

室内可见光通信 ACO-OFDM 系统信道编码性能分析

陈鹏远^{1,2},李明洋^{1,2},冯满^{1,2},王裕如^{1,2},李萍^{1,2*}

(1.大连工业大学 信息科学与工程学院,辽宁 大连 116034;2.大连工业大学 光子学研究所,辽宁 大连 116034)

摘要:为降低传输信道中障碍物反射对可见光通信产生的干扰和多径效应,首先,搭建了非对称限幅光正交频分复用(ACO-OFDM)仿真模型和信道模型,仿真验证了采用基于正交幅度调制(16QAM)的 ACO-OFDM 调制在直射链路和反射链路中均有更好的抗噪性能。然后,将级联 BCH 和卷积码的编码方式加入 ACO-OFDM。仿真结果表明:采用级联 BCH 码和卷积码的 ACO-OFDM 系统具有更高的抗噪性能以及更好的抗干扰性能,改善了可见光通信性能。

关键词:非对称限幅光正交频分复用;信道编码;级联 BCH 和卷积码

中图分类号:TN914 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2022)03-0071-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of channel coding performance of ACO-OFDM system for indoor visible light communication

CHEN Pengyuan^{1,2}, LI Mingyang^{1,2}, FENG Man^{1,2}, WANG Yuru^{1,2}, LI Ping^{1,2*}

(1. School of Information Science and Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian Liaoning 116034, China;

2. Institute of Photonics, Dalian Polytechnic University, Dalian Liaoning 116034, China)

Abstract: In order to reduce the interference and multipath effect of obstacle reflection on visible light communication in the transmission channel. Firstly, asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing (ACO-OFDM) simulation model and channel model are built in this paper. the simulation results show that the ACO-OFDM modulation based on quadrature amplitude modulation (16QAM) has better anti-noise performance in both direct link and reflection link. the coding method of concatenated BCH and convolutional code is added to ACO-OFDM. The simulation results show that the ACO-OFDM system using cascade BCH and convolutional code has higher anti-noise performance and better anti-jamming performance, and improves the performance of visible light communication.

Key words: asymmetric limiting light orthogonal frequency division multiplexing, channel coding, cascade BCH and convolutional code

0 引言

在可见光通信中,光在空气中传播会产生多径效应,正交频分复用(OFDM)技术良好的抗多径能力可解决这一问题,因此被应用在可见光通信中。由于可见光通信系统采用强度调制/直接检测(IM/DD),要求

信号形式必须是非负实数,常用的非对称限幅光 OFDM(ACO-OFDM)是一种光功率效率较高的单极化 OFDM 方式,不仅能提高带宽利用率和信号传输速率,还能提高系统抗噪性能,有效减少可见光多径衰落造成的影响。2016 年,复旦大学的徐宪莹教授团队^[1]利用任意波形发生器(AWG)产生的 ACO-OFDM 信号加载到 LED 芯片上,传输速率可达到 750 Mb/s。2020 年,复旦大学迟楠教授团队^[2]在室内 1 m 自由空间下采用 ACO-OFDM 技术实现通信速率最大达到 9.51 Gb/s 的可见光通信系统,误码率(BER)低于 3.8×10^{-3} ,但是未编码的 ACO-OFDM 系统抗噪性能较差;同年,车振等人将极化码^[3]加入到可见光通信系统中,有效解决了

收稿日期:2021-12-06。

作者简介:陈鹏远(1997—),男,硕士研究生,现就读于大连工业大学信息科学与工程学院光学工程专业,主要从事室内可见光通信方面的研究工作,并针对室内可见光通信系统调制方式、信道编码和信道估计内容进行研究及仿真验证。

*通信作者:李萍(1969—),女,硕士,教授,主要研究方向为光通信、智能系统。



可见光通信的可靠性和物理层安全性问题。本文在此基础上,将级联 BCH 和卷积码加入 ACO-OFDM 系统,并从抗噪及抗多径方面进行优化。

1 ACO-OFDM 系统仿真模型

目前,可见光通信系统中大多使用传统的二进制开关键控(OOK)调制和脉冲位置调制(PPM),这些调制方式虽然简单但数据传输速度慢、频谱利用率低,不符合高速通信的要求。ACO-OFDM 可以提高带宽利用率和减少信道间干扰,因此,本文搭建了可见光通信 ACO-OFDM 系统^[4]仿真模型,如图 1 所示。

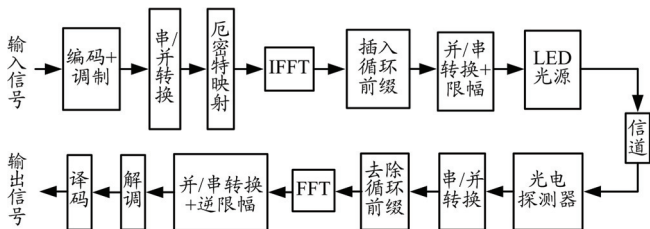


图 1 可见光通信 ACO-OFDM 系统框图

在发射端,原始信号经信道编码、相移键控(PSK)或者正交幅度调制(QAM)后,得到的串行信号被转换成并行数据流,然后进行插入导频、厄米特映射、傅里叶逆变换(IFFT)、加入循环前缀、将信号负数部分置零和转为串行数据流等操作,最后形成 ACO-OFDM 符号被调制到 LED 光源发射入无线信道中。接收端执行上述相反过程操作^[5]。

2 信道模型

在直射链路中,接收端和发射端是严格对准的,这种链路的优点是频偏利用率较高,但是一旦传输路径中出现障碍物就会阻断通信。在反射链路^[6]中,通过降低收发两端的指向要求,接收视角一般较大,使系统不受阴影效应的影响,但链路中的多径效应严重影响系统性能,限制了信号传输速率,其链路模型如图 2 所示。

光源 S 一般可由位置向量 $\mathbf{d}_s$ 、单位方向向量 $\mathbf{n}_s$ 、功率 P_s 和辐射强度模式函数 $G(\varphi)$ 决定^[7]。其中, φ 是光源发出的光线(照到某一接收器)相对于光源轴的夹角, $G(\varphi)$ 定义为夹角 φ 处单位立体角内光源发出的辐射强度。当发射机的光源采用朗伯辐射模型时,光源的辐射强度可表示为

$$G(\varphi) = \frac{n+1}{2\pi} P_s \cos^n \varphi, \varphi \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \quad (1)$$

其中, n 称为朗伯辐射序数, $n = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \theta_{1/2})}$, $\theta_{1/2}$ 为光源

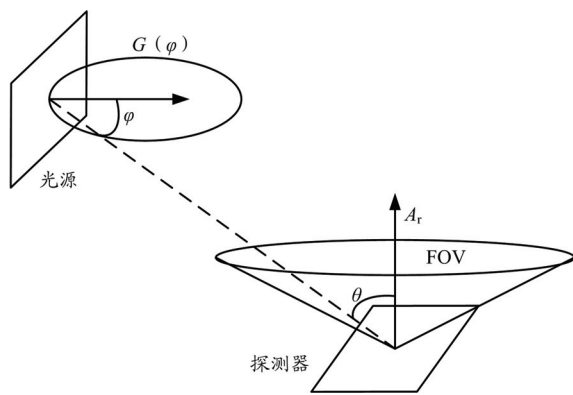


图 2 反射链路模型

半功率角。光源 S 可以由一个三元组决定^[8],表示为

$$S = \{\mathbf{d}_s, \mathbf{n}_s, n\} \quad (2)$$

类似地,接收单元的参数包括了其位置向量 $\mathbf{d}_r$ 、单位方向向量 $\mathbf{n}_r$ 、面积 A_r 和视场角(FOV)。所以接收器 R 可以由一个四元组决定,表示为

$$R = \{\mathbf{d}_r, \mathbf{n}_r, A_r, FOV\} \quad (3)$$

假设所有的发射面都是理想朗伯漫反射,辐射模式与光的入射角无关。对发生在具有面积 A_r 和反射率 ρ 的微反射面上的反射建模,分为两步:①认为这个微反射面是一个面积为 A_r 的接收器,计算它接收到的光功率 P ;②把这个微反射面当成功率 ρP 和 $n=1$ 的理想朗伯光源^[9]。

对于某一特定的光源 S 和接收器 R , 冲激响应可以表示为

$$h(t; S, R) = \sum_{k=0}^{\infty} h^{(k)}(t; S, R) \quad (4)$$

其中, $h^{(k)}(t)$ 表示第 k 次反射的响应。

本文首先计算零次反射(即直射链路)的冲激响应,它表示光从一点传到另一点未经过反射的光功率传递系数^[10],表达式为

$$h^{(0)}(t; S, R) \approx \frac{n+1}{2\pi} \cos^n \varphi \Omega \text{rect}\left(\frac{\theta}{FOV}\right) \delta\left(t - \frac{D}{c}\right) \quad (5)$$

其中, Ω 代表微反射面相对于光源的立体角, c 是光速, D 是光源和接收器的距离,矩形函数定义为

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 1 \\ 0, & |x| > 1 \end{cases} \quad (6)$$

然后,本文计算一次反射的冲激响应^[11],表达式为

$$h^{(1)}(t; S, R) = \int_s \rho_s h^{(0)}\left(t; S, \left\{b, z, \frac{\pi}{2}, r^2\right\}\right) \otimes h^{(0)}(t; \{b, z, 1\}, R) \quad (7)$$

式(7)表示对 S 面上的所有微反射体进行积分, b 表示 S 上微反射体的位置向量, z 是 b 处微反射面的

单位法向量, ρ_r 是 b 处微反射面的反射率。本文利用 Simulink 分别按照式(5)、式(7)的信道冲激响应,搭建可见光通信信道直射链路、一次反射链路模型^[12]。

3 ACO-OFDM 系统调制方式选择

3.1 多种调制方式的抗噪性能比较

本文通过仿真对二进制移相键控(BPSK)、16QAM、脉冲位置调制(PPM)和 ACO-OFDM 进行抗噪性能比较,系统模型和信道模型参数设置分别如表 1 和表 2 所示,仿真结果如图 3 所示。可以看出,在相同的 BER 下,与 BPSK、16QAM 和 PPM 相比,采用 ACO-OFDM 调制方式的可见光通信系统直射链路和反射链路中信号比(SNR)更低,说明该调制方式具有更好的抗噪性能。

表 1 ACO-OFDM 系统模型仿真参数

参数名称	值
信源采样时间/s	0.001
子数据载波	128
FFT 点数	256
循环前缀长度/符号	16
OFDM 符号数	1024
BER 统计模块接收延时/bit	131076

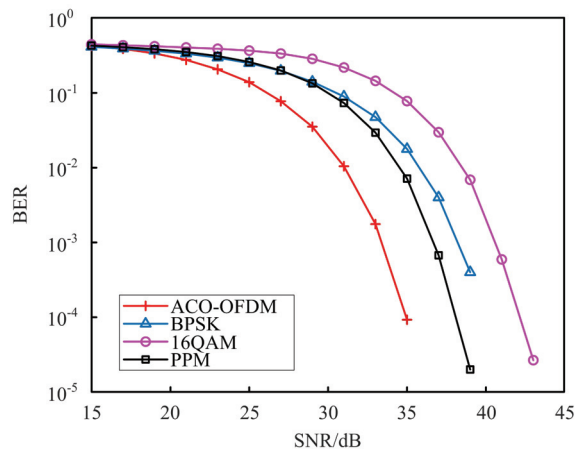
表 2 ACO-OFDM 系统信道参数设置

参数名称	值
收发间距/m	1
探测器高度/cm	0.85
障碍物反射率	0.723
光源发射单元光功率/mW	20
光源发射单元中心光强/cd	0.73
光源发射单元半功率角/(°)	60
探测器有效面积/cm	1
探测器视场角/(°)	90°
光学滤波增益	1

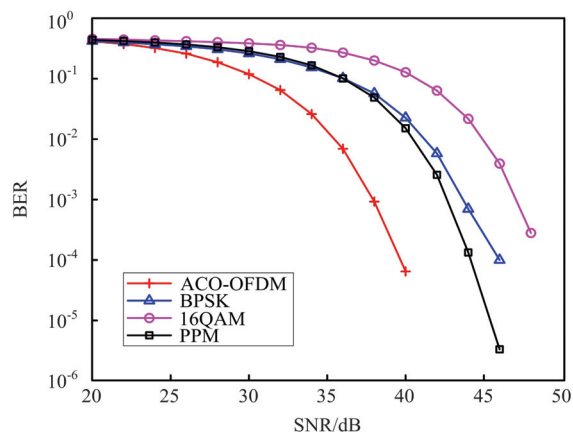
另外,当 $BER=10^{-4}$ 时,在直射链路中,ACO-OFDM 系统的抗噪性能优于 PPM 系统 3 dB;而在反射链路中,虽然反射链路多径效应严重,但 ACO-OFDM 系统的抗噪性能反而优于 PPM 系统 5 dB,这表明 ACO-OFDM 系统具有更好的抗多径性能。

3.2 多种 QAM 阶数的 ACO-OFDM 系统的 BER 比较

QAM 的调制阶数越高,其传输效率越高,但无限地增加 QAM 调制阶数,会导致系统的 BER 陡然增加。本文对基于 16QAM、64QAM、256QAM 和 1024QAM 的 ACO-OFDM 系统进行了 BER 比较,信源采样时间为 0.001 s,运行仿真结果如图 4 所示。可以看出,在相同的 SNR 下,基于 16QAM 的 ACO-OFDM 系统 BER 最低,比更高的调制阶数 QAM 抗噪性能更好。因此,本文选择基于 16QAM 的 ACO-OFDM 作为可见光通信的调制方式。



(a) 直射链路



(b) 反射链路

图 3 多种调制方式抗噪性能比较

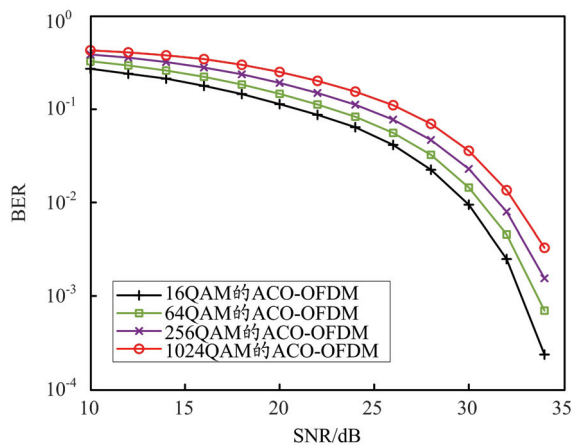


图 4 多种 QAM 阶数的 ACO-OFDM 系统 BER 比较

4 ACO-OFDM 系统编码方式

发射机发送位字符串时可能面临随机错误和突发错误,解决这些错误的方法有 2 种:一是在接收器和发射器中使用交织器,将长串的错误分散成离散的

错误^[13],突发错误被转换为随机分布式错误;二是使用级联码,级联码在减少现有突发错误和随机错误方面起着重要作用^[14],级联码中的块代码通常位于外侧,卷积码位于级联结构的内侧^[15]。

由于 BCH 码纠错能力强,卷积码约束能力强、时延小,因此本文采用级联 BCH 码和卷积码,其原理框图如图 5 所示^[16]。串行的 N 位信息符号首先进行串/并转换,之后依次送入 BCH 码编码器和卷积码编码器进行内部编码^[17]。本文使用的卷积码编码器是约束长度为 7 的 1/2 额定编码器结构。被编码的比特串经交织器后由 16QAM 进行调制,再进行厄密特映射和 IFFT,将子载波从频域转换到合适的时域^[18]。最后通过并/串转换和限幅调制后被光源发射到可见光信道(直射链路、反射链路)。接收端执行上述相反过程操作。

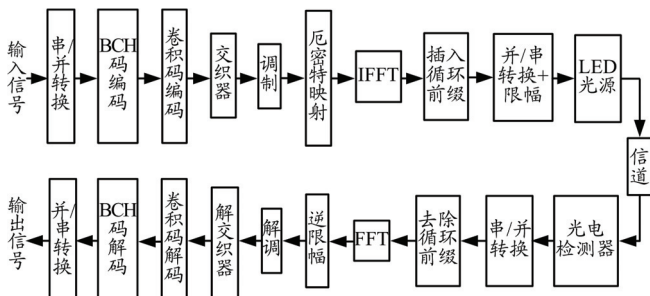


图 5 级联 BCH 码和卷积码框图

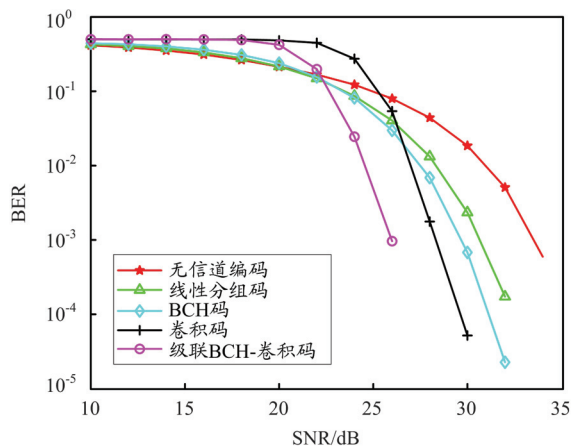
5 ACO-OFDM 系统编码性能分析

本文仿真比较了无信道编码、基于线性分组码、BCH 码、卷积码以及级联 BCH 码和卷积码的 ACO-OFDM 系统的抗噪性能,仿真参数设置如表 3 所示,仿真结果如图 6 所示。

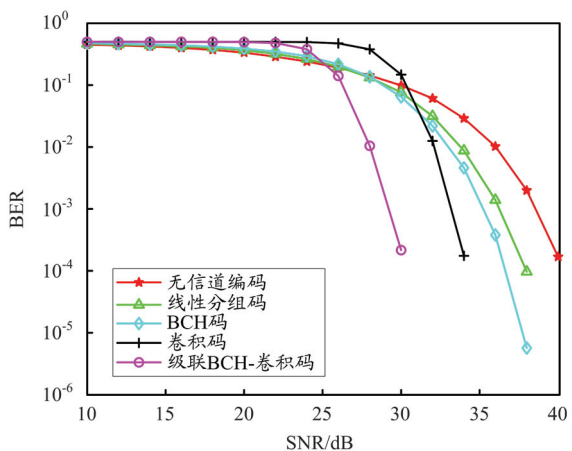
表 3 基于多种信道编码的 ACO-OFDM 系统仿真参数设置

参数	值
线性分组码生成矩阵	$[[1\ 1\ 0; 0\ 1\ 1; 1\ 1\ 1; 1\ 0\ 1]\ \text{eye}(4)]$
卷积码格式	$\text{poly2trellis}(7, [171\ 133])$
Viterbi 解码回溯深度	50
BCH 码字长度/bit	5
BCH 码率	1/2

从图 6(a)可以看出,基于卷积码、线性分组码、BCH 码以及级联 BCH 和卷积码的 ACO-OFDM 系统的抗噪性能均优于无信道编码的 ACO-OFDM 系统,当 $BER=10^{-4}$ 时,相比无信道编码的 ACO-OFDM 系统,线性分组码、BCH 码、卷积码以及级联 BCH 和卷



(a) 直射链路



(b) 反射链路

图 6 多种编码方式的 ACO-OFDM 系统抗噪性能比较图

积码的 SNR 分别降低了 2 dB、3 dB、4 dB 和 7 dB。从图 6(b)可以看出,相比无信道编码的 ACO-OFDM 系统,当 $BER=10^{-4}$ 时,线性分组码、BCH 码、卷积码以及级联 BCH 和卷积码的 SNR 分别降低了 2 dB、3 dB、4 dB 和 9 dB。综上可知,级联 BCH 码和卷积码比其它编码方式具有更高的抗噪性能。

反射链路存在较为严重的多径效应,对比图 6(a)和图 6(b)可知,多种编码方式中,只有采用级联 BCH 码和卷积码时在反射链路情况下的抗噪性能比在直射链路情况下提高得更多,表明级联 BCH 码和卷积码具有很好的抗多径干扰性能。

6 结束语

本文提出了将级联 BCH 码和卷积码用于可见光通信 ACO-OFDM 系统中,提高了可见光通信系统的性能。从仿真结果可以看出,加入级联 BCH 码和卷积码的 ACO-OFDM 系统在可见光通信信道为直射链路

及反射链路时的抗噪性能均优于未编码时的性能,且在反射链路中性能更好,表明加入级联 BCH 码和卷积码能提高 ACO-OFDM 系统的抗噪和抗多径干扰能力。

参考文献:

- [1] 徐宪莹, 岳殿武. 可见光通信中正交频分复用调制技术 [J]. 中国光学, 2021, 14(3): 516–527.
- [2] 迟楠, 陈慧. 高速可见光通信的前沿研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(3): 1–12.
- [3] 车振. 基于极化码的可见光通信安全信道编码技术研究[D]. 广东: 暨南大学, 2020.
- [4] 蔡促. 基于离散哈特莱变换的非对称截断光 OFDM 系统性能研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
- [5] 迟楠. LED 高速可见光通信关键技术[C]. 第十届全国光子学学术会论文集, 2016: 58–58.
- [6] 殷娜梅. 基于 OFDM 的 VLC 系统调光技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [7] 张译心. LED 可见光通信信道模型及编码技术研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2018.
- [8] 陈娜. 基于 ACO-OFDM 的可见光定位和通信融合系统[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- [9] 景艳玲. 基于 ACO-OFDM 的光无线通信系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [10] 姚春梅. 基于 Polar Code 的可见光通信信道编码研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [11] 杨修. 一种 BCH 类型纠错算法的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [12] 邹游. 信道编译码算法研究与实现[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [13] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible light communication system using LED light [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100–107.
- [14] LIU H, DARABI H, BANERJEE P, et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems [J]. IEEE Transactions on Systems Man&Cybernetics Part C, 2007, 37(6): 1067–1080.
- [15] ZHANG W, KAVEHRAD M. Comparison of VLC based indoor positioning techniques[C]//Spie-IntSoc Optical Engineering. proceedings of the Photonics West Conference on Broadband Access Communication Technologies VII, San Francisco, CA: Spie-IntSoc Optical Engineering, 2013.
- [16] HOU Y, XIAO S, ZHENG H, et al. Multiple access scheme based on block encoding time division multiplexing in an indoor positioning system using visible light [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(5): 489–495.
- [17] PASHA M A, YUEN C, HASSAN N U, et al. Indoor positioning system designs using visible LED lights: performance comparison of TDM and FDM protocols [J]. Electronics Letters, 2014, 51(1): 72–74.
- [18] GU W, AMINIKASHANI M, DENG P, et al. Impact of multipath reflections on the performance of indoor visible light positioning systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(10): 2578–2587.