

引用本文:朱泽人,周雪芳.不同码型对基于 WDM 的 Li-Fi 系统性能影响分析[J].光通信技术,2023,47(3):48-51.

不同码型对基于 WDM 的 Li-Fi 系统性能影响分析

朱泽人,周雪芳*

(杭州电子科技大学 通信工程学院,杭州 310018)

摘要:为了探寻信源编码对可见光无线通信(Li-Fi)技术的影响,研究了4种不同信源编码方式:不归零(NRZ)码、归零(RZ)码、载波抑制归零(CSRZ)码和双二进制码,并采用OptiSystem软件搭建了基于波分复用(WDM)的Li-Fi系统,讨论了4种码型对基于WDM的Li-Fi系统性能的影响。仿真结果表明:在10 Gb/s传输速率下,NRZ码型在传输距离方面表现较好;在40 Gb/s传输速率下,CSRZ码显露了强大的抗非线性性能及传输距离方面的优势。

关键词:自由空间光通信;信源编码;Li-Fi系统;误码率;品质因子

中图分类号:TN914;TN929.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2023)03-0048-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.03.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Performance influence analysis of different code types on the Li-Fi system based on WDM

ZHU Zeren, ZHOU Xuefang*

(School of Communication & Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To explore the impact of source coding on light fidelity (Li-Fi) technology, this paper studies four different source codes methods: non return zero(NRZ) code, return-to-zero(RZ) code, carrier suppressed return-to-zero(CSRZ) code and double binary code, and builds the Li-Fi system based on wave division multiplexing (WDM) by using OptiSystem software to discuss the performance influence of the four codes on the Li-Fi system based on WDM. The simulation results show that the NRZ code type performs well in transmission distance at 10 Gb/s transmission rate and CSRZ code type shows strong anti nonlinear performance and advantages in transmission distance at 40 Gb/s transmission rate.

Key words: free space optical communication, source code, light fidelity system, bit error rate, quality factor

0 引言

可见光无线通信(Li-Fi)^[1]又称“光保真技术”,是一种利用可见光波谱进行数据传输的全新无线传输技术,具有无需频带许可、保密性强、安装架设灵活、通信速率高、容量大等诸多独特的优势,在卫星通信、“最后一公里”链路、山林、湖泊等光纤链路难以部署的区域,Li-Fi的研究意义与价值越发突显^[2]。近年来,

Li-Fi的相关工作正在陆续展开并取得了一定的成果,例如分析Li-Fi信道中大气湍流的影响并抑制其损伤,更为有效地实现了空间光到光纤的耦合^[3],还有对信号本身编码和调制格式的研究与分析,使其更贴合Li-Fi。但这些研究成果都只研究了单一信源编码对某一光通信系统的影响^[4-6],没有研究不同信源编码对同一光通信系统的影响差异。因此,本文从信源编码出发,探究不归零(NRZ)码、归零(RZ)码、载波抑制归零(CSRZ)码和双二进制码4种不同码型对Li-Fi系统的性能影响。

1 Li-Fi系统模型

1.1 基本Li-Fi系统

基本的Li-Fi系统框图^[7]如图1所示。在发送端,首先对输入的信源数据进行滤波,滤波后的信号被调制并以非常高的数据速率转换为光信号;然后,光信号通过光源发送到接收端的光电探测器上。在接收

收稿日期:2022-09-19。

基金项目:国家自然科学基金项目(61705005)资助;浙江省重点研发计划项目(2019C01G1121168)资助。

作者简介:朱泽人(2000—),男,曾获得校级机械设计大赛(慧鱼组)一等奖,参与完成了水下机器人社团潜艇设计与实验、基于树莓派的前端网页设计、基于yolov5算法的口罩识别软件,现主要研究方向为光通信技术。

* **通信作者:**周雪芳(1976—),女,江西丰城人,副教授,硕士生导师,主要研究方向为光通信技术和光纤传感技术。



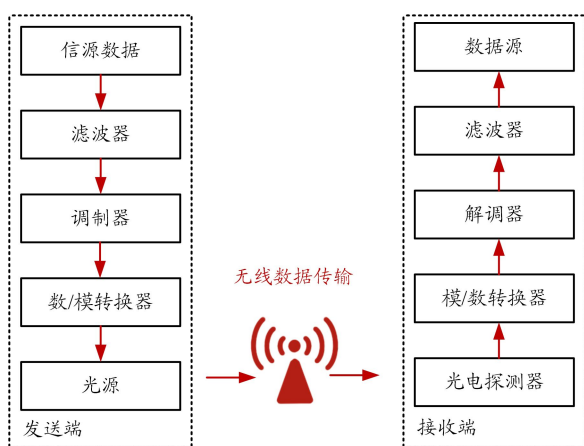


图1 基本的 Li-Fi 系统框图

端,光电探测器把光信号转换为电信号后,经解调和低通滤波后恢复原始信号^[8]。

1.2 4 种码型及光链路

为讨论不同码型对 Li-Fi 系统性能的影响,本文采用 NRZ 码^[9]、RZ 码^[10]、CSRZ 码^[11]和双二进制码^[12],其实现方法框图如图 2 所示。

2 OptiSystem 仿真模型与结果

本文在 OptiSystem 软件中搭建了基于波分复用(WDM)的 Li-Fi 系统仿真模型,如图 3 所示。该模型为双通道模型,具体包括信号发生模块、WDM 模块、光信号接收与调制模块、室内 Li-Fi 传输模块。仿真过程中,使用光示波器和光谱仪来观测光信号时域和频域上的波形,使用电频谱仪来观察和分析射频信号的稳定性与抗干扰能力,利用眼图仪来观测系统的稳定性和性能。

图 3 中,WDM 模块发送 2 路光信号,其波长分别为 1 550 nm 和 1 530 nm,2 路光信号经光纤传输进入光电探测器中,通过光信号调制器被传输至自由空间光(FSO)通信信道,实现 Li-Fi 通信系统的下行传输。

4 种码型在传输速率和传输距离依次为 10 Gb/s、300 m 和 40 Gb/s、400 m 情况下的眼图分别如图 4 和

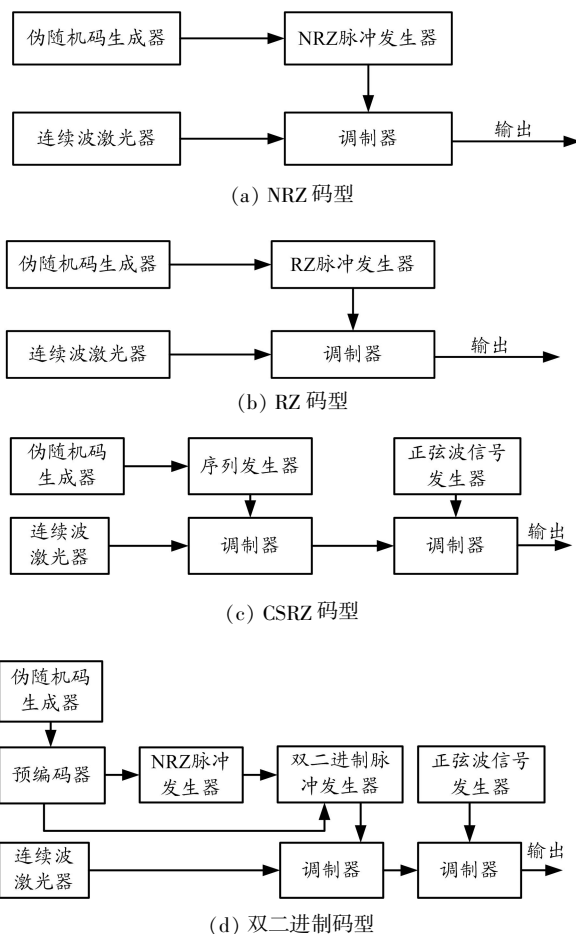


图2 在 OptiSystem 中 4 种码型的实现方法框图

图 5 所示。从眼图可以看出:该 Li-Fi 系统性能稳定,在传输速率为 10 Gb/s 时,NRZ 码拥有较强的传输距离优势和信号稳定性;在传输速率为 40 Gb/s 时,CSRZ 码显示了更强的抗干扰能力与信号稳定性。

3 系统性能分析

3.1 整体系统可用性分析

本文通过评估系统可用性来量化基于 WDM 的 Li-Fi 系统性能。该系统的可用性模型如图 6^[7]所示,系统的可用性概率 $A^{[13]}$ 为

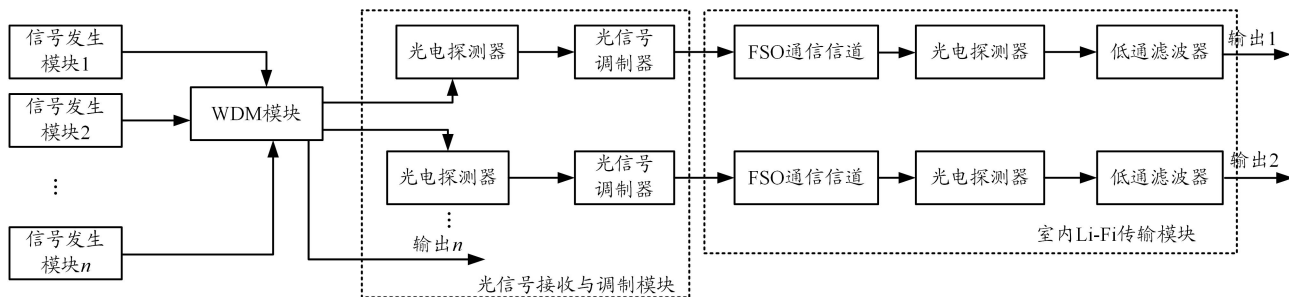


图3 基于 WDM 的 Li-Fi 系统仿真模型

朱泽人,周雪芳:不同码型对基于 WDM 的 Li-Fi 系统性能影响分析

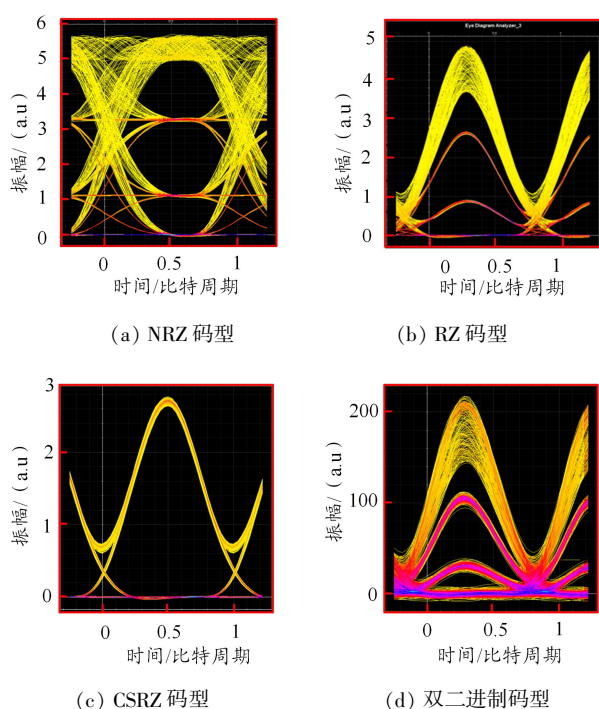


图4 4种码型在传输速率为10 Gb/s, 传输距离为300 m情况下的眼图

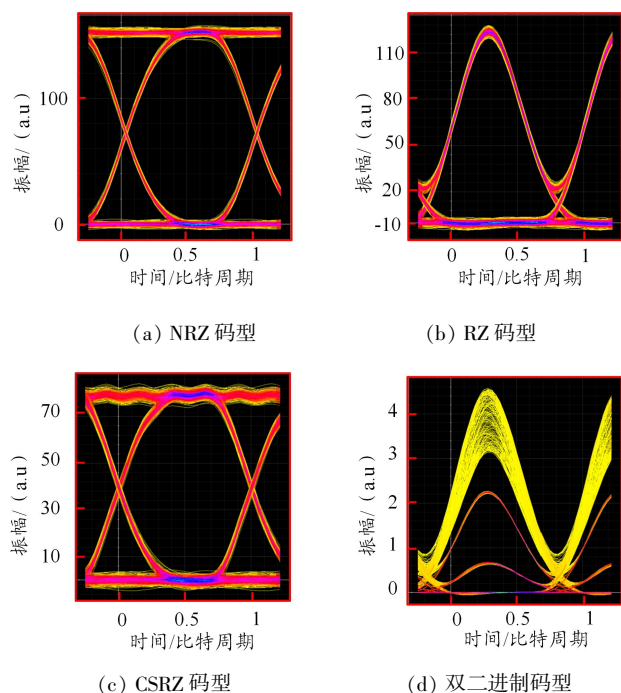


图5 4种码型在传输速率为40 Gb/s, 传输距离为400 m情况下的眼图

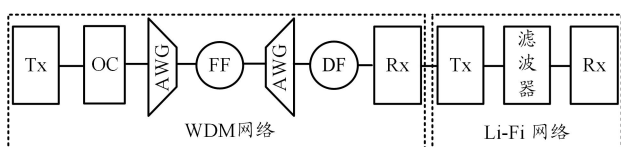


图6 基于WDM的Li-Fi系统可用性模型

$$A=1-U=1-(t_r/t_f) \quad (1)$$

其中, U 表示系统不可用概率, t_r 和 t_f 分别表示平均修复时间(MTTR)和平均故障间隔时间(MTBF)。系统中发送端(Tx)、接收端(Rx)、光学循环器(OC)、阵列波导光栅(AWG)、滤波器、馈线光纤(FF)、分布光纤(DF)的不可用概率分别表示为 U_{Tx} 、 U_{Rx} 、 U_{OC} 、 U_{AWG} 、 U_F 、 U_{FF} 、 U_{DF} ,其具体的数值如表1^[14]所示。因此,式(1)可以表示为

$$A=1-U=1-(2 \times U_{Tx}+3 \times U_{Rx}+U_{OC}+2 \times U_{AWG}+U_{FF}+U_{DF}+U_F)=1-2 \times 3.62 \times 10^{-7}+3 \times 1.4 \times 10^{-7}+4 \times 10^{-7}+2 \times 4 \times 10^{-7}+547 \times 10^{-7}+137 \times 10^{-7}+9.97 \times 10^{-7}=1-7.174 \times 10^{-5}=0.999 \ 928 \ 259 \quad (2)$$

因此,本文设计的基于WDM的Li-Fi系统可用性大于99.99%。

表1 基于WDM的Li-Fi系统的各种MTTR和MTBF值

系统组成部分	MTTR/h	MTBF/a	不可用概率
Tx	2	630	3.62×10^{-7}
Rx	2	1 630	1.4×10^{-7}
OC	2	570	4×10^{-7}
AWG	2	570	4×10^{-7}
滤波器	2	229	9.97×10^{-7}
FF(10 m)	24	50	547×10^{-7}
DF(10 m)	24	200	137×10^{-7}

3.2 Li-Fi系统性能分析(以40 Gb/s CSRZ码为例)

3.2.1 信噪比(SNR)计算

该Li-Fi系统的信噪比计算公式^[15]如下:

$$\gamma_{\text{SNR}}=\frac{I_p^2 M^2}{2q(I_p+I_D)M^2 F(M)B+2qI_L B+4kTB/R} \quad (3)$$

以40 Gb/s传输速率的CSRZ码为例,式(2)中,光电流 $I_p=1 \times 10^{-4}$ A;APD增益 $M=10$,电荷量 $q=1.6 \times 10^{-19}$ C,暗电流 I_D 与表面泄露电流 I_L 分别为 10×10^{-9} A和 4.5×10^{-3} A,噪声系数 $F(M)=M^{0.65}=10^{0.65}$,频带每通道带宽 $B=4 \times 10^{10}$ Hz,玻尔兹曼系数 $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K,温度 $T=293$ K,电阻 $R=50 \ \Omega$ 。根据式(2)计算可得, $\gamma_{\text{SNR}} \approx 10 \lg 1 \ 565.15 \text{ dB}=31.95 \text{ dB}$ 。

3.2.2 品质因子

接收 SNR 与质量因子 Q 的比值定义^[15]如下:

$$\gamma_{\text{SNR}} = 20 \log_2 Q \quad (4)$$

因此,采用 40 Gb/s 传输速率的 CSRZ 码的 Li-Fi 系统品质因子 $Q \approx 19.79$ 。

3.2.3 误码率(BER)计算

BER 与品质因子 Q 的关系式^[15]为

$$P_{\text{BER}} = \frac{2}{3} \operatorname{erfc} \frac{Q}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

通过计算可得 $P_{\text{BER}} \approx 2.7 \times 10^{-87}$ 。其余码型相关性能分析计算总结如表 2 所示。

表 2 4 种码型在不同传输速率下的性能分析

码型	传输速率为 10 Gb/s			传输速率为 40 Gb/s		
	SNR/dB	Q	BER	SNR/dB	Q	BER
NRZ	40.6	53.6	1.5×10^{-626}	12.70	2.16	0.021
RZ	39.1	44.9	1.9×10^{-440}	12.38	2.08	0.025
双二进制	12.6	2.14	0.022	11.45	1.87	0.041
CSRZ	35.8	30.8	2.6×10^{-208}	31.95	19.8	2.7×10^{-87}

从表 2 可知,在 40 Gb/s 的传输速率下,CSRZ 码型具有较好的传输性能,误码率仅为理论值 10^{-87} 级,性能表现很好;而在 10 Gb/s 的传输速率下,NRZ 码性能满足系统传输要求且更容易实现。

4 结束语

本文探讨了基于不同码型的 WDM 的 Li-Fi 系统的性能,通过对 4 种不同码型的仿真性能分析,发现信源编码类型对 Li-Fi 系统性能有显著的影响。在 10 Gb/s 的传输速率下,NRZ 码型在误码率、传输距离等传输性能方面表现良好,且容易实现;而在 40 Gb/s 情况下,RZ 码与 NRZ 码的抗噪效果明显降低,而 CSRZ 码型在该传输速率下各方面传输性能表现出色。本文的分析结果为 Li-Fi 系统的码型选择提供理论支撑;需要高传输速率时,选择搭建 CSRZ 码是解决信号传输性能的一种优势方案;在低传输速率要求下,更易实现的 NRZ 码将会是多数 Li-Fi 系统的选择。

总体而言,在 Li-Fi 系统中使用适当的码型和 WDM 技术可以提高系统的传输速率和数据传输的可靠性。未来,随着 Li-Fi 技术的不断成熟和技术革新,我们可以预见这项技术在智能家居、智能工厂、物联网、无人驾驶车辆等领域的应用变得越来越广泛。同时,也期待 Li-Fi 技术能够进一步提高速率、增加传输距离和承载容量,带来更加高效便捷的通信体验。

参考文献

- [1] 陈晶晶,王欣湄,苏棋皓,等. 浅谈 LiFi 与 WiFi 的关系[J]. 计算机产品与流通,2020(2):2-3.
- [2] 薛玲媛. LIFI 技术在中国铁路通信中的应用研究[J]. 信息技术与信息化,2020(10):1-3.
- [3] 文豪,曹阳,彭小峰,等. 自由空间光通信中的 MIMO 极化编码方法[J]. 激光与光电子学进展,2021,58(19):1906004-1-1906004-3.
- [4] 杜凡丁. 自由空间光通信中脊髓码改进编码译码方法与级联方法研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2022.
- [5] 刘维,王静怡,马鑫洋,等. 混合毫米波射频/多输入多输出-自由空间光通信中继系统[J]. 光学精密工程,2022(5):536-544.
- [6] 杨杰,邵宇丰,王安蓉,等. 应用曼彻斯特码的海岛间自由空间光通信系统[J]. 光通信研究,2022(3):61-64,78.
- [7] 李维旭,李静怡,刘秋辰,等. 基于 LiFi 定位的矿井下定位系统研制[J]. 物联网技术,2022,12(2):1-4.
- [8] 吴海洲,田秀云,王慧,等. 基于 LiFi 的智能广告系统设计与实现[J]. 电子制作,2019(11):2-4.
- [9] 徐郁,白光富,徐亮,等. 基于 SOA-XGM 的波长变换中归零与非归零码的啁啾特性研究[J]. 光学学报,2021,41(24):2-6.
- [10] 惠战强,张建国. 基于光子晶体光纤中双抽运四波混频效应的非归零到归零码型转换实验研究[J]. 物理学报,2013,62(8):3-8.
- [11] 贺彬彬,凌云,廖丽丹,等. 多波长双二进制载波抑制归零码光分组产生方法研究[J]. 光学学报,2015,35(4):2-5.
- [12] 谭程宏. 计算机网络技术及应用[M]. 南京:东南大学出版社,2020.1
- [13] WANG Y L, ZHANG C L. Research on the modulation format of 40Gb/s WDM-PON system[J]. MATEC Web of Conferences, 2022, 355: 2-5.
- [14] ZUBAIDA A S, SUBROTO K D N, NILOY S. Demonstration of a 4 Gb/s wavelength division multiplexing based Li-Fi network [C]//IEEE. International Conference on Electronics, Communications and Information Technology, Khulna: IEEE, 2022: 2-4.
- [15] YEH C H, CHOW C W, HSU C H, et al. 40-Gb/s time-division-multiplexed passive optical networks using downstream OOK and upstream OFDM modulations [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(2): 118-120.