接近香农极限的好码,成为最佳的编码技术之一,当其与调制技术相结合应用于 CO-OFDM 系统时,不仅可以获得较高的编码增益,还可以提高系统

贺菲菲,白成林,牛慧娟,等:LDPC 码的改进及在相干光 OFDM 系统中的应用

的色散容忍度。不过目前 CO-OFDM 系统采用的均为一般 LDPC 常规编码方法^[1-9],其码型没有一定的结构,而且编译码复杂度较高,码率设计不可控。针对这些问题,我们对一般 LDPC 码进行了改进,使其具有较低的编译码复杂度和较高的编译码效率,并将改进后的 LDPC 码应用到 CO-OFDM 系统中,详细分析了其传输性能。

1 LDPC 码的改进

针对一般 LDPC 码出现的问题,本文采用文献[10]的方法,对一般 LDPC 码进行改进,分别构造了长度为 4064、码率为 0.75 的 QC-LDPC 码和约束长度为 4064、记忆长度为 1015、码率为 0.75 的 LDPC 卷积码。

1.1 QC–LDPC 码的构造

有限域 $GF(2^a)$ 中包含 2^a 个元素, 由有限域的性质可知, 乘法群因子 $\{b^0, b^1, b^2, \dots, b^{2^{a-2}}\}$ 是一个以 b 为生成元的循环群。行列标号满足关系式 $j = b^{n-i}$, 其中 i 与 j 分别表示行标号与列标号, 并且 $i, j \in \{b^0, b^1, b^2, \dots, b^{2^{a-2}}\}$, 可以构成一个 2^{a-1} 阶的循环置换矩阵。

假设我们规定行号、列号满足关系式： $j = (b^{k-r} + b^{r-k})i$ ， $(k, r) \in \{0, 1, 2, \dots, 2^a - 2\}$ 。如果 $k=r$ ，则不能构成循环置换矩阵； $k \neq r$ 的任意参数对 (k, r) 可以对应一个循环置换矩阵，记为 $p(k, r)$ 。那么， (k, r) 依次取 $\{0, 1, 2, \dots, 2^a - 2\}$ ，可以得到稀疏矩阵 H 。注意，对角线处不能构成置换矩阵。采用以上编码思想我们构造了长度为 4064，码率为 0.75 的 OC-LDPC 码。

1.2 LDPC 卷积码的构造

采用一般方法构造 LDPC 码后我们可以得到一个基矩阵,然后对基矩阵沿对角线剪切、交换和重复,得到完整的 LDPC 卷积码奇偶校验矩阵,其步骤如下:

①对于设定的码率 $R=n-1/n$ 以及行重 (J,K) 的值必须等于 $J \times n$ 。首先构造 (J,K) 规则 LDPC 码，其奇偶校验矩阵记为 H_{blk} ，子循环维数为 b ，重量为 1。

②对矩阵 H_{blk} 进行“列交换”，使得列交换后的每个子矩阵满足 $H_{blk2} = [H_1, H_2, \dots, H_n]$, $i=(1, 2, \dots, n)$ 。对于矩阵 H_{blk2} 中的子矩阵 H_i , 其矩阵特征为对角线处的子循环矩阵为单位矩阵 I , 非对角线处的矩阵仍然是循环置换矩阵, 即 2.1 中构造的循环置换矩阵 $p(k, r)$ 形式。做“列变化”的目的

是使得 LDPC 卷积码具有单位矩阵的特性，易于编码器能够有效实现；二是译码器访问过程简洁直观。

③重新组合 $H_i^T, i=(1,2,\dots,n)$, 得到 LDPC 卷积码的基矩阵 H_b^T 。组合的原则是: 将 H_i^T 的第一行作为 H_b^T 的第一行, H_2^T 的第一行作为 H_b^T 的第二行, 以此类推, 即 H_b^T 的前 n 行由 H_i^T 的第 1 行构成, H_b^T 的第 j 个 n 行由 H_i^T 的第 j 行构成(其中 $i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,J \times b$)。

④按照文献[11]的方法对基矩阵 H_b^T 进行剪切、交换以及重复得到时变 LDPC 卷积码的奇偶校验矩阵 H_{conv}^T 。这种方法得到的 LDPC 卷积码的周期 T 为 $J \times b$, 记忆长度 m 为 $T-1$, 约束长度为 $(m+1) \times n = Kb$ 。以此我们设计了约束长度为 4064, 记忆长度为 1015, 码率为 0.75 的 LDPC 卷积码。

采用该方法构造的 LDPC 码具有一定的循环结构, 其编译码复杂度降低, 编译码效率提高。

2 采用 LDPC 码进行编码的 CO-OFDM 系统模型

图 1 是采用 LDPC 码进行编码的 CO-OFDM 系统框图, 主要有以下几部分构成: ① 编码器和译码器; ② 调制器和解调器; ③ OFDM 发射机和 OFDM 接收机; ④ 射频至光的上变换器和光至射频的下变换器; ⑤ 光信道。工作过程如下: 首先对发送的随机二进制信息比特进行编码, 然后进入调制器进行调制。调制后的信息进入 OFDM 发射机, 进行串/并转化和快速傅立叶反变换, 并将信息送入上变换器转化为光信号送入信道。经下变换器转换为电信号后, 进入 OFDM 接收机进行并/串变换和快速傅立叶转化, 然后进入解调器解调。解调后的信号进入 LDPC 译码器进行译码, 将

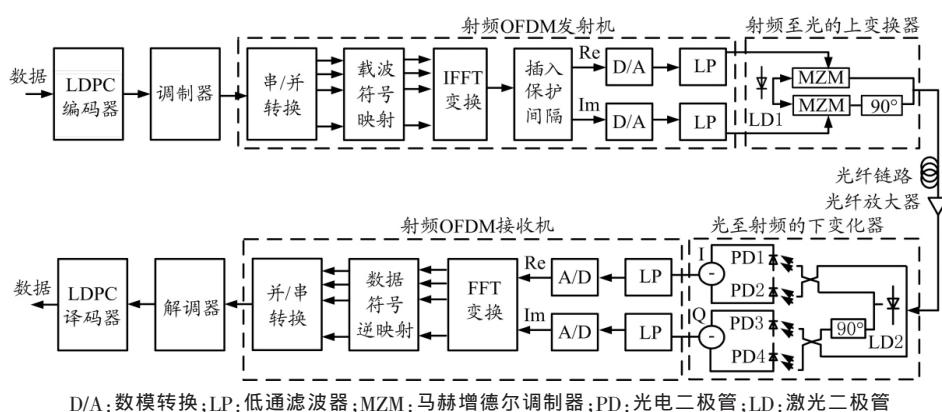


图 1 采用 LDPC 码进行编码的 CO-OFDM 系统原理框图

译码信息和输入信息做对比,最后通过数值仿真计算系统的误码率,分析系统的传输性能。

在光纤信道中,根据光脉冲传输理论^[12],由于色散效应和非线性的存在,随着传输距离的增加,脉冲幅度降低且宽度展宽,接收的频谱两侧会发生阶梯状变化或是抖动。为了能够更清楚地了解色散效应对系统的影响,以及改进型 LDPC 编码技术在抑制信道色散效应方面的性能,本文从光信号的频谱图、接收信号的星座图和误码率曲线图三个方面进行研究,进而分析系统的传输性能。

3 系统仿真及结果分析

为了较好地说明改进型 LDPC 编码技术对系统性的影响,我们以改进型 QC-LDPC 码和 LDPC 卷积码为例对 CO-OFDM 系统进行编码。另外,我们还选用了码率为 0.75、围长为 8 的一般 LDPC 码(4320, 3242)作为对比,相关参数设置如表 1 所示。

表 1 相关参数设置

传输速率	40Gb/s	QC-LDPC	$L=4064, w=8$
子载波数	128	LDPC 卷积码	$L=4064, m=1015$
IFFT 点数	512	译码方式	BP 译码
保护间隔	128	迭代次数	100
调制方式	64QAM	编码速率	0.75
光纤跨距	$l=80\text{km}$	传播常数	$d=17e^{-3}$
接收机灵敏度	$R=0.8$	光纤损耗	$\delta=0.2L$

3.1 频谱图分析

图 2 所示是 CO-OFDM 系统采用 LDPC 码进行信道编码前后的频谱变化仿真图。由图 2(a)可以看出,由于色散效应的影响,信号经信道后,与发送信号的频谱相比,接收到的信号频谱两侧开始出现阶梯状的抖动,频谱两侧上移且展宽。由图 2(b)可以看出,与未编码的接收信号频谱相比,采用一般的 LDPC 编码后,其接收信号的频谱两侧稍下移,且阶梯抖动度有所减小。由图 2(c)和图 2(d)可知,与采用一般 LDPC 码编码的接收信号频谱相比,系统分别采用 QC-LDPC 码和 LDPC 卷积码进行信道编码后,其接收到的信号频谱两侧再次稍下移且阶梯抖动进一步减小,频谱两侧的展宽度也明显减小。从频谱两侧抖动程度和频谱展宽度变化可以发现,在采用改进型 LDPC 编码技术之后,频谱阶梯抖动程度相对较小,频谱展宽值也较小,从而证明,改进型 LDPC 编码技术可以较好地抑制信道

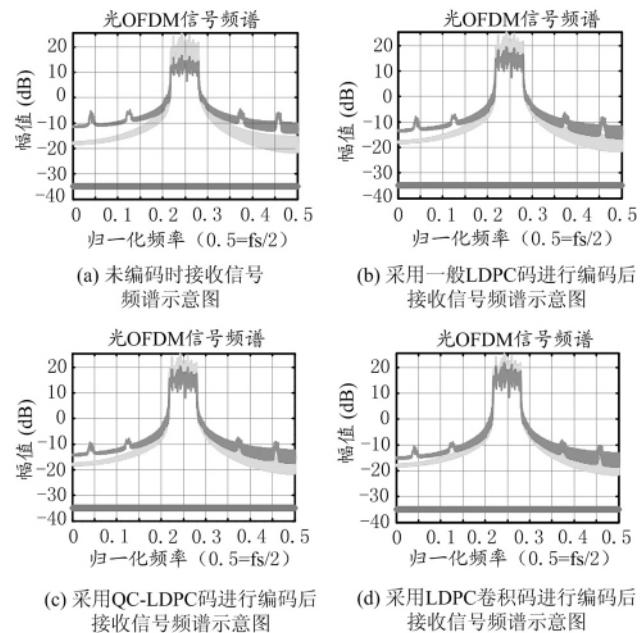


图 2 发送和接收信号的频谱示意图

中的色散效应,且 LDPC 卷积码的抗色散能力要高于 QC-LDPC 码。

3.2 接收信号星座图分析

图 3 为编码前后接收到的信号星座图。由图 3(a)和图 3(b)可以看出,当系统没有采用编码时,由于色散效应的影响,接收信号的星座点位置分布没有一定的规律,恢复信号原来所在的位置较困难;系统采用一般 LDPC 码进行编码后,接收到的信号星座点分布呈现一定的规律。从图 3(c)和 3(d)则可以看出,系统采用 QC-LDPC 码进行编码后,接收到的信号星座点间距增大,出现的多层阴影较少,每个星座点的位置基本可以确定;当系统采用 LDPC 卷积码进行编码时,信号星座点位置分布不仅规律性较强,间距增大,而且星座点位置基本为平均分布,每个星座点的位置可以较准确地确定。以上研究表明,在抑制信道色散效应时,改进后的 LDPC 编码技术表现出较好的性能,且 LDPC 卷积码的性能要优于 QC-LDPC 码的性能。

3.3 误码率曲线图

为了方便研究,本文以 80km 跨距光纤传输距离为例,如需分析长距离光纤传输特性,可以通过增加光纤放大器的形式增加其传输距离。图 4 给出了采用改进型 QC-LDPC 码和 LDPC 卷积码对 CO-OFDM 系统进行编码后的误码率曲线图。

由图 4 可以看出,在低误码率时,未编码的系统性能明显降低;当误码率保持 10^{-6} 时,在单模光纤中传输 80km 之后,采用改进型 QC-LDPC 码和改进型

贺菲菲,白成林,牛慧娟,等:LDPC 码的改进及在相干光 OFDM 系统中的应用

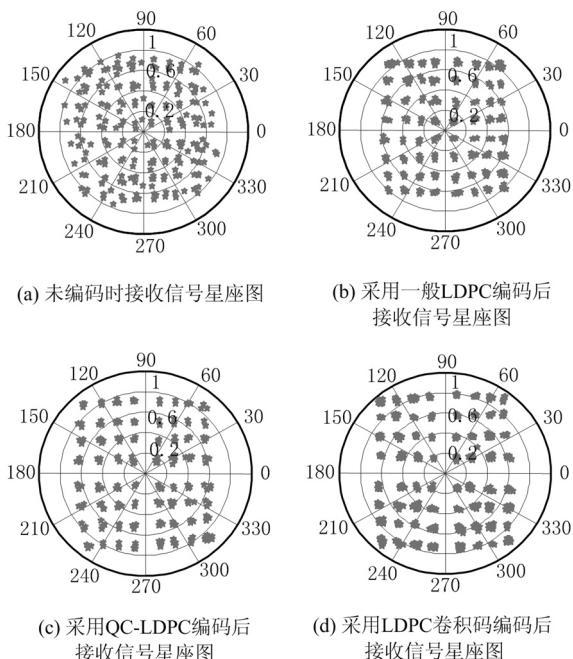
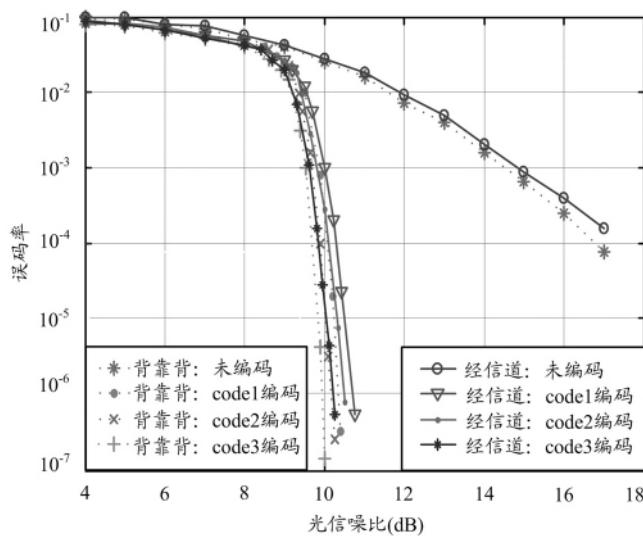


图 3 编码前后接收信号星座图

LDPC 卷积码进行编码的系统增益比采用一般 LDPC 码编码的系统增益分别提升大约 0.25dB 和 0.45dB; 并且系统分经 QC-LDPC 和 LDPC 卷积码进行编码之后, 两种系统(背靠背系统和经 80km 单模光纤传输系统)的性能差值分别为 0.26dB 和 0.2dB。由以上数据分析可知, 基于两种改进型 LDPC 码进行编码的 CO-OFDM 技术即使没有光色散补偿, 在误码率保持 10^{-6}



code1:一般 LDPC 码;code2:QC-LDPC 码;code3:LDPC 卷积码

图 4 采用 LDPC 码进行编码的 CO-OFDM 系统误码率曲线图

时, 传输 80km 系统的性能也仅分别降低 0.26dB 和 0.2dB。由此可见, 采用 QC-LDPC 码和 LDPC 卷积码进行编码的系统均可表现出良好的性能, 而且采用 LDPC 卷积码进行编码的系统性能优于采用 QC-LDPC 码进行编码的系统性能。

4 结束语

本文利用改进后的 QC-LDPC 码和 LDPC 卷积码对 CO-OFDM 系统进行信道编码, 基于 Matlab 仿真得到系统的频域频谱图、接收信号星座图和系统误码率曲线图。由仿真结果及数据分析表明, 基于 LDPC 编码的 CO-OFDM 系统性能明显优于未采用编码的系统性能, 且采用改进型 LDPC 码进行编码的 CO-OFDM 系统性能与采用一般 LDPC 码进行编码的系统性能相比有一定程度的改善, 同时发现 LDPC 卷积码在抑制信道色散及降低系统误码率方面, 比 QC-LDPC 码具有更大的优势。

参考文献:

- [1] 白成林, 冯敏, 罗清龙. 光通信中的 OFDM [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [2] 曹飞. LDPC 码在相干 OFDM 通信系统下的研究与实现 [D]. 四川: 电子科技大学, 2010.
- [3] 叶小霞, 姚善化, 徐烟红. LDPC 信道编码在 OFDM 通信系统中的应用及性能仿真 [J]. 中国电子商情, 2010, (5): 44~49.
- [4] 黄希. LDPC 码编码算法研究与改进 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [5] 袁东风, 张海刚. LDPC 码理论与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 149~240.
- [6] 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.
- [7] DJORDJEVIC I B. LDPC-coded OFDM transmission over graded-index plastic optical fiber links [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(12): 871~873.
- [8] DJORDJEVIC I B. PMD compensation in fiber-optic communication systems with direct detection using LDPC-coded OFDM [J]. Optics Express, 2007, 15(7): 3692~3701.
- [9] 高扬, 陈林, 余建军. 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 [J]. 光子学报, 2011, 40(2): 161~168.
- [10] 张仲明, 许拔, 张尔扬. 第十四届全国信号处理学术年会 (CC-SP-2009) 论文集: A 集 [C]. 北京: 中国社会科学出版社, 2009: 400~403.
- [11] FELSTROM A J, ZIGANGIROV K S. Time varying periodic convolutional codes with low density parity check matrix [J]. IEEE Transaction on IT, 1999, 45(6): 2181~2191.
- [12] 施娟, 侯韶华. 光纤耦合器中光孤子传输的仿真研究 [J]. 电子元器件应用, 2008, 10(4): 65~67.