

## 激光与光电子学进展

## 分层调制联合物理层网络编码下协作自由空间光通信系统的误码率性能

秦怀军<sup>1</sup>, 曹阳<sup>2\*</sup>, 彭小峰<sup>1</sup>, 张祖鹏<sup>1</sup><sup>1</sup>重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054;<sup>2</sup>重庆理工大学期刊社, 重庆 400054

**摘要** 针对非对称协作自由空间光通信系统中信道条件得不到充分利用以及高阶调制导致的数据可靠性恶化问题,提出了一种分层调制联合物理层网络编码方案。该方案首先在信源节点处对待发送信息进行数据优先级划分,并给不同优先级的数据分配不同比例的发射功率;然后将调制后的数据发送至各个节点,并在中继节点处对接收到的数据进行物理层网络编码;最后中继节点将编码后的信息发送至目的节点,目的节点利用物理层网络编码方案恢复出原始信息。仿真结果表明,在高信噪比信道中,系统误码率可下降至 $10^{-8}$ 以下;在强大气湍流信道中,使用该方案系统至少可获得 1.5 dB 的信噪比增益。该方案对强大气湍流信道表现出更好的抗干扰性能。

**关键词** 光纤光学与光通信; 协作自由空间光通信系统; 数据优先级; 分层调制; 物理层网络编码; 强湍流

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222255

## Bit Error Rate Performance of Cooperative Free Space Optical Communication System with Hierarchical Modulation and Physical Layer Network Coding

Qin Huaijun<sup>1</sup>, Cao Yang<sup>2\*</sup>, Peng Xiaofeng<sup>1</sup>, Zhang Zupeng<sup>1</sup><sup>1</sup>School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;<sup>2</sup>Periodical Agency of Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

**Abstract** A hierarchical modulation joint-physical layer network coding scheme is proposed to address the problems of incomplete channel condition utilization in asymmetric cooperative free space optical communication system and deterioration of data reliability due to high-order modulation. In this scheme, the information to be transmitted is classified first in data priorities at the source node followed by the allocation of transmission powers of different proportions to the prioritized data. Subsequently, the modulated data are sent to each node, and physical layer network coding is performed on the received data at the relay node. Finally, the relay node sends the encoded information to the destination node, and the destination node recovers the original information using the physical layer network coding scheme. The simulation results show that the bit error rate (BER) of the system can be reduced to values  $< 10^{-8}$  in high-signal-to-noise ratio (SNR) channels. The system can achieve SNR gains  $\geq 1.5$  dB by using this scheme in the intense atmospheric turbulence channel. This scheme yields better antijamming performance in intense atmospheric turbulence channel cases.

**Key words** fiber optics and optical communication; cooperative free space optical communication system; data priority; hierarchical modulation; physical layer network coding; intense turbulence

## 1 引言

自由空间光通信技术作为一种视距传输技术,具

有无需频谱授权、保密性好、组网灵活等优点。该技术以激光作为传输载体,光信号在自由空间传输时,容易受到大气湍流的影响<sup>[1-5]</sup>。大气湍流的不规则随机运

收稿日期: 2022-08-10; 修回日期: 2022-09-08; 录用日期: 2022-09-13; 网络首发日期: 2022-09-23

基金项目: 重庆市教委基金(KJ120827)、重庆市教委科学技术项目(KJ1500934, KJ1709205)、重庆市研究生科研创新项目(CYS18311)、重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjA40051)、重庆市教委青年科技研究项目(KJQN202101124)

通信作者: \*caoyang@cqut.edu.cn

动,会导致光信号发生随机起伏,由此引起光束到达角变化、接收端光强起伏等问题,从而形成大气湍流效应。大气湍流效应会导致整个光通信系统误码率(BER)上升,影响通信质量<sup>[6-8]</sup>。为了抑制大气湍流效应对自由空间光(FSO)通信系统的影响,不少研究人员将协作通信方式应用于FSO通信系统中。在协作FSO通信系统中,中继节点往往比目的节点距离源节点更近。由于通信距离的改变,激光在大气中传输时所受的大气湍流影响也不同。通信距离越长,大气湍流效应越强。所以在这种情况下,直传链路和中继传输链路所受的信道损耗将不同,这就会导致目的节点处不对称接收问题。

为了解决因传输信道的不对称性导致的通信系统性能下降问题,可以将分层调制技术应用于协作通信系统中。文献[9]提出了一种基于单中继辅助分层调制的协作通信系统,通过在源节点使用turbo码和网格编码调制(TTCM)方案,在中继节点使用译码转发(DAF)协作协议,整个系统的功率消耗每时隙降低了3.62 dB。文献[10]提出了一种双中继辅助的三层协作通信系统,该系统在协作通信方式下融合了速率为0.5的TTCM三层HM-64QAM和双层SPM-16QAM等方案,最后通过对系统的优化能够使用两个时隙可靠地传输三层HM-64QAM信号,且每个时隙的平均信噪比为6.94 dB。文献[11]提出了一种使用自适应分层调制在衰落信道上同时传输语音和多类数据的方案,该方案通过改变星座大小以及分层信号星座的优先级参数,给出了Nakagami-m衰落信道上语音和数据传输的中断概率、可实现的频谱效率和平均BER的封闭表达式和数值结果。文献[12]研究了无线中继系统中的分集增益最大化问题,并使用设置阈值的方案缓解分层调制中的错误传播,其分析和仿真结果表明,阈值必须取决于层次结构常数。

在实际通信系统中,信道质量的非对称性会导致通信系统性能的恶化。使用分层调制技术虽然能有效抑制非对称信道性能的恶化,但是并未解决系统吞吐量恶化问题。基于此,不少研究人员将网络编码技术结合分层调制技术应用于协作通信网络中。文献[13]将分层调制与网络编码结合,通过网络编码实现双向中继信道的频谱效率,并通过分层调制技术解决双向中继信道的非对称性问题,最后显著提高了非对称中继信道端到端错误概率和频谱效率。文献[14]在非对称的加性高斯白噪声(AWGN)双向中继信道下,提出了联合分层调制和物理层网络编码(HM-PNC)方案,既保证了质量较好信道的高效传输,又保证了质量较差信道的可靠性传输。文献[15]设计了一种基于分层调制和网络编码辅助的比特交织编码调制(HMNC-BICM)方案,对于编码调制的双向中继通道(TWRC)系统,该方案在平均BER方面具有更加优越的性能。

文献[16]在非对称信道下,设计了一种使用2/4PSK分层调制的物理层网络编码(2/4PSK-PNC)方案,推导出了系统在AWGN信道、瑞利(Rayleigh)衰落信道下中继和端到端的BER性能,并用来解决通信系统性能下降问题。

以上文献将分层调制网络编码方案应用于双向中继信道中,虽然改善了通信系统的性能,但其性能的提升还有一定的空间。而且并未将分层调制结合网络编码方案应用于自由空间光通信系统中,对于其性能的改善也有待进一步的研究。本文在协作FSO通信系统中,针对目的节点处的不对称接收问题,提出了使用分层调制联合物理层网络编码方案来改善系统性能。该方案根据待发送信息的相对重要程度分配不同的发送功率以保证数据较高的可靠性,将该方案应用于协作FSO通信系统,在信源节点及中继节点处均使用分层调制方式,同时在中继节点处接收信息使用物理层网络编码方式,最后在目的节点处恢复出原始信息。针对该方案使用的4/16-QAM调制方式,分析了使用分层调制联合物理层网络编码的协作FSO通信系统的BER性能,并且在不同大气湍流强度和不同信道平均信噪比下,对不同星座优先级参数和信道非对称参数进行了系统仿真。仿真结果表明,该方案适用于强大气湍流信道中,且能解决协作FSO通信系统因信道的非对称性导致的BER性能下降问题。

## 2 系统模型

本文所使用的基于协作FSO通信的中继网络模型如图1所示,其中四个信源节点 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 在中继节点 $R$ 的辅助下相互交换信息,所有节点之间均使用半双工的工作方式。所有节点之间使用FSO通信方式,对角线上的两信源节点需要通过中继节点和相邻信源节点才能进行信息交换。由于通信距离的增长引起大气湍流强度增长,本系统中继信道的信道条件优于两相邻用户节点之间直传链路的信道条件,这导致了系统的非对称问题。非对称问题将会使系统的BER性能下降,具体表现为:假设信源节点 $S_1$ 、 $S_2$ 和中继节点 $R$ 之间存在非对称问题,如果 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $R$ 之间构成的协作系统使用低阶调制方式,那么 $S_1$ 到 $R$ 、 $R$ 到 $S_2$ 好的信道条件将得不到充分利用,造成信道条件的浪费;如果使用高阶调制方式, $S_1$ 和 $S_2$ 之间直传链路不能承受这种高阶调制方式,会导致接收数据的可靠性得不到保障,从而引起系统BER性能的下降。

在图1所示系统中,所有节点之间使用FSO通信方式,通信链路服从Gamma-Gamma(GG)分布模型。GG信道模型的光强分布与大小尺度涡旋有关,光强的大小尺度的辐照度符合伽马分布,GG信道模型接收光强的概率密度函数为

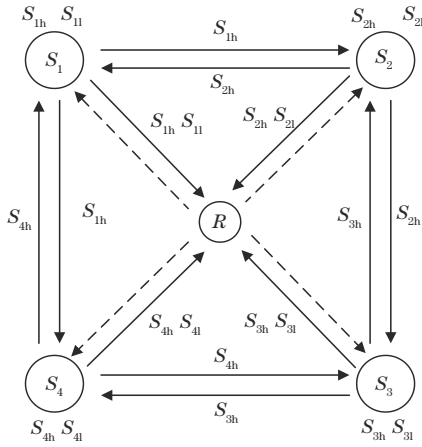


图 1 具有非对称信道条件的中继网络模型

Fig. 1 Relay network model with asymmetric channel conditions

$$f(h) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h^{(\frac{\alpha+\beta}{2}-1)} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h}), \quad (1)$$

式中： $h$ 为通信链路的信道状态信息； $K_{\alpha-\beta}$ 表示修正的第二类贝塞尔函数； $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数； $\alpha$ 和 $\beta$ 分别表示大尺度和小尺度涡旋的有效数量，可由下式表示：

$$\alpha = \left\{ \exp \left[ \frac{0.49\sigma_1^2}{(1 + 1.11\sigma_1^{12/5})^{7/6}} - 1 \right] \right\}^{-1}, \quad (2)$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[ \frac{0.51\sigma_1^2}{(1 + 0.69\sigma_1^{12/5})^{5/6}} - 1 \right] \right\}^{-1}, \quad (3)$$

式中， $\sigma_1^2$ 表示 Rytov 方差，可以定义为

$$\sigma_1^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (4)$$

式中： $C_n^2$ 为大气折射率结构常数； $k = 2\pi/\lambda$ 为光波数，其中 $\lambda$ 是激光波长； $L$ 为链路的传输距离。

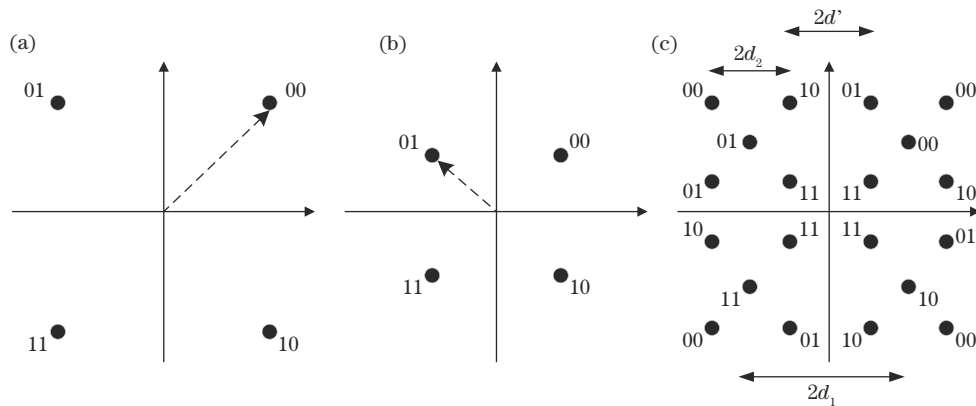


图 2 4/16-QAM 分层调制的星座图。(a)高优先级数据  $S_h$  的星座图；(b)低优先级数据  $S_l$  的星座图；(c)待发送数据  $S_i$  的星座图

Fig. 2 Constellation of 4/16-QAM hierarchical modulation. (a) Constellation of high priority data  $S_h$ ; (b) constellation of low priority data  $S_l$ ; (c) constellation of data to be sent  $S_i$

在协作 FSO 通信系统中，由于中继节点  $R$  和每个信源节点之间的信道条件较好，图 1 中每个信源节点可以获得所有传输信息，包括高优先级和低优先级数

### 3 分层调制联合物理层网络编码方案

本文为了解决协作 FSO 通信系统中的非对称问题，考虑到 FSO 通信系统的信道特性，在协作 FSO 通信系统中使用了分层调制联合物理层网络编码 (HM-PNC) 方案，以实现协作 FSO 通信系统 BER 性能的改善。在图 1 所示系统中，在信源节点  $S_1, S_2, S_3, S_4$  处使用分层调制，在中继节点  $R$  处使用分层调制与物理层网络编码相结合的方式。为了进一步抑制大气湍流对 FSO 通信系统的干扰，同时获得更高的功率利用率，分层调制过程使用 4/16-QAM 调制方式。HM-PNC 方案具体实现过程如下。

每个信源节点将待发送信息根据数据的相对重要程度分为两个层次，即高优先级数据 ( $S_h$ ) 和低优先级数据 ( $S_l$ )，其中  $i \in (1, 2, 3, 4)$ 。每个信源节点包含 4 bit 信息，不妨假设前两个比特为高优先级数据，后两个比特为低优先级信息。 $S_h$  和  $S_l$  都使用 4QAM 调制方式，假设高、低优先级之间的发射功率分配因子为  $\alpha$ ，最终信源节点处所发送的信息为

$$S_i = \sqrt{\alpha} S_h + \sqrt{1-\alpha} S_l. \quad (5)$$

4/16-QAM 分层调制的具体原理如图 2 所示。

图 2(a) 是高优先级数据  $S_h$  的星座图，箭头所指为数据 00 经过 4QAM 调制后的映射点；图 2(b) 是低优先级数据  $S_l$  的星座图，箭头所指为数据 01 经过 4QAM 调制后的映射点；图 2(c) 是待发送数据  $S_i$  的星座图，与 16QAM 调制的星座图一致。在图 2(c) 中， $2d_1$  表示高优先级数据星座点之间的最小距离，有  $d_1 = \sqrt{\alpha}/2$ ； $2d_2$  表示同一象限内低优先级数据星座点之间的最小距离，有  $d_2 = \sqrt{(1-\alpha)/2}$  [17]； $2d'$  表示相邻象限低优先级数据星座点之间的最小距离。

据。在图 1 所示系统中，第一阶段四个信源节点向中继节点发送信息；第二阶段中继节点向四个信源节点发送信息。每个信源节点可以使用直传链路获取相邻

节点的高优先级信息,因此只需要通过中继节点获取相邻节点的低优先级信息即可,但是远程节点的完整信息必须通过中继节点获得。在图 1 系统中,中继节点处使用物理层网络编码的编码码字具有以下结构:

$$\xi_1 = S_{1h} \oplus S_{3l}, \quad (6)$$

$$\xi_2 = S_{1l} \oplus S_{3h}, \quad (7)$$

$$\xi_3 = S_{2h} \oplus S_{4l}, \quad (8)$$

$$\xi_4 = S_{2l} \oplus S_{4h}. \quad (9)$$

根据本系统使用的分层调制方案,中继节点可以将四个网络编码码字转换为两个混合信息,具体实现过程如下:

$$J_i = \sqrt{\alpha} \phi_i + \sqrt{1-\alpha} \varphi_i, \quad i=1,2, \quad (10)$$

式中,  $\phi, \varphi \in \xi = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4\}$  且  $\phi_1 \neq \varphi_1 \neq \phi_2 \neq \varphi_2$ 。不妨假设  $\phi_1 = \xi_1, \varphi_1 = \xi_2, \phi_2 = \xi_3, \varphi_2 = \xi_4$ , 可以得到  $J_1 = \sqrt{\alpha} \xi_1 + \sqrt{1-\alpha} \xi_2, J_2 = \sqrt{\alpha} \xi_3 + \sqrt{1-\alpha} \xi_4$ 。经过 HM-PNC 以后,中继节点向四个用户节点传输编码后的信息。每个用户节点的接收信息可以表示为

$$y_{RN}(i) = h_{RN} J_i + n_N = h_{RN} (\sqrt{\beta} \phi_i + \sqrt{1-\beta} \varphi_i) + n_N, \quad i=1,2, \quad (11)$$

式中:  $h_{RN}$  是中继节点  $R$  到用户节点  $S_N$  的信道衰落系数,  $N \in \{1, 2, 3, 4\}$ ;  $n_N$  是对应信道的高斯白噪声。

最后,每个用户节点可以使用串行干扰消除(SIC)方式解码出  $\phi_i$  和  $\varphi_i$ , 具体步骤如下。

用户节点所需的高优先级信息解码为

$$\hat{\phi}_i = \arg \min \|y_{RN} - h_{RN} \sqrt{\alpha} \phi_i\|^2. \quad (12)$$

每个用户节点使用 SIC 方法消除来自  $y_{RN}(i)$  的高优先级信息,用户所需的低优先级信息为

$$\hat{\varphi}_i = \arg \min \|y_{RN} - h_{RN} (\sqrt{\alpha} \hat{\phi}_i + \sqrt{1-\alpha} \varphi_i)\|^2. \quad (13)$$

每个用户节点可以使用与相邻节点直传链路所得到的高优先级数据解码来自其他节点的数据。例如:用户节点  $S_1$  共有四条消息,本身具有的  $S_{1h}$  和  $S_{1l}$  以及来自相邻节点的  $S_{2h}$  和  $S_{4h}$ 。通过译码  $S_{2l} \oplus S_{4h}, S_{4l} \oplus S_{2h}, S_{1l} \oplus S_{3h}$  以及  $S_{1h} \oplus S_{3l}$ , 就可以得到  $S_{2l}, S_{4l}, S_{3l}$  以及  $S_{3h}$ , 具体如下:

$$S_{2l} = S_{4h} \oplus (S_{2l} \oplus S_{4h}), \quad (14a)$$

$$S_{4l} = S_{2h} \oplus (S_{4l} \oplus S_{2h}), \quad (14b)$$

$$S_{3l} = S_{1l} \oplus (S_{1l} \oplus S_{3h}), \quad (14c)$$

$$S_{3h} = S_{1h} \oplus (S_{1h} \oplus S_{3l}). \quad (14d)$$

其他用户节点所需要的信息同用户节点  $S_1$  一样。

## 4 系统 BER 分析

在 FSO 通信系统中,接收信号的平均 BER 可以用下式<sup>[18]</sup>表示:

$$\bar{P}_e = \int_0^\infty B_{ER}(S_{NR}) f(h) dh, \quad (15)$$

式中:  $B_{ER}(S_{NR})$  是信道信噪比为  $S_{NR}$  时的无条件 BER;  $f(h)$  为信道状态信息  $h$  的概率密度函数。信道的瞬时信噪比可以定义为  $\gamma = (hI)^2/N_0$ , 平均信噪比定义为  $\bar{\gamma} = (E[h]I)^2/N_0$ , 其中  $I$  为发射符号“1”的光强度,  $N_0$  为信道噪声的方差,  $E[\cdot]$  表示  $h$  的期望。在完全相关大气湍流衰落下,只考虑  $E[h]=1$  的情况<sup>[19]</sup>, 可以得到  $h = \sqrt{\gamma/\bar{\gamma}}$ , 所以式(1)可以写为

$$f(\gamma) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2} \gamma^{\frac{\alpha+\beta}{4}-1} K_{\alpha-\beta} \left( 2\sqrt{\alpha\beta} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \right)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta) \frac{\gamma^{\frac{\alpha+\beta}{4}}}{\bar{\gamma}^{\frac{\alpha+\beta}{4}}}}. \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)可以分别得到 FSO 通信系统在 4/16-QAM 调制方式下的 BER 表达式为

$$\bar{P}_e = \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{4\sqrt{\pi} \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^\infty B_{ER}(\sqrt{S_{NR}}) \frac{\gamma^{\frac{\alpha+\beta}{4}-1}}{\bar{\gamma}^{\frac{\alpha+\beta}{4}}} G_{2,0}^{0,2} \left[ \alpha\beta \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \left| \frac{\alpha-\beta}{2}, -\frac{\alpha-\beta}{2} \right. \right] d\gamma, \quad (17)$$

在式(17)中,根据文献[20],可以得到 4/16-QAM 调制关于星座优先级参数  $\lambda$  的 BER 表达式为

$$B_{ER}(S_{NR}) = \operatorname{erfc}(\sqrt{G(a, b; \lambda, M)\gamma}), \quad (18)$$

式中:  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  为互补误差函数;

$$G(a, b; \lambda, M) = \frac{(a+b\lambda)^2}{2 \left[ 1 + \lambda \left( \frac{\sqrt{M}}{2} - 1 \right) \right]^2 + \frac{2}{3} \left[ \frac{M}{4} - 1 \right] \lambda^2}, \quad (19)$$

式中:  $M$  为调制阶数;  $a$  为非负整数;  $b$  为正整数; 星座优先级参数  $\lambda = d_2/d_1$ 。将式(18)代入式(17), FSO 通信系统在 4/16-QAM 分层调制下的 BER 表达式为

$$\bar{P}_e(a, b; \lambda, M, \gamma) = \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{4\sqrt{\pi} \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^\infty \operatorname{erfc}(\sqrt{G(a, b; \lambda, M)\gamma}) \frac{\gamma^{\frac{\alpha+\beta}{4}-1}}{\bar{\gamma}^{\frac{\alpha+\beta}{4}}} G_{2,0}^{0,2} \left[ \alpha\beta \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \left| \frac{\alpha-\beta}{2}, -\frac{\alpha-\beta}{2} \right. \right] d\gamma. \quad (20)$$

在图 1 所示系统中,每个源节点  $S_i$  使用 4/16-QAM 分层调制的同相子流的星座图如图 3 所示。

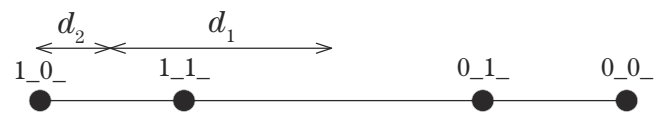


图 3 4/16-QAM 调制的同相子流  
Fig. 3 4/16-QAM modulated in-phase subflow

根据文献[17],源节点  $S_i$  到中继节点  $R$  高优先级数据的 BER 可以表示为

$$P\{\epsilon_{S_i R}^{S_i} | \lambda\} = \frac{1}{4} \left[ \bar{P}_e(a_1, b_1; \lambda, M, \bar{\gamma}) + \bar{P}_e(a_2, b_2; \lambda, M, \bar{\gamma}) \right], \quad (21)$$

式中:  $a_1 = 1, b_1 = 2; a_2 = 1, b_2 = 0$ 。源节点  $S_i$  到中继节点  $R$  低优先级数据的 BER 可以表示为

$$P\{\epsilon_{S_i R}^{S_i} | \lambda\} = \frac{1}{2} \bar{P}_e(a_1, b_1; \lambda, M, \bar{\gamma}) - \frac{1}{4} \bar{P}_e(a_2, b_2; \lambda, M, \bar{\gamma}) + \frac{1}{4} \bar{P}_e(a_3, b_3; \lambda, M, \bar{\gamma}), \quad (22)$$

式中:  $a_1 = 0, b_1 = 1; a_2 = 2, b_2 = 3; a_3 = 2, b_3 = 1$ 。

不妨设  $\mu = \bar{\gamma}_{ij} / \bar{\gamma}_{S_i R}$  为相邻信源节点  $S_i$  到  $S_j$  和信源节点  $S_i$  到中继节点  $R$  链路之间的信道非对称参数, 其中  $i, j \in \{1, 2, 3, 4\}$ 。将参数  $a$  和  $b$  代入式(21)和式(22), 同时引入信道的非对称参数, 可以得到高低优先级数据关于非对称参数的 BER 表达式为

$$P\{\epsilon_{S_i R}^{S_i} | \lambda, \mu\} = \frac{1}{4} \left[ \bar{P}_e(1, 0; \lambda, M, \mu \bar{\gamma}_{S_i R}) + \bar{P}_e(1, 2; \lambda, M, \mu \bar{\gamma}_{S_i R}) \right], \quad (23)$$

$$P\{\epsilon_{S_i R}^{S_i} | \lambda, \mu\} = \frac{1}{2} \bar{P}_e(0, 1; \lambda, M, \mu \bar{\gamma}_{S_i R}) - \frac{1}{4} \bar{P}_e(2, 3; \lambda, M, \mu \bar{\gamma}_{S_i R}) + \frac{1}{4} \bar{P}_e(2, 1; \lambda, M, \mu \bar{\gamma}_{S_i R}), \quad (24)$$

式中,  $\bar{\gamma}_{S_i R}$  为源节点  $S_i$  到中继节点  $R$  的平均信噪比。

单个信源节点总的 BER 可以定义为该节点无法成功接收其他节点传输信息的概率。以源节点  $S_1$  为例, 其他信源节点到信源节点  $S_1$  的 BER 表达式为

$$P_{S_2 S_1} = \frac{1}{2} P\{\epsilon_{S_2 S_1}^{S_2} | \lambda, \mu\} + \frac{1}{2} \left[ 1 - (1 - P\{\epsilon_{S_2 R}^{S_2} | \lambda\}) \cdot (1 - P\{\epsilon_{S_3 R}^{S_3} | \lambda\}) \cdot (1 - P\{\epsilon_{S_4 R}^{S_4} | \lambda, \mu\}) \right], \quad (25)$$

$$P_{S_3 S_1} = \frac{1}{2} P\{\epsilon_{S_3 S_1}^{S_3} | \lambda, \mu\} + \frac{1}{2} \left[ 1 - (1 - P\{\epsilon_{S_2 R}^{S_2} | \lambda\}) \cdot (1 - P\{\epsilon_{S_4 R}^{S_4} | \lambda\}) \cdot (1 - P\{\epsilon_{S_1 S_1}^{S_1} | \lambda, \mu\}) \right], \quad (26)$$

$$P_{S_4 S_1} = 1 - \frac{1}{2}.$$

$$\left[ (1 - P\{\epsilon_{S_2 R}^{S_2} | \lambda\}) (1 - P\{\epsilon_{S_3 R}^{S_3} | \lambda\}) (1 - P\{\epsilon_{S_4 R}^{S_4} | \lambda\}) + (1 - P\{\epsilon_{S_2 R}^{S_2} | \lambda\}) (1 - P\{\epsilon_{S_3 R}^{S_3} | \lambda\}) (1 - P\{\epsilon_{S_4 R}^{S_4} | \lambda\}) \right]. \quad (27)$$

源节点  $S_1$  总的 BER 可以表示为

$$P(\lambda, \mu) = 1 - (1 - P_{S_2 S_1})(1 - P_{S_3 S_1})(1 - P_{S_4 S_1}). \quad (28)$$

## 5 仿真结果及分析

为了验证如图 1 所示结构的 FSO 通信系统的 BER 性能, 模拟不同湍流强度下的大气信道, 开展了不同优先级参数、不同信道非对称参数的系统仿真。在图 1 所示系统中进行仿真时, 由于所有通信链路均为 FSO 通信方式, 不妨假设所有通信链路均服从 GG 分布模型, 其信道状态信息服从式(1)的概率密度函数。具体的仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter settings	
Parameter type	Value
Refractive index structure constant / (m <sup>-2/3</sup> )	0.141 × 10 <sup>-13</sup> , 0.282 × 10 <sup>-13</sup> , 0.564 × 10 <sup>-13</sup>
Laser wavelength / m	1.55 × 10 <sup>-6</sup>
Hierarchical modulation mode	4/16-QAM
Network coding type	Physical layer network coding
Communication distance of direct link / m	5000
Communication distance of relay link / m	3535

针对不同强度大气湍流对 FSO 通信系统性能造成的不同程度的影响, 即在本系统中, 湍流强度越强, 用户节点处的 BER 性能越差, 需要通过在信源节点处对源信息进行分层调制, 在中继节点处对接收信息进行分层调制和网络编码, 以克服大气湍流对 FSO 通信系统的干扰。在本文中, 由于各条通信链路的距离不同, 大气湍流的强度也不同, 所以在本文中使用了大气折射率结构常数  $C_n^2$  来体现各条通信链路的大气湍流强度。在本系统中, 对待发送信息使用 4/16-QAM 调制, 在中继节点处对接收到的信息使用物理层网络编码。通过 4/16-QAM 调制的 BER 公式以及 FSO 通信系统信道参数  $h$  的概率密度函数, 结合 Meijer-G 函数推导了系统的 BER 公式, 分析了在不同湍流强度、不同星座优先级参数以及不同信道非对称参数下系统的 BER 性能。

不同星座优先级参数  $\lambda$  下的系统 BER 性能如图 4 所示。在图 4 中, 分别在不同信噪比下, 对系统 BER 性能随星座优先级参数  $\lambda$  的变化情况进行了仿真。可以得到, 在各个信噪比下, 系统 BER 性能随星座优先级参数  $\lambda$  的增大而减小, 说明星座优先级参数  $\lambda$  越大, 系统 BER 性能越好。当传输链路平均信噪比由  $S_{NR} = 5$  dB 增加至  $S_{NR} = 20$  dB 时, 系统 BER 性能也持续下降, 由  $10^{-3}$  下降至  $10^{-7}$ , 且信噪比越高, BER 下降幅度越大。这说明, HM-PNC 方案适用于高信噪比的协作 FSO 通信系统中, 对信噪比越高的信道, 改善效果越好。

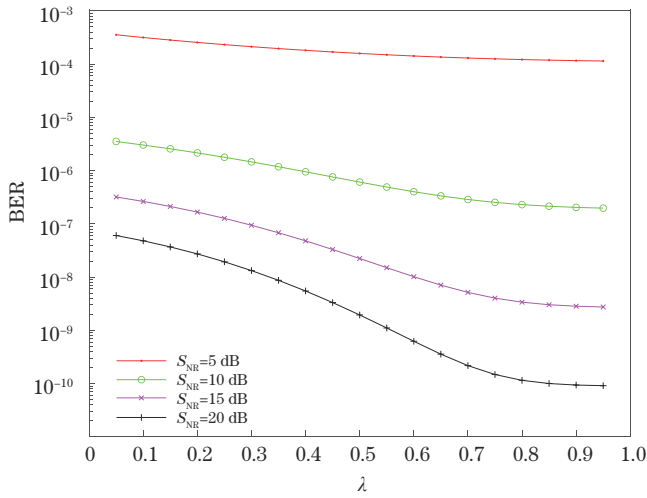


图 4 不同星座优先级参数下的 BER 性能

Fig. 4 BER performance under different constellation priority parameters

同时,图 5 展示了不同信道非对称参数下系统的 BER 性能。由图 5 可以得到,随着信道非对称参数  $\mu$  的增加,系统 BER 性能得到改善,系统 BER 降低。这是因为信道非对称参数  $\mu$  的增加,证明了相邻两信源节点之间的直传链路信道条件变好,高优先级数据传输的可靠性越高,所以系统的 BER 性能得到改善。当信道的非对称参数  $\mu > 0.5$  以后,系统 BER 性能基本保持不变。这是因为此时两信源节点之间的直传链路信道条件已经足够保证高优先级数据的传输可靠性,所以系统 BER 不再下降。由图 5 也可以得到,信噪比越高,在  $\mu = 0.5$  之前,系统 BER 下降越明显。在  $S_{NR} = 20$  dB 时,系统 BER 甚至下降到了  $10^{-8}$  以下。这也证明, HM-PNC 方案适用于高信噪比的协作 FSO 通信系统中,且对高信噪比信道表现出更好的改善效果。

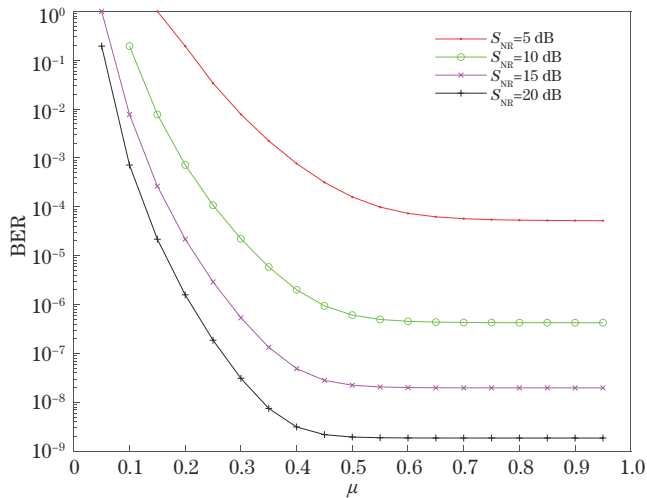


图 5 不同信道非对称参数下的 BER 性能

Fig. 5 BER performance under different channel asymmetric parameters

为了得到 HM-PNC 方案对不同湍流强度下协作 FSO 通信系统性能的改善情况,图 6 针对不同大气折射率结构常数和不同星座优先级参数进行了仿真。在同一星座优先级参数下,大气折射率结构常数  $C_n^2$  增加,代表传输链路的大气湍流强度增加,所以协作 FSO 通信系统的性能下降。当大气折射率结构常数  $C_n^2 = 0.141 \times 10^{-13}$  时,星座优先级参数由  $\lambda = 0.2$  增加至  $\lambda = 0.5$ ,在系统 BER 为  $10^{-6}$  时,协作 FSO 通信系统可获得大约 1.7 dB 的信噪比增益;星座优先级参数由  $\lambda = 0.5$  增加至  $\lambda = 0.8$  时,系统可获得大约 1 dB 的信噪比增益。当大气折射率结构常数分别为  $C_n^2 = 0.282 \times 10^{-13}$ 、 $C_n^2 = 0.564 \times 10^{-13}$  时,星座优先级参数增加,系统均可获得不同程度的信噪比增益。这说明 HM-PNC 方案对不同大气湍流强度下的协作 FSO 通信系统的 BER 性能,均能表现出很好的改善效果。

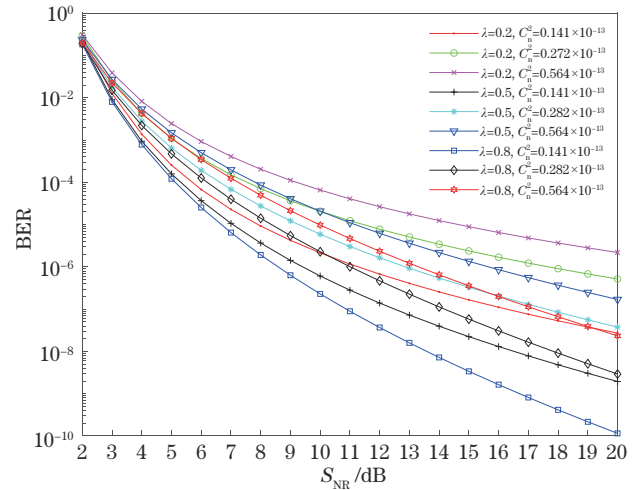


图 6 不同大气湍流强度、不同星座优先级参数下系统 BER 性能对比

Fig. 6 Performance comparison of system BER under different atmospheric turbulence intensities and different constellation priority parameters

同时,为了对比在不同湍流强度下,系统 BER 与信道非对称系数  $\mu$  之间的关系,进行了如图 7 所示的仿真。在图 7 中,由于传输链路之间通信距离不同,大气湍流强度还是使用大气折射率结构常数  $C_n^2$  来表征。由图 7 可以得到,在同一信道非对称系数下,大气折射率结构常数  $C_n^2$  增大,即大气湍流强度增强,协作 FSO 通信系统的 BER 性能恶化。当大气折射率结构常数  $C_n^2 = 0.141 \times 10^{-13}$  时,信道非对称参数由  $\mu = 0.2$  上升至  $\mu = 0.5$ ,系统 BER 为  $10^{-6}$  时,协作 FSO 通信系统可获得大约 10 dB 的信噪比增益;信道非对称参数由  $\mu = 0.5$  增加至  $\mu = 0.8$ ,系统可获得大约 0.5 dB 的信噪比增益,且信噪比越高,系统信噪比增益趋近于 0。大气折射率结构常数为  $C_n^2 = 0.282 \times 10^{-13}$  和  $C_n^2 = 0.564 \times 10^{-13}$  时,系统也存在相同的改善情况。这说明,当信道非对称系统增加至 0.5 以后,高优先级数据

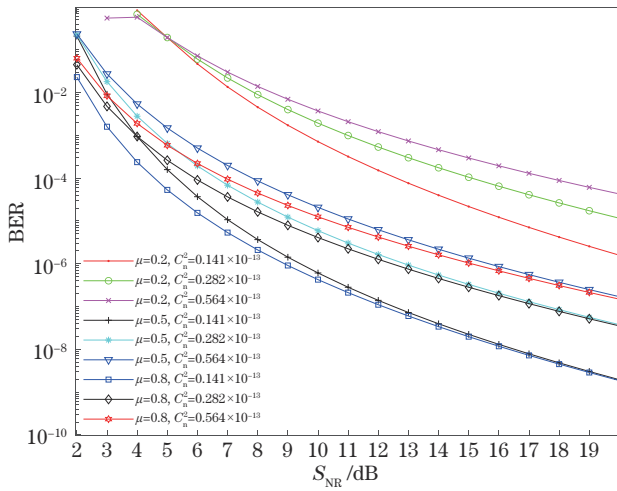


图 7 不同大气湍流强度、不同信道非对称参数下系统 BER 性能对比

Fig. 7 Performance comparison of system BER under different atmospheric turbulence intensities and different channel asymmetric parameters

传输的可靠性得到保障,系统 BER 不再下降;在信道非对称参数小于 0.5 以前, HM-PNC 方案对不同湍流强度下的协作 FSO 通信系统表现出较好的改善效果。

最后,为了获得在协作 FSO 通信系统中使用 HM-PNC 方案的信噪比增益,在不同湍流强度下对该方案与不使用该方案两种情况进行了仿真,仿真结果如图 8 所示。由图 8 可以得到,在协作 FSO 通信系统中,使用 HM-PNC 方案可以明显改善系统的 BER 性能。在大气折射率结构常数  $C_n^2 = 0.141 \times 10^{-13}$ 、系统 BER 为  $10^{-6}$  时,使用 HM-PNC 方案系统可获得 0.5 dB 左右的信噪比增益;在大气折射率结构常数  $C_n^2 = 0.282 \times 10^{-13}$ 、系统 BER 为  $10^{-6}$  时,使用 HM-PNC 方案系统可获得 0.5 dB 左右的信噪比增益;在大气折射率结构常数  $C_n^2 = 0.564 \times 10^{-13}$ 、系统 BER 为

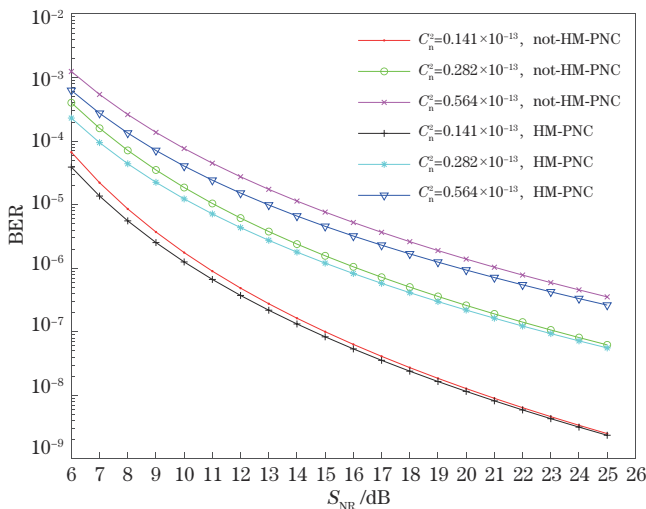


图 8 该方案对协作 FSO 通信系统 BER 性能改善情况对比

Fig. 8 Comparison of BER performance improvement of cooperative FSO communication system by this scheme

$10^{-6}$  时,使用 HM-PNC 方案系统可获得 1.5 dB 左右的信噪比增益。以上说明,大气湍流强度越强,系统获得的信噪比增益越高,该方案对系统 BER 性能改善越明显;同时也证明了该方案适用于强大气湍流信道中,且对强大气湍流表现出更好的抗干扰性。

## 6 结 论

针对协作 FSO 通信系统中信道的非对称性导致的系统 BER 性能下降问题,提出了在协作 FSO 通信系统中使用 HM-PNC 方案,通过对发送的源信息使用分层调制方式,并且在中继节点处使用物理层网络编码,实现了对协作 FSO 通信系统 BER 性能的改善。通过对不同星座优先级参数、不同信道非对称性参数进行仿真分析可知,星座优先级参数、信道非对称性参数越高,系统 BER 性能越好。星座优先级参数增加,系统平均信噪比由  $S_{NR} = 5$  dB 上升至  $S_{NR} = 20$  dB 时,系统 BER 性能可由  $10^{-3}$  下降至  $10^{-7}$ ;信道非对称参数增加,系统 BER 性能可下降至  $10^{-8}$  以下。在同一大气湍流强度下,星座优先级参数增大 0.3,系统可获得 1.7 dB 的信噪比增益;信道非对称参数增加 0.3,系统可获得 10 dB 的信噪比增益。在强大气湍流信道中,使用 HM-PNC 方案可获得 1.5 dB 的信噪比增益。仿真结果表明, HM-PNC 方案可以改善协作 FSO 通信系统的 BER 性能,且适用于强大气湍流、高信噪比信道中,对强大气湍流表现出更好的抗干扰性。

## 参 考 文 献

- [1] 张建强, 翟焱望, 付时尧, 等. 径向偏振矢量光束在大气湍流下的传输分析[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1101001.  
Zhang J Q, Zhai Y W, Fu S Y, et al. Propagation properties of radially-polarized vector beams under a turbulent atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40 (11): 1101001.
- [2] 李晓燕, 张鹏, 佟首峰. 大气湍流影响下基于自适应判决门限的逆向调制自由空间光通信系统 BER 性能分析[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0606001.  
Li X Y, Zhang P, Tong S F. Bit error rate performance for modulating retro-reflector free space optical communication system based on adaptive threshold under atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0606001.
- [3] 王惠琴, 李亚婷, 曹明华, 等. 湍流信道中的分层光空间调制[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0706001.  
Wang H Q, Li Y T, Cao M H, et al. Layered optical spatial modulation in turbulent channels[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0706001.
- [4] 周畅, 于笑楠, 姜会林, 等. 基于 APD 自适应增益控制的近地无线激光通信信道大气湍流抑制方法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 0406002.  
Zhou C, Yu X N, Jiang H L, et al. Atmospheric turbulence suppression methods for near the earth

- wireless laser communication channels based on avalanche photodiode adaptive gain control[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(4): 0406002.
- [5] 曹阳, 文豪, 党宇超. 自由空间光通信下的 LSTM-SCFlips 译码方法研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(14): 1406004.  
Cao Y, Wen H, Dang Y C. LSTM-SCFlips decoding method in free-space optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(14): 1406004.
- [6] 刘旻雯, 李迎春. OFDM-OAM 光信号在大气湍流中的传输[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0706002.  
Liu M W, Li Y C. Propagation of OFDM-OAM optical signal in atmospheric turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0706002.
- [7] 曹明华, 武鑫, 王惠琴, 等. Gamma-Gamma 大气湍流下超奈奎斯特光通信系统性能[J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0906003.  
Cao M H, Wu X, Wang H Q, et al. Performance of faster-than-Nyquist optical communication system under gamma-gamma atmospheric turbulence[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0906003.
- [8] 敖学渊, 杨奇, 戴潇潇, 等. 实时化自由空间光通信技术研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(12): 1206004.  
Ao X Y, Yang Q, Dai X X, et al. Real-time free-space optical communication technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(12): 1206004.
- [9] Sun H, Ng S X, Hanzo L. Turbo trellis-coded hierarchical-modulation assisted decode-and-forward cooperation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(9): 3971-3981.
- [10] Sun H, Ng S X, Dong C, et al. Decode-and-forward cooperation-aided triple-layer turbo-trellis-coded hierarchical modulation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(4): 1136-1148.
- [11] Hossain M, Vitthaladevuni P, Alouini M S, et al. Adaptive hierarchical modulation for simultaneous voice and multiclass data transmission over fading channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, 55(4): 1181-1194.
- [12] Yalcin A, Yuksel M. Diversity analysis of hierarchical modulation in wireless relay networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(6): 2989-2994.
- [13] Park J M, Kim S L, Choi J. Hierarchically modulated network coding for asymmetric two-way relay systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(5): 2179-2184.
- [14] 唐猛, 陈建华, 张艳, 等. 基于分层调制的物理层网络编码研究[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(10): 2568-2574.  
Tang M, Chen J H, Zhang Y, et al. Physical-layer network coding based on hierarchical modulation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(10): 2568-2574.
- [15] Tharranetharan S, Hossain M J. A hierarchical modulation and network coding-assisted BICM system for asymmetric two way relay channels[C]//2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall), September 14-17, 2014, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE Press, 2014.
- [16] 唐猛. 基于分层调制的物理层网络编码在非对称双向中继信道中的性能研究[D]. 昆明: 云南大学, 2017.  
Tang M. Performance analysis on physical-layer network coding with hierarchical modulation in asymmetric channels[D]. Kunming: Yunnan University, 2017.
- [17] Peng C L, Li F W, Liu H P. Hierarchically modulated network-coding-assisted cooperation in multiuser relay networks[C]//2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), September 24-27, 2017, Toronto, ON, Canada. New York: IEEE Press, 2017.
- [18] Kono Y, Pandey A, Sahu A. BER analysis of lognormal and gamma-gamma turbulence channel under different modulation techniques for FSO system[C]//2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), April 23-25, 2019, Tirunelveli, India. New York: IEEE Press, 2019: 1385-1388.
- [19] Li X Y, Zhao X H, Zhang P, et al. BER performance of FSO communication system with differential signaling over correlated atmospheric turbulence fading[J]. *China Communications*, 2020, 17(4): 51-65.
- [20] Vitthaladevuni P K, Alouini M S. BER computation of 4/M-QAM hierarchical constellations[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2001, 47(3): 228-239.