

文章编号: 2095-4980(2014)01-0047-05

## 基于外信息转移图的光交织多址系统性能分析

郑晓伟, 周小林, 杜建洪

(复旦大学 通信科学与工程系, 上海 200433)

**摘要:** 光交织多址(OIDMA)技术是自由空间光(FSO)通信中的一种简单且有效的解决方案, 具有较高的频谱效率和较低的多用户检测(MUD)复杂度等优点。外信息转移(EXIT)曲线图是分析迭代结构的有效工具。本文利用 EXIT 曲线图对 OIDMA FSO 系统在深空和深 Gamma-Gamma 大气湍流衰弱信道中的性能进行预测和分析。结果表明, OIDMA FSO 系统在不同环境中都具有稳定的快速收敛性和良好的系统性能, 且 EXIT 曲线图能够准确、高效地分析 OIDMA FSO 系统性能, 具有重要的指导意义。

**关键词:** 自由空间光; 光交织多址; 多用户检测; 互信息; 外信息转移图

**中图分类号:** TN929.12

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201401.0047

## Capability analysis of OIDMA FSO communication system based on EXIT chart

ZHENG Xiao-wei, ZHOU Xiao-lin, DU Jian-hong

(Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200043, China)

**Abstract:** Optical Interleaver Division Multiple Access(OIDMA) system is a conceptually simple, yet still efficient solution for Free Space Optical(FSO) communications, due to its high bandwidth efficiency and low complexity of Multi User Detection(MUD). The Extrinsic Information Transfer(EXIT) chart is an efficient tool for analyzing iterative structures. By using EXIT charts, the OIDMA FSO system over deep-space and deep Gamma-Gamma atmospheric turbulence fading channels is analyzed. Experimental results show that the OIDMA FSO system exhibits a rapid convergence, as well as excellent system performance in different scenarios. At the same time, EXIT chart is proved to be able to analyze the OIDMA FSO system accurately and effectively, which has important guiding significance.

**Key words:** free-space optical; Optical Interleaver Division Multiple Access; Multi User Detection; mutual information; Extrinsic Information Transfer chart

自由空间光(FSO)通信系统由于其具有高数据速率、低功耗、较高的安全性等优势, 正受到越来越多研究者的关注<sup>[1]</sup>。在 FSO 通信中, 多用户间干扰(Multi User Interference, MUI)是限制系统性能的最主要因素。光码分多址(Optical Code Division Multiple Access, OCDMA)近年来被认为是一种较好的 FSO 多址接入方案, 但是其实现需要设计较长的光正交码(Optical Orthogonal Code, OOC), 多用户检测(Multi User Detection, MUD)的复杂度较高<sup>[2-3]</sup>。在之前 Zhou 的研究中, 提出了一种基于光子计数的光交织多址(Optical Interleaver Division Multiple Access, OIDMA)方案<sup>[4-5]</sup>, 该方案通过特定的交织器来区分不同的用户, 从而避免了设计 OOC, 在保持了有效消除 MUI 的同时, 提高了频谱效率, 降低了检测复杂度。

OIDMA FSO 系统在接收端设计了迭代 MUD 算法, 对于迭代检测来说, 算法能否快速收敛至关重要, 是决定整个系统性能的关键因素之一。对系统性能的研究一般采用蒙特卡洛仿真的方法, 但是这种方法耗时较长, 效率较低。外信息转移(Extrinsic Information Transfer, EXIT)图是由 Brink 提出的<sup>[6]</sup>, 是分析迭代结构的有效工具。EXIT 图描述了迭代结构中各结构的输入先验信息和输出外信息之间的传输关系曲线, 同时据此可得到迭代算法的收敛轨迹。鉴于 EXIT 图在分析迭代性能方面的有效性, 本文将将其应用于 OIDMA FSO 系统的性能预测和分析。

收稿日期: 2013-01-11; 修回日期: 2013-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.60802011); 国家高技术研究发展计划“863”资助项目(No.2011AA100701); 国家重大科技专项课题资助项目(No.2012ZX03001013-004)

## 1 OIDMA FSO 系统模型

OIDMA FSO 系统模型包括 3 部分：光发射机、大气湍流信道和迭代接收机。

### 1.1 光发射机

发射机结构如图 1 所示。 $k=1,2,\dots,K$  表示用户数，第  $k$  个用户的信息比特序列  $d_k(l), l=1,2,\dots,L_d$  在经过 FEC(Forward Error Correction)编码器编码后，产生编码后的序列  $c_k(j), j=1,2,\dots,L_c$ ，其中  $L_d$  表示帧长， $L_c$  表示编码后的帧长， $j$  对应“码片”。 $c_k$  通过用户特定的交织器  $\Pi_k$  进行交织，然后进行 OOK 调制，产生调制后的序列  $x_k(j)$ 。调制后的序列  $x_k(j)$  用来驱动光调制器以产生对应于每个码片上合适的光子数。当  $x_k(j)=0$  时，每码片的平均光子数  $m_0=0$ ；当  $x_k(j)=1$  时，每码片的平均光子数  $m_1=PT_c/h\nu$ ，其中  $P, T_c, \nu$  和  $h$  分别表示发送功率、码片持续时间，光频和普朗克常数，然后光信号被从第  $k$  个激光器发送到自由空间信道中。

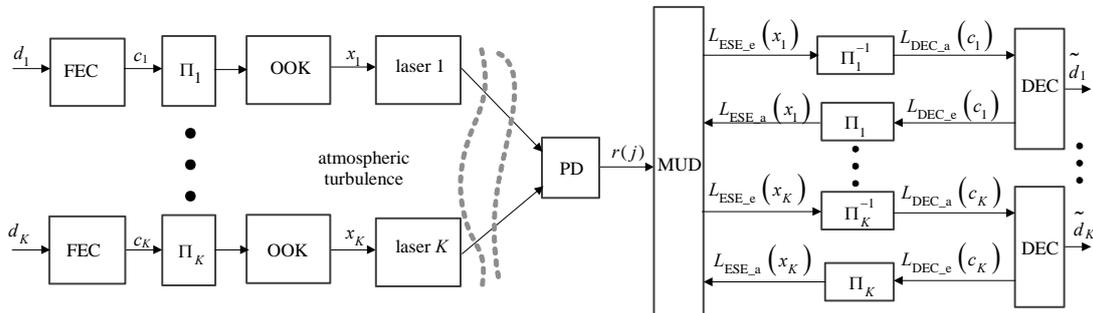


Fig.1 System model of the OIDMA FSO

图 1 OIDMA FSO 系统模型

### 1.2 信道模型

FSO 信道受到大气湍流衰弱的影响，一般用 Gamma-Gamma 分布模型来表示。信道衰弱因子  $I_k \geq 0$  的概率密度函数(pdf)为<sup>[7]</sup>：

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

式中： $I_k$  表示第  $k$  个用户激光器和光电检测装置(Photon Detector, PD)之间的信道衰弱因子； $\alpha > 0$  和  $\beta > 0$  与闪烁因子  $S.I. = \alpha^{-1} + \beta^{-1} + (\alpha\beta)^{-1}$  相关； $K_n(\cdot)$  为  $n$  阶第二类修正贝塞尔函数。

### 1.3 光接收机

接收端包括 1 个 MUD 和  $K$  个单用户后验概率(A Posteriori Probability, APP)译码器(Decoders, DEC)s)。MUD 和 DEC 模块输出的是非本征对数似然比(Logarithmic Likelihood Ratios, LLRs)，即通常所说的外信息。由外信息的传递完成一个全局的片到片迭代接收过程。

表 1 OIDMA FSO 系统接收机的迭代检测流程

Table1 Iterative detection process of OIDMA FSO system receiver

| process            | input  | output   |
|--------------------|--|--|
| [1] initialization | $\{L_{ESE_a}(x_k(j))\} = 0$ due to no initial a priori information                             |  |
| [2] MUD            | a) MUD input information: $\{L_{ESE_a}(x_k(j))\}$<br>b) Received information: $r(j)$           | MUD output information: $\{L_{ESE_e}(x_k(j))\}$  |
| [3] deinterleaving | MUD output information: $\{L_{ESE_e}(x_k(j))\}$  | DECs input information: $\{L_{DEC_a}(c_k(j))\}$  |
| [4] DEC decoding   | DECs input information: $\{L_{DEC_a}(c_k(j))\}$  | DECs output information: $\{L_{DEC_e}(c_k(j))\}$ |
| [5] interleaving   | DECs output information: $\{L_{DEC_e}(c_k(j))\}$   | MUD input information: $\{L_{ESE_a}(x_k(j))\}$   |
| [6] back to [2]    | feedback to MUD to update MUD input information $\{L_{ESE_a}(x_k(j))\}$ in the next iteration. |  |

接收机迭代检测的流程如图 1 和表 1 所示。在第一次迭代时，由于没有先验信息， $\{L_{ESE_a}(x_k(j))\} = 0$ 。由 MUD 模块根据输入先验信息  $\{L_{ESE_a}(x_k(j))\}$  和  $r(j)$  计算产生输出外信息  $\{L_{ESE_e}(x_k(j))\}$ 。MUD 输出的外信息被送到各自

的解交织器进行解交织得到 DEC 的输入先验信息  $\{L_{\text{DEC}_a}(c_k(j))\}$ 。DECs 对输入先验信息进行解码得到输出外信息  $\{L_{\text{DEC}_e}(c_k(j))\}$ 。解码后的输出外信息值再通过各自交织器的交织, 送到 MUD 模块, 以更新 MUD 的输入先验信息  $\{L_{\text{ESE}_a}(x_k(j))\}$ , 作为下一次迭代的初始值, 然后进行下一次迭代, 如此循环。

为了更清楚的表示, 现将整个迭代检测的计算过程总结如下<sup>[4]</sup>:

1) 初始化:  $L_{\text{ESE}_a}(x_k(j))=0$

2) MUD 主要迭代计算公式:

$$\text{Mean}(\tilde{m}_k^{\text{Opt-TX}}(j)) \leftarrow \frac{m_+ (\exp(L_{\text{ESE}_a}(x_k(j))) - 1)}{1 + \exp(L_{\text{ESE}_a}(x_k(j)))} \quad (2)$$

$$\text{Var}(\tilde{m}_k^{\text{Opt-TX}}(j)) \leftarrow m_+^2 - (\text{Mean}(\tilde{m}_k^{\text{Opt-TX}}(j)))^2 \quad (3)$$

$$\text{Mean}(\xi_k(j)) \leftarrow \text{Mean}(\Delta m_{\text{noise}}(j)) + \eta \sum_{k'=1k' \neq k}^K I_{k'} \text{Mean}(\tilde{m}_k^{\text{Opt-TX}}(j)) \quad (4)$$

$$\text{Var}(\xi_k(j)) \leftarrow \eta^2 \sum_{k'=1k' \neq k}^K I_{k'}^2 \text{Var}(\tilde{m}_k^{\text{Opt-TX}}(j)) + \text{Var}_{\text{est}}(\Delta m_{\text{noise}}(j)) \quad (5)$$

$$\text{Var}_{\text{est}}(\Delta m_{\text{noise}}(j)) \leftarrow \left( \left( \sum_{k=1}^K I_k \text{Mean}(\tilde{m}_k^{\text{Opt-TX}}(j)) + m_{\text{a.c.}} \right) \sigma_{s, \text{fp}}^2 + \sigma_{s, \text{id}}^2 + \sigma_{\text{T}}^2 \right) \left( \frac{T_c}{q} \right)^2 \quad (6)$$

$$L_{\text{ESE}_e}(x_k(j)) \leftarrow \frac{2\eta I_k m_+ (r'(j) - \text{Mean}(\xi_k(j)))}{\text{Var}(\xi_k(j))} \quad (7)$$

式中:  $\tilde{m}_k^{\text{Opt-TX}}(j) = \begin{cases} m_+ & \text{if } x_k(j)=1 \\ m_- & \text{if } x_k(j)=0 \end{cases}$ ,  $m_+ = (m_0 + m_1)/2$ ,  $m_- = -(m_0 + m_1)/2$ ;  $\Delta m_{\text{noise}}(j)$  表示由噪声引起的电子计数波动, 其服从高斯分布,  $\text{Mean}(\Delta m_{\text{noise}}(j))=0$ ;  $\eta$  表示光电转换效率;  $m_{\text{a.c.}}$  表示在  $T_c$  的持续时间内, 由环境光引起的平均光子数;  $\sigma_{s, \text{fp}}^2 = 2q^2 \eta \Delta f / T_c$ ,  $\sigma_{s, \text{id}}^2 = 2qi_d \Delta f$ ,  $q$  表示电子电荷,  $i_d$  表示暗电流,  $\Delta f$  表示光电检测二极管的带宽;  $\sigma_{\text{T}}^2$  表示光电检测二极管的热噪声电流方差;  $r'(j) = r(j) - \sum_{k=1}^K \eta I_k (m_0 + m_1)/2$ 。

在 DEC 中, APP 解码是一个标准模块, 译码过程可以参考文献[8-9], 在此不作详述。利用解交织后得到的 DEC 的输入先验信息  $\{L_{\text{DEC}_a}(c_k(j))\}$ , 可以得到用来进行硬判决的 bit-level 的 LLRs。随着迭代次数的增加,  $\text{Mean}(\tilde{m}_k^{\text{Opt-TX}}(j))$  和  $\text{Var}_{\text{est}}(\Delta m_{\text{noise}}(j))$  将会变得越来越准确。最终, 在最后一次迭代时, 恢复序列  $\{\tilde{a}_k\}$  可以由硬判决得到。

## 2 EXIT 图

EXIT 图是由 Brink 提出的<sup>[6]</sup>, 能够对各种迭代结构的性能进行有效的预测和分析。EXIT 图描述了迭代结构中各模块的输入先验信息和输出外信息之间的传输关系曲线, 据此可以得到迭代算法的收敛轨迹, 预测和分析系统的性能。在 EXIT 图中, 输入先验信息和输出外信息都表示为互信息的形式, 这里的互信息是传输码片  $x_k(j)$  和其所对应的 LLRs 之间的互信息  $I(L; X)$ , 其求解表达式定义为<sup>[8]</sup>:

$$I(L; X) = \frac{1}{2} \sum_{x \in (0,1)} \int_{-\infty}^{+\infty} p(\xi/x) \log_2 \frac{2p(\xi/x)}{p(\xi/0) + p(\xi/1)} d\xi \quad (8)$$

可以看出, 已知 LLRs 的分布和传输的码片, 就可以求出互信息。在这里,  $p(\xi/x)$  服从高斯分布<sup>[10]</sup>。得到互信息后, 由输入互信息和输出互信息, 就可以得到每个模块的传输特性曲线。

一般情况下, 迭代结构由 2 个模块组成, 分别得到 2 个模块的输出互信息关于输入互信息的传输特性曲线后, 将第 2 部分的传输特性曲线在坐标轴上进行翻转后, 再将 2

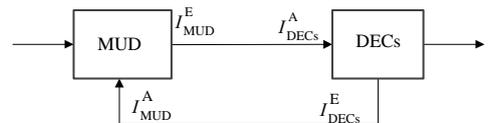


Fig.2 Mutual information of EXIT chart for MUD model and DEC model

图2 MUD模块和DECs模块在EXIT图中的互信息关系

部分的曲线在一个图中表示出来,就得到了 EXIT 图。

在这里,OIDMA FSO 系统的接收端可以简化为图 2 中的 MUD 和 DEC 2 个模块。对于 MUD 模块,其输入输出互信息分别表示为  $I_{\text{MUD}}^{\text{A}}$  和  $I_{\text{MUD}}^{\text{E}}$ ;同理,对于 DEC 模块,其输入输出互信息分别表示为  $I_{\text{DEC}}^{\text{A}}$  和  $I_{\text{DEC}}^{\text{E}}$ 。以 MUD 模块的输入互信息  $I_{\text{MUD}}^{\text{A}}$  为 x 轴,输出互信息  $I_{\text{MUD}}^{\text{E}}$  为 y 轴画图,就得到了 MUD 模块的传输特性曲线;然后以 DEC 模块的输入互信息  $I_{\text{DEC}}^{\text{A}}$  为 x 轴,输出互信息  $I_{\text{DEC}}^{\text{E}}$  为 y 轴画图,就得到了 DEC 模块的外信息传输特性曲线。最后将 2 条曲线合并画在同一张图上,就得到了 OIDMA FSO 系统的 EXIT 图。

### 3 系统性能分析

在这一部分,可以得到 OIDMA FSO 系统在不同情景下的 EXIT 图,进而可以预测和分析系统的性能。在以下仿真中,取平均每 bit 传输的光子数为 200, FEC 编码速率  $R_c = 1/10$ 。

图 3 给出的是 OIDMA FSO 系统在深空信道下 EXIT 图曲线,同时画出了迭代收敛的轨迹折线,此时信道环境呈现几乎无衰弱状态。从图 3 中可以看出,在  $K=4$  和  $K=8$  时,其 MUD 模块的输入输出特性曲线都与 DEC 模块的输入输出特性曲线相交在 DEC 模块输出互信息接近于 1 处,表明几乎所有未知消息已被消除,系统性能优异。同时可以看出,  $K=4$  时,系统经过大约 3 次迭代后稳定;  $K=8$  时,系统经过大约 5 次迭代后稳定,表明 OIDMA FSO 系统具有非常好的快速收敛性。

图 4 给出的是 OIDMA FSO 系统在深 Gamma-Gamma 大气湍流衰弱情况下 EXIT 图曲线和迭代收敛轨迹折线,取衰弱系数  $\alpha = 3.1$  和  $\beta = 2.0$ ,表示较强的大气湍流衰弱。从图 4 中可以看出,  $K=4$  和  $K=8$  时的 MUD 模块的输入输出特性曲线与 DEC 模块的输入输出特性曲线的交点,其 DEC 模块输出互信息与图 3 中的无衰弱的情况相比,相对远离 1,表明此时强大气湍流衰弱导致 OIDMA FSO 系统的性能有所降低。但是其值仍然大于 0.9,表示大部分未知消息已被消除,系统依旧保持优良的性能。同时还可以看出与图 3 中一样:  $K=4$  时,系统经过大约 3 次迭代后稳定;  $K=8$  时,系统经过大约 5 次迭代后稳定,表明 OIDMA FSO 系统即使在较强的大气湍流衰弱的情况下仍然具有稳定的快速收敛性。

另外,以上 2 种环境下的 EXIT 图分析结果都与计算机仿真结果相吻合,表明 EXIT 图能够准确地分析 OIDMA FSO 系统性能。

对迭代检测系统研究的传统方法是采用蒙特卡洛仿真法,仿真次数越大,结果越准确。因此,此方法需要较长的时间和较大的计算资源。EXIT 图则巧妙的克服了这一缺点,其分析效率远远高于传统的计算机仿真的方法,能迅速给出迭代检测系统的收敛性能和解码性能,给研究者提供直观的结果,具有重要指导意义和应用价值。以重复码(Turbo 码需要更长的时间)情况下约  $10^{-6}$  的 BER 为例,采用 Intel Core i3 处理器,蒙特卡洛法仿真法需要约 2 h~3 h 才能给出相对精确的 BER。而相同情况下,用 EXIT 图法只需要几分钟就可以得到系统性能,直观、准确、高效。

### 4 结论

本文介绍了 EXIT 图和 OIDMA FSO 系统的基本原理,并利用 EXIT 曲线图对 OIDMA FSO 系统的性能,尤

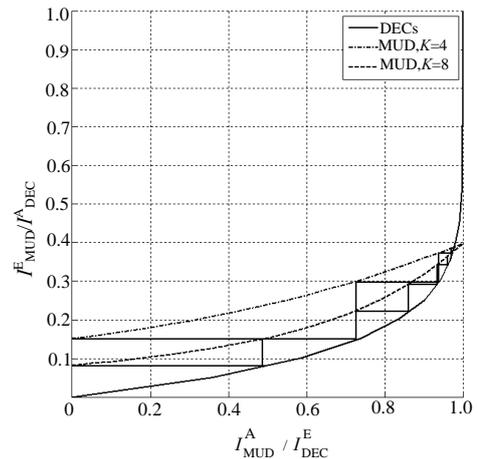


Fig.3 EXIT chart of OIDMA FSO system over deep-space channels  
图3 深空信道下 OIDMA FSO 系统的 EXIT 图

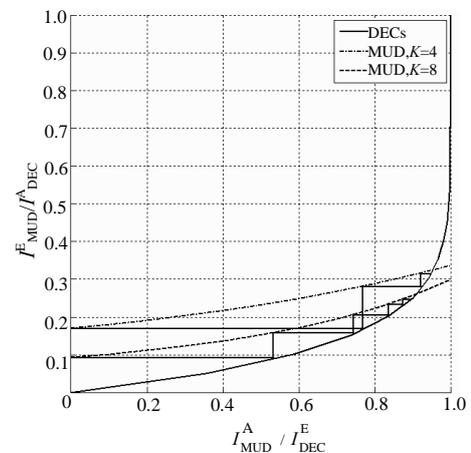


Fig.4 EXIT chart of OIDMA FSO system over deep Gamma-Gamma atmospheric turbulence fading channels  
图4 深 Gamma-Gamma 大气湍流衰落信道下 OIDMA FSO 系统的 EXIT 图

其是收敛性进行了独立的分析。结果证明 OIDMA FSO 系统在深空和深衰弱情况下都具有稳定的快速收敛性和良好的系统性能,是 FSO 通信中一种简单且有效的解决方案,同时也说明 EXIT 图是分析 OIDMA FSO 系统性能的有效工具。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Kedar D,Arnon S. Urban optical wireless communication networks:the main challenges and possible solutions[J]. IEEE Commun., 2004,42(5):2-7.
- [ 2 ] Jazayerifar M,Salehi J A. Atmospheric optical CDMA communication systems via optical orthogonal codes[J]. IEEE Trans. Commun., 2006,54(9):1614-1623.
- [ 3 ] Shalaby H. Complexities, error probabilities, and capacities of optical OOK-CDMA communication systems[J]. IEEE Trans. Commun., 2002,50(12):2009-2017.
- [ 4 ] ZHOU Xiaolin,YANG Yandong,SHAO Yufeng,et al. Photon-counting chip-interleaved iterative PIC detector over atmospheric turbulence channels[J]. Chinese Optical Letter, 2012,10(11):110603.1-110603.4.
- [ 5 ] 杨彦东,周小林. 一种基于光子计数的协作自由光通信技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(1):32-36. (YANG Yandong,ZHOU Xiaolin. A Free Space Optical cooperative communication technology based on photon counting[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(1):32-36.)
- [ 6 ] ten Brink S. Convergence Behavior of Iteratively Decoded Parallel Concatenated Codes[J]. IEEE Trans. Commun., 2001,49(10):1727-1737.
- [ 7 ] Uysal M,Li J,Yu M. Error rate performance analysis of coded free-space optical links over gamma-gamma atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2006,5(6):1229-1233.
- [ 8 ] Berrou C,Glavieux A. Near optimum error correcting coding and decoding:turbo-codes[J]. IEEE Trans. Commun., 1996,44(10):1261-1271.
- [ 9 ] 赵旦峰,李文意. Turbo码译码及其应用研究的最新进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2003,1(2):71-74. (ZHAO Danfeng,LI Wenyi. New Developments of Turbo Decoding and Its Application[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2003,1(2):71-74.)
- [10] Barsoum M F,Moision B,Fitz M. Iterative Coded Pulse-Position Modulation for Deep-Space Optical Communications[C]// Proc. IEEE ITW'07. Pasadena:[s.n.], 2007:66-71.

#### 作者简介:



郑晓伟(1988-),男,山东省聊城市人,在读硕士研究生,主要研究方向为无线通信、光通信.email:zhengxiaowei651@163.com.

周小林(1973-),男,南京市人,博士,讲师,主要研究方向为无线光通信、迭代信号处理.

杜建洪(1960-),男,南昌市人,博士,教授,主要研究方向为图像处理、无线通信.