

湍流信道下基于 MDPPM 的可见光通信性能研究

张慧颖,于海越,任永旺,牟昊

(吉林化工学院 信息与控制工程学院,吉林 吉林 132022)

摘要:针对室外可见光通信受到大气湍流因素影响的问题,采用广义超几何法,综合分析 Gamma-Gamma 信道下大气湍流及不同天气条件对可见光通信系统平均误时隙率(SER)的影响。仿真分析表明:16 进制差分脉冲位置调制(16DPPM)可有效改善湍流效应影响;采用等增益合并(EGC)接收技术,系统平均 SER 明显降低;湍流信道下,晴朗、雾霾、薄雾和中雾天气时,与 16DPPM 单入单出系统相比,采用接收天线为 3 根或 4 根的 16DPPM 单入多出系统的平均 SER 得到明显改善。

关键词:可见光通信;多进制差分脉冲位置调制;平均误时隙率;等增益合并接收

中图分类号:TN929.11 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2021)05-0055-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.05.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the performance of visible light communication in turbulent channel based on MDPPM

ZHANG Huiying, YU Haiyue, REN Yongwang, MOU Hao

(College of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin Jilin 132022, China)

Abstract: In view of the problem that the outdoor visible light communication is influenced by the atmospheric turbulence, the influence of atmospheric turbulence and different weather conditions on the average time slot error rate (SER) of the visible light communication system under the Gamma-Gamma channel has been comprehensively analyzed by the generalized hypergeometric method. The simulation analysis shows that 16-order differential pulse position modulation (16DPPM) can effectively suppress the effects of turbulence, the average SER is significantly reduced by equal gain combined (EGC) reception merge receiving technique. Under the turbulence channel, the average SER of the 16DPPM based on single input multiple output system with three or four receiving antennas is significantly improved compared with the 16DPPM single input single output system when it is sunny, haze, mist and medium fog weather conditions.

Key words: visible light communication; multi differential pulse position modulation; average slot error rate; equal gain combined reception

0 引言

可见光通信(VLC)在室外进行传输信号时不可避免受到大气湍流干扰。孟德帅等人^[1]采用对数正态分布模型研究了弱湍流信道下室外 VLC 性能,但未对大气信道中的中等湍流和强湍流情况进行分析。刘景龙^[2]对

收稿日期:2020-09-08。

基金项目:吉林化工学院重大科研项目(2018020)资助;吉林化工学院博士启动项目(2018003)资助。

作者简介:张慧颖(1982—),女,吉林四平人,博士,副教授,吉林省电工学会会员。主要从事空间光通信调制、接收技术、可见光通信与定位技术和智能检测技术等方面的研究工作,主持参与吉林省厅级、市级项目共 10 余项。



特定天气(雾、雨、雪)状态的信道损耗模型下的发光二极管(LED)交通灯 VLC 系统性能进行分析,讨论了近地面室外雾天、雨天和雪天情况下的通信衰减情况,但未考虑湍流影响。本文采用广义超几何法推导出室外 VLC 系统平均误时隙率(SER)闭合表达式,仿真分析不同天气条件和湍流强度下的 VLC 通信性能。

1 基于多进制差分脉冲位置调制(MDPPM)的误码性能推导

本文分析 Gamma-Gamma 信道模型下的 VLC 系统性能。MDPPM 是在多进制脉冲位置调制(MPPM)的基础上演变来的,MPPM 将符号间隔分成 n 个时隙,采用多个脉冲不同位置的组合区分不同符号,选择其时

隙发送脉冲。为提高频谱效率,在 MDPPM 时可以减少空时隙,因此 MDPPM 长度不固定,调制时最大长度为 2^M 而最小长度为 1, 平均符号长度为 $(2^M+1)/2$ ^[3]。MDPPM 的表达式如下:

$$x(t) = \frac{M+1}{2} P_{\text{avg}} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_i p(t - kT_{\text{sl_dppm}}) \quad (1)$$

其中, M 为调制阶数, $c_i \in \{0, 1\}$, k 为光波数, $p(t)$ 表示宽度为 $T_{\text{sl_dppm}}$ 、幅值为 1 的矩形脉冲, P_{avg} 为脉冲平均功率, $T_{\text{sl_dppm}}$ 为时隙宽度。在室外可见光系统中,待发送的电信号经过强度调制加载到光源上发出带有信息的光信号,经过近地面大气信道进行传输。接收天线将接收到的光信号通过 PIN 型光电二极管转换为电信号,电域处理后恢复出原始信号。不考虑系统的接收端对准因素,假设无多径干扰,忽略探测器的散粒噪声和相对强度噪声,则湍流信道条件下 VLC 系统模型如图 1 所示。

在湍流和雾霾等天气条件下,本文采用广义超几何 Bessel 函数对信道状态概率密度函数进行化简,则有:

$$f_1(I) = \frac{(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)I_1^{\frac{\alpha+\beta}{2}}} I^{(\alpha+\beta)/2-1} G_{0,2}^{2,0} \times \left[\alpha\beta \frac{I}{I_1} \left| \frac{\alpha-\beta}{2}, -\frac{\alpha-\beta}{2} \right. \right] \quad (2)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, α 表示散射过程大规模单元的有效数, β 表示小规模单元的有效数, I 为接收机辐照度, I_1 表示路径损耗, G 表示函数。

在固定判决门限下,系统输出的平均差错率表达式为:

$$P_{e,\text{MDPPM}} = \int_0^\infty f_1(I) p_e dI = \int_0^\infty f_1(I) \times \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{(M+1)\log_2 M \bar{\gamma}}}{4} \right) \right] dI \quad (3)$$

其中, $\bar{\gamma}$ 为平均信噪比(SNR), p_e 为系统出错概率。采用 Meijer-G 公式和 2 个 G 函数推广经典 Meijer 函数运

算特性,进一步简化式(3)得到 SER 闭合表达式为^[4]:

$$P_{e,\text{SER}} = \frac{2^{\alpha+\beta-1}}{4\pi^{3/2} \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times G_{5,2}^{2,4} \left[\frac{(M+1)\log_2 M}{(\alpha\beta)^2} I_1^2 \bar{\gamma} \left| \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 1 \right. \right]_{0,1} \quad (4)$$

在接收端采用 N 根接收天线,则分集接收后输出 SER 为^[5]:

$$P_{\text{SIMO-SER}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{(M+1)\log_2 M}}{4} = \frac{\sqrt{\bar{\gamma}}}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N \sqrt{I_n^2} \right) \quad (5)$$

其中, $n \in [1, N]$ 。采用等增益合并(EGC)技术将各分集支路信号进行同相处理后合并叠加,利用 Meijer-G 公式化简得到系统输出的平均 SER 闭合表达式为:

$$P_{\text{SIMO-EGC}} = \int_0^\infty \frac{(\alpha_n \beta_n)^{(\alpha_n+\beta_n)/2}}{\Gamma(\alpha_n)\Gamma(\beta_n)} I_n^{(\frac{\alpha_n+\beta_n}{2}-1)} \times G_{0,2}^{2,0} \times \left[\alpha_n \beta_n \frac{I_n}{I_{1n}} \left| \frac{\alpha_n-\beta_n}{2}, -\frac{\alpha_n-\beta_n}{2} \right. \right] \times \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{(M+1)\log_2 M}}{4} \frac{\sqrt{\bar{\gamma}}}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N \sqrt{I_n^2} \right) dI_n = \prod_{n=1}^N \frac{2^{\alpha_n+\beta_n-1}}{4\pi^{3/2} \Gamma(\alpha_n)\Gamma(\beta_n)} \times G_{5,2}^{2,4} \times \left[\frac{(M+1)\log_2 M}{(\alpha_n \beta_n)^2} I_{1n}^2 \bar{\gamma} \left| \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 1 \right. \right]_{0,1} \quad (6)$$

2 系统仿真分析

本文在 Matlab 平台上完成湍流信道下室外可见光系统仿真。选取可见光波长 $\lambda=650 \text{ nm}$,接收孔径为 0.1 m ,数据传输速率为 155 Mb/s ,大气折射率结构参数 C_n^2 分别设置为 $2.0 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 、 $5.0 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 和 $1.0 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 模拟弱湍流、中等湍流及强湍流信道,光电二极管转换系数设置为 1,假定传输距离为 500 m ,晴天时能见度 $V=20 \text{ km}$,则不同湍流强度变化下,基于

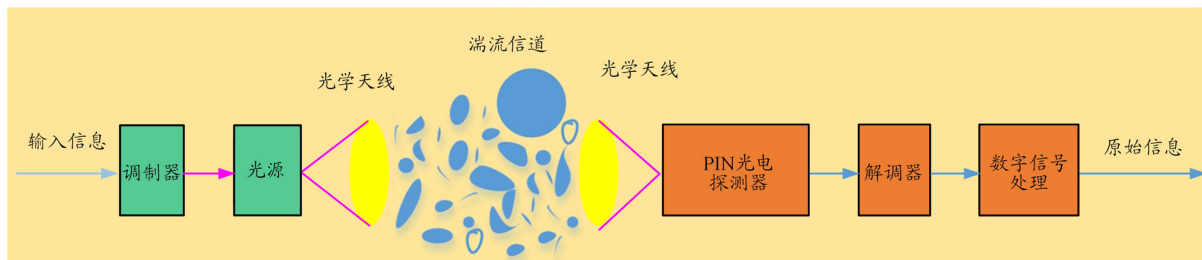


图 1 VLC 系统框图

MDPPM 的 VLC 系统平均 SER 仿真结果如图 2 所示。可以看出,晴朗天气环境、不同湍流信道条件下,当湍流强度增大时,系统平均 SER 随之增大,提高 SNR 可减小平均 SER。随着调制阶数 M 的增大,系统平均 SER 明显减小,因此,MDPPM 可以有效抑制湍流效应。由仿真结果看出,当 $M=16$ 时,系统的平均 SER 优于 $M=8$ 和 $M=4$,可以考虑采用 16DPPM 单入单出(16DPPM-SISO)设计室外 VLC 系统。

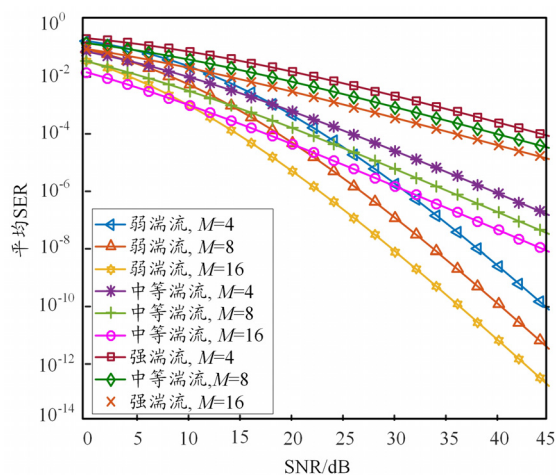


图 2 不同湍流条件下平均 SER 曲线

保持湍流信道参数不变,当能见度 V 为 5~20 km 时,16DPPM-SISO 系统的平均 SER 仿真结果如图 3 所示。可以看出,当湍流强度不变时,16DPPM-SISO 系统平均 SER 随着能见度的降低而变大,在弱湍流条件下,雾霾天气对系统平均 SER 影响较为明显,此时,湍流强度是影响系统误码性能的主要因素。

下文研究分集接收技术对湍流和天气恶劣变化的影响。当晴空天气条件下($V=20$ km),16DPPM 系统接

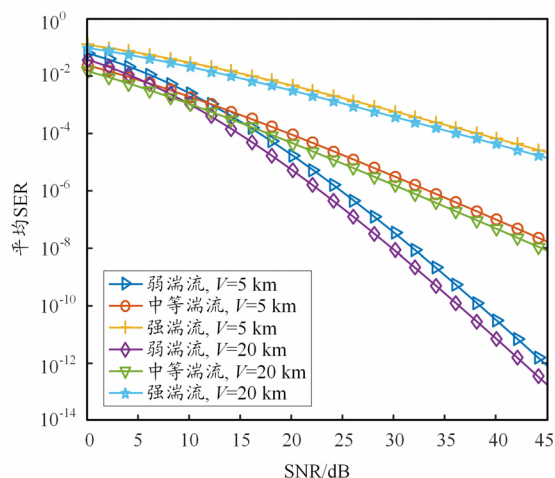


图 3 误码率随能见度变化曲线

收端接收天线数 N 为 2、3 和 4 根时采用 EGC 接收技术的单入多出(SIMO)系统仿真结果如图 4 所示。可以看出,在能见度为 20 km 的不同湍流信道下,增加接收端天线数目,采用 EGC 接收技术,系统平均 SER 有明显改善。当接收天线数 $N=4$ 时,系统的平均 SER 性能改善最好。在强湍流条件下, $N=3$ 时的误码性能与在中等湍流条件下接收天线 $N=2$ 时的通信性能几乎接近;当接近于强湍流信道时, $N=2$ 时系统误码性能改变不明显。对比图 2 和图 4 可知,在强湍流下,当 SNR 为 30 dB 时,16DPPM-SISO 系统的平均 SER 约为 10^{-3} ,而采用 EGC 接收技术的 16DPPM-SIMO 系统, N 分别为 2、3 和 4 根时,平均 SER 分别为 10^{-6} 、 10^{-10} 和 10^{-13} ,平均误码性能得到改善。在大气折射率结构参数为 $5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,且系统平均 SER 为 10^{-6} 时的 16DPPM 系统,当 $N=1$ 时(16DPPM-SISO 系统),系统所需的 SNR 约为 32 dB;而当 N 分别为 2、3 和 4 根时,SNR 约为 20 dB、12 dB 和 6 dB,相比于 SISO 系统 SNR 约减小 12 dB、20 dB 和 26 dB。随着接收天线数目增多,通信质量得到明显改善,采用 4 根接收天线的等增益分集接收技术有效抑制湍流,使通信性能大幅度提升,但是 3 根天线的 SIMO 系统改善效果也很明显。由于在雾天下强湍流是几乎不会发生的,因此,本文只讨论在中等湍流条件时 16DPPM-SIMO 系统 EGC 接收技术在不同天气条件下的性能指标。选取能见度 V 为 5 km、2 km 和 0.6 km 分别表示雾霾天气、薄雾天气和中雾天气,仿真结果如图 5 所示。可以看出,在中等湍流天气下随着能见度的降低,系统的误码性能下降。采用分集接收技术后,无论天气状况如何变化,随着接收端数目的增加系统的平均 SER 性能得到改善,当 $N=4$

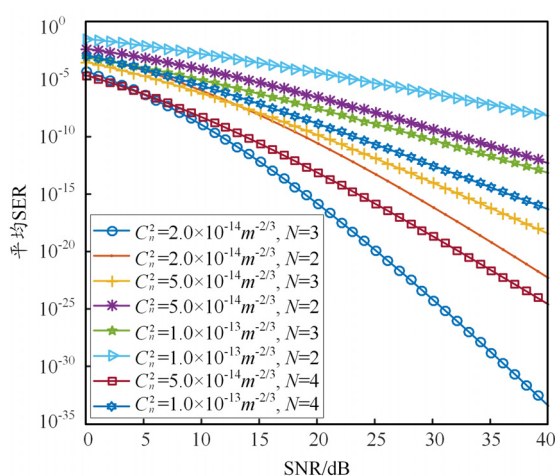
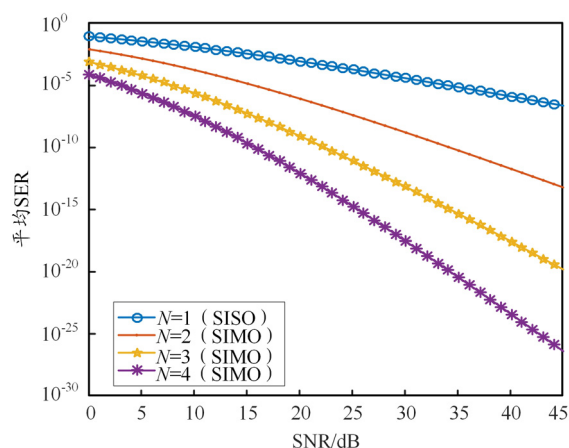
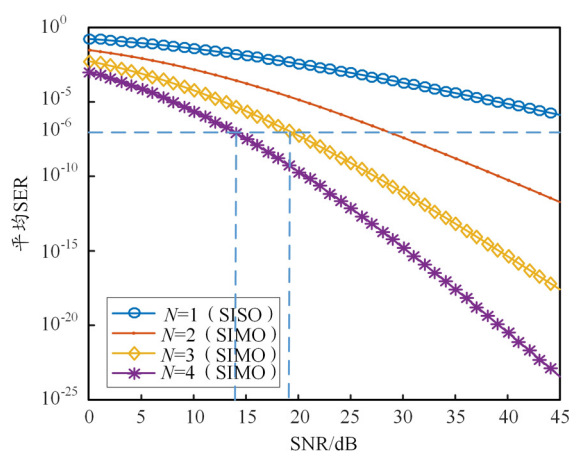


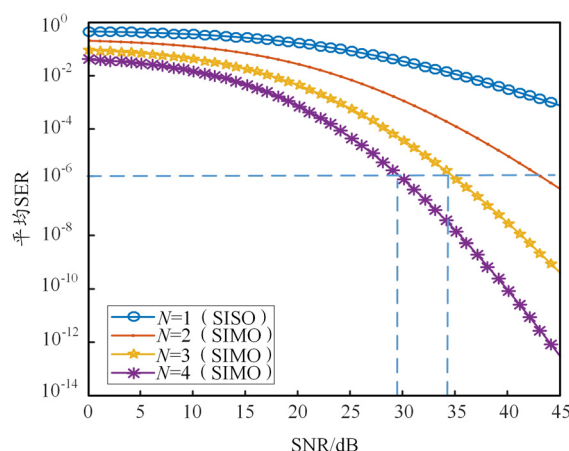
图 4 不同接收天线的 EGC 技术仿真曲线



(a) 雾霾天气时的平均 SER 变化曲线



(b) 薄雾天气时的平均 SER 变化曲线



(c) 中雾天气时的平均 SER 变化曲线

图 5 不同天气条件下的误码率曲线

时,改善最为明显。因此,分集技术可以有效抑制恶劣天气环境。在较低 SNR 时,雾霾天气条件下系统的误码性能改善较为显著。由于薄雾和中雾环境引起光束的消光比最大,因此,为了获得较好的平均 SER 需要较高的 SNR。在薄雾天气下,当平均 SER 为 10^{-6} 时, N 为 4 和 3 时,SNR 约为 14 dB 和 18 dB;在中雾天气下,SNR 约为 29 dB 和 34 dB;而对于采用 1 根接收天线的 SISO 系统,SNR 均大于 45 dB。因此,在不增加接收系统硬件复杂结构的基础上,可以考虑采用 3 根接收天线设计室外 VLC 系统。

3 结束语

本文采用广义超几何法针对室外 VLC 系统在 Gamma-Gamma 信道下传输差错性能进行了分析,综合考虑湍流信道和各种天气条件(如晴空、雾霾、薄雾和中雾天气)的影响,推导出基于 MDPPM 系统的平均 SER 闭合表达式并完成数值仿真。由仿真结果可知,在不同天气条件下,信道湍流强度增大导致系统通信性能下降,16DPPM 可有效降低系统平均误码率,改善湍流效应;对于基于 16DPPM 的 SIMO 系统,随着接收天线的增加,采用 EGC 接收技术可以有效改善湍流抑制天气变化的影响。在不增加硬件结构复杂程度的基础上,可以采用 3 根接收天线的结构设计 VLC 系统。

参考文献:

- [1] 孟德帅,梁中华,刘丹莉. 基于 BPSK-SIM 调制的室外可见光通信误码性能分析[J]. 激光杂志,2018(1):128-132.
- [2] 刘景龙. 基于室外可见光 LED 交通灯的无线通信系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.
- [3] 姚凯莉. 基于脉冲调制的可见光通信技术研究[D]. 大连:大连海事大学,2016.
- [4] KRISHNAN P, JHA G K, WALIA A. Performance enhancement of BPSK-SIM and DPSK-SIM-based FSO downlink over atmospheric turbulence using aperture averaging and receiver diversity [J]. Photonic network communications, 2019, 38(1): 142-150.
- [5] 王旭颖. 基于 MIMO 技术的可见光通信系统的研究[D]. 南京:南京邮电大学,2013.