

基于串行干扰消除的模分复用系统解复用

张天, 李莉, 胡贵军*

吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012

摘要 针对模式相关损耗(MDL)较大时最小均方误差(MMSE)算法无法有效实现模分复用系统(MDM)解复用的问题,提出了一种基于串行干扰消除(SIC)的 MMSE 解复用方法,以实现近似最大似然(ML)检测的性能。该方法通过消除大功率信号对其他各路信号的干扰达到补偿 MDL 的目的,再利用 MMSE 算法恢复源信号。对 6×6 的 MDM 系统进行了解复用,仿真结果显示,相比于 MMSE 算法,所提方法在不同耦合强度、有/无 MDL 下都能有效改善系统性能,且计算复杂度与 MMSE 算法的近似相同。当光纤传输距离为 1200 km、差分模群时延(DMGD)为 9 ps/km、耦合强度为 -5 dB 时,相较于 MMSE 算法,SIC-MMSE 算法的光信噪比改善了 3 dB。

关键词 光通信; 模分复用; 串行干扰消除; 模式相关损耗; 少模光纤

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0306001

Demultiplexing of Mode-Division Multiplexing System Based on Successive Interference Cancellation

Zhang Tian, Li Li, Hu Guijun*

College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract For the case that the minimum mean square error (MMSE) algorithm can not be used to realize the demultiplexing of mode-division multiplexing (MDM) when the mode dependent loss (MDL) is large, a demultiplexing method based on the successive interference cancellation (SIC) is proposed in order to nearly reach the performance of the maximum likelihood (ML) detection method. This method reduces the interference of the maximum power signal to the other signals and the aim for the compensation of MDL is obtained. Then the MMSE method is adopted to demultiplex the original signals. For the demultiplexing of a 6×6 MDM system under different coupling strengths as well as with and without MDL, the simulation results show that, the SIC-MMSE method always achieves good performance compared with the MMSE algorithm. The computational complexity is similar with that of the MMSE algorithm. With the differential mode group delay (DMGD) at 9 ps/km and coupling strength at -5 dB, the optical signal to noise ratio (OSNR) by the SIC-MMSE algorithm improves by 3 dB at a transmission distance of 1200 km compared with that of the MMSE algorithm.

Key words optical communications; mode division multiplexing; successive interference cancellation; mode dependent loss; few-mode fiber

OCIS codes 060.4510; 060.4230; 060.2330

1 引 言

随着信息化社会的飞速发展,全球数据流量每年以超过 50% 的速度爆发式增长,传统的单模光纤通信系统容量已逐渐接近非线性香农极限。作为可突破单模光纤容量瓶颈的一种新型扩容技术,基于少模光纤(FMF)的模分复用技术(MDM)应运而

生^[1-3]。模分复用技术利用少模光纤中相互正交的模式作为独立信道进行信息传输,可以成倍提升光纤系统的传输容量。

模分复用系统存在模式耦合、差分模群时延(DMGD)和模式相关损耗(MDL)等损伤,这些损伤导致信号之间存在信道串扰和码间干扰,因此在接收端需要采用多输入多输出(MIMO)算法进行信号

收稿日期: 2018-08-23; 修回日期: 2018-11-12; 录用日期: 2018-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(61575078,61177066)

* E-mail: hugj@jlu.edu.cn

均衡^[4]。然而,对于长距离模分复用系统,当 MDL 积累较大时,系统传输矩阵的正交性被严重劣化,从而导致传统线性均衡算法的性能急剧下降^[5]。为了补偿 MDL 的影响,目前采用的方法主要有算法补偿法和器件补偿法。算法补偿法包括最大似然检测 (ML) 法^[6-7] 和空时编码 (ST) 法^[8-9], 然而由于其具有很大的计算复杂度,在实际工作中并不适用。器件补偿法通过改进器件和光纤制备工艺来尽量减小 MDL, 然而当模式数量较多时,不同模式之间的增益或者损耗变得很难控制^[10-12]。

本文提出了一种基于串行干扰消除 (SIC)^[13-14] 的最小均方误差算法 (MMSE)^[15-16] 的解复用方法, 将 SIC 算法与 MMSE 算法相结合, 实现 MDL 较大条件下 MDM 系统的解复用。该算法的中心思想是: 首先通过 SIC 算法不断消除大功率信号对其他路信号的干扰, 以达到补偿 MDL 的目的; 然后利用 MMSE 算法对模式耦合等引起的损伤进行补偿, 最后实现 MDM 系统的解复用。本文通过搭建 6×6 模分复用仿真系统, 验证了所提方法的解复用效果。结果表明: 该算法可以有效实现 MDL 较大条件下的 MDM 系统解复用, 能够实现 ML 的误码性能, 且计算复杂度显著低于 ML 检测算法。

2 基于 SIC 的 MMSE 均衡方法

2.1 SIC-MMSE 算法基本原理

MMSE 算法是 MIMO 系统常用的解复用算法, 该算法使均衡器输出的估计向量和发射向量之间的均方误差最小, 其线性滤波器 \mathbf{W}_{MMSE} 可表示为^[16]

$$\mathbf{W}_{\text{MMSE}} = \left(\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{N_0}{E_s} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{H}^H, \quad (1)$$

式中: \mathbf{H} 为采用最小二乘 (LS) 估计法^[17] 估计得到的信道矩阵, $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \cdots \ \mathbf{h}_D]$, \mathbf{h}_i ($i = 1, 2, \dots, D$) 为信道矩阵 \mathbf{H} 的第 i 个列向量; $(\cdot)^H$ 为共轭转置; D 为模式数; N_0 与 E_s 分别为噪声功率与信号发射功率。将线性滤波器与接收信号相乘, 即可恢复出源信号, 即

$$\tilde{\mathbf{s}} = \mathbf{W}_{\text{MMSE}} \mathbf{x}, \quad (2)$$

式中: $\tilde{\mathbf{s}}$ 为恢复出的源信号; \mathbf{x} 为接收信号。

信号在 MDM 系统中长距离传输时, MDL 累计较大, 这会导致各路信号之间的功率差异过大, 此时传输矩阵正交性被破坏, 传输矩阵 \mathbf{H} 为病态矩阵, 利用 (2) 式得到的结果扰动极大, MMSE 算法因此失效。为实现 MDL 存在条件下 MDM 系统的解复用, 需要补偿 MDL 的影响。

在 MDM 系统发送信号功率相同的条件下, 由于光纤链路上各个光器件的影响, 不同模式之间存在功率衰减差异, 采用正交频分复用 (OFDM)-正交幅度调制 (QAM) 时, 某一固定频点的一个输出信号可以表示为

$$\mathbf{x}_n = \sum_{i=1}^D \sqrt{p_{ni}} h_{ni} \mathbf{s}_i + \mathbf{n}_n = \sqrt{p_{nn}} h_{nn} \mathbf{s}_n + \sum_{i=1, i \neq n}^D \sqrt{p_{ni}} h_{ni} \mathbf{s}_i + \mathbf{n}_n, \quad (3)$$

式中: \mathbf{x}_n 为某一频点的第 n 个接收信号, $n = 1, 2, \dots, D$; p_{ni} 为模式 i 到模式 n 的接收功率; h_{ni} 代表冲激响应; $\sqrt{p_{ni}} h_{ni}$ 为信道矩阵的冲激响应; \mathbf{s}_i 为发送信号; \mathbf{n}_n 为噪声。可以看出 (3) 式中第二项为各路接收信号对 \mathbf{x}_n 的干扰, 由于各路接收功率 p_{ni} 不同, 当一个发送信号 \mathbf{s}_i 对应的接收功率 p_{ni} 较大 ($i \neq n$) 时, 对于 \mathbf{x}_n 产生的干扰也较大。即对于同一频点的各个信号, 大功率信号对其他信号的干扰更大, 因此降低大功率信号对其他信号的干扰, 可以有效改善由 MDL 导致的功率串扰。

为消除最大功率信号对其他信号的干扰, 首先对接收信号按照强弱进行排序, 选择功率最强信号 $\mathbf{x}_{(1)}$, 并恢复、判决出功率最强信号 $\hat{\mathbf{s}}_{(1)}$, 在接收信号中对检测出的最大功率信号进行干扰消除, 得到消除最大功率信号干扰的等效接收信号 $\mathbf{x}^{(2)}$, 即

$$\mathbf{x}^{(2)} = \mathbf{x}_{(1)} - \sqrt{p_1} \mathbf{h}_{(1)} \hat{\mathbf{s}}_{(1)} = \sqrt{p_1} \mathbf{h}_{(1)} (\mathbf{s}_{(1)} - \hat{\mathbf{s}}_{(1)}) + \sqrt{p_2} \mathbf{h}_{(2)} \mathbf{s}_{(2)} + \cdots + \sqrt{p_n} \mathbf{h}_{(n)} \mathbf{s}_{(n)}, \quad (4)$$

式中: $\sqrt{p_n} \mathbf{h}_{(n)}$ 为第 n 路的冲激响应, $\mathbf{h}_{(n)}$ 代表冲激函数, p_n 为接收功率; $\mathbf{s}_{(n)}$ 为第 n 个检测信号。由于最大功率信号 $\mathbf{s}_{(1)}$ 所受到的干扰较小, 因此可以近似认为 $\mathbf{s}_{(1)} = \hat{\mathbf{s}}_{(1)}$, 此时消除干扰后的等效接收信号 $\mathbf{x}^{(2)}$ 中不再受到信号 $\mathbf{s}_{(1)}$ 的干扰。

为了进一步消除其他大功率信号的干扰, 采用串行干扰消除的方式, 将上一步得出的检测信号 $\hat{\mathbf{s}}_{(n-1)}$ ($n \geq 2$) 反馈给下一个等效接收信号 $\mathbf{x}_{(n-1)}$, 将信号逐个循环检测并重构等效接收信号^[18], 直至所有信号检测完毕, 即

$$\mathbf{x}_{(n)} = \mathbf{x}_{(n-1)} - \sqrt{p_{n-1}} \mathbf{h}_{(n-1)} \hat{\mathbf{s}}_{(n-1)}. \quad (5)$$

SIC 均衡原理框图如图 1 所示。

通过将 SIC 方法与 MMSE 算法相结合, 可实现长距离 MDM 系统中的解复用, 以搭建的 6×6 仿真系统为例, SIC-MMSE 均衡的具体流程如图 2 所示。

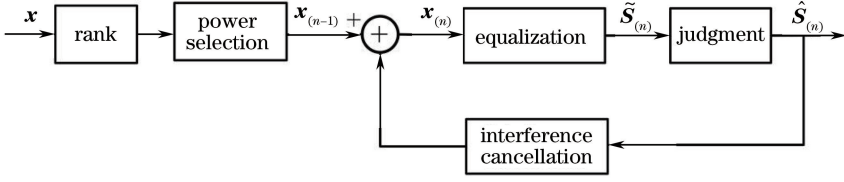


图 1 SIC 均衡原理框图

Fig. 1 Schematic of SIC equalization principle

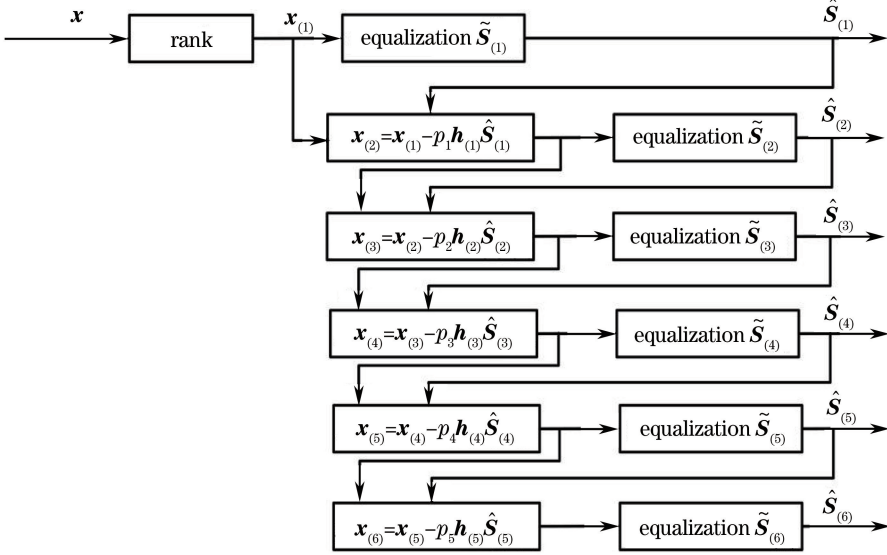


图 2 用于模式解复用的 SIC 均衡原理图

Fig. 2 Schematic of SIC equalization principle for mode demultiplexing

首先对接收到第 $k(k=1,2,\dots,N_{\text{data}},N_{\text{data}}$ 为发送符号数) 个频点处的 6 个信号 \mathbf{x} 按照信号功率的大小进行排序得到 $\mathbf{x}_{(1)}$, 并选择功率最大的信号, 再根据 MMSE 均衡算法恢复出 $\tilde{\mathbf{s}}_{(1)}$, 经判决得到 $\hat{\mathbf{s}}_{(1)}$ 。得到 $\hat{\mathbf{s}}_{(1)}$ 后, 根据(4)式在总信号中消去该信号所带来的功率干扰, 得到 $\mathbf{x}_{(2)}$, 再采用 MMSE 均衡算法恢复出 $\tilde{\mathbf{s}}_{(2)}$, 并进行判决得到 $\hat{\mathbf{s}}_{(2)}$ 。如此循环操作, 直到 6 个信号全部检测完毕, 再进行下一频点的均衡。

2.2 计算复杂度分析

以每个模式每个比特的浮点运算(FLOP)次数来表示算法的计算复杂度, 1 次复乘等于 4 次实乘和 2 次实加, 即等于 6 次浮点运算, 1 次复加等于 2 次实加, 即 2 次浮点运算。

ML 算法的检测公式可表示为: $\hat{\mathbf{s}}_{\text{ML}} = \underset{\mathbf{s} \in \Omega^D}{\text{argmin}} \|\mathbf{x} - \mathbf{H}\mathbf{s}\|^2$, 其中 Ω 为发射信号的星座点集合^[19]。ML 算法将对所有可能的发射信号矢量进行全局搜索并计算出该公式最小的欧氏距离, 需对 $\|\mathbf{x} - \mathbf{H}\mathbf{s}\|^2$ 进行 Ω^D 次运算, 其中 $\Omega = 2^M$, M 表

示每个符号中的比特数。因此, ML 的算法复杂度为

$$c_{\text{ML}} = [(8D^2 + 6D - 1) \times \Omega^D] / (D \lg \Omega). \quad (6)$$

对于 MMSE 算法, 由(1)、(2)式可知, MMSE 算法计算滤波矩阵需要的浮点运算次数为 $34D^3 - 2D^2 + D$, 滤波矩阵与接收信号相乘需要 $16D^2$ 次浮点运算, 因此 MMSE 的计算复杂度为^[20]

$$c_{\text{MMSE}} = (34D^3 + 14D^2 + D) / (D \lg \Omega). \quad (7)$$

SIC-MMSE 方法的计算复杂度是 MMSE 算法的 D 倍, 在各个频点每恢复出一个信号需要进行 $D-1$ 次干扰消除, 每次干扰消除需要 $7D$ 次运算, 即 SIC-MMSE 方法的计算复杂度为

$$c_{\text{SIC-MMSE}} = (34D^4 + 14D^3 + 8D^2 - 7D) / (D \lg \Omega). \quad (8)$$

3 基于少模光纤的模分复用仿真系统

为了验证 SIC-MMSE 方法对 MDM 系统的解复用性能, 搭建了一个 6×6 的模分复用仿真系统, 其结构框图如图 3 所示。仿真的少模光纤与文献^[21]所描述的少模光纤模型相似, 均采用矩阵传输

模型。本系统将三模光纤的基模 01 模(LP₀₁),高阶模 11 模的两个简并模(LP_{11a}与 LP_{11b})及其对应的 x 、 y 方向的偏振模(LP_{01x}, LP_{01y}, LP_{11ax}, LP_{11ay}, LP_{11bx}与 LP_{11by})分别作为独立信道,每个信道承载的信息为 20 Gbit/s。在信号发送端使用 QAM 结合 OFDM 的方式进行调制,傅里叶变换长度为 2048,循环前缀长度为 $0.16N_{data}$,所用激光器的工

作波长为 1550 nm。在数据接收端,通过模分解复用器与偏振解复用器(DEMUX)将混合的信号进行分离,并加入高斯白噪声以设定系统的光信噪比(OSNR),再通过相干接收器将光信号转换为电信号。最后,通过电域数字信号处理(DSP)模块对接收的信号进行解复用,恢复出源信号。MDM 系统其余部分仿真参数如表 1 所示。

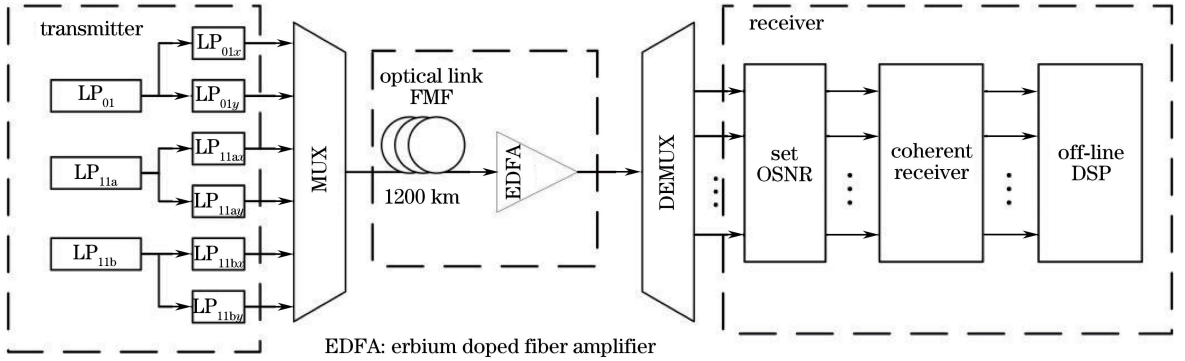


图 3 6×6 模分复用系统结构示意图

Fig. 3 Schematic of 6×6 mode-division multiplexing system

表 1 仿真参数

Table 1 Parameters for simulation

Parameter	Value
Fiber length /km	1200
Fiber loss / (dB·km ⁻¹)	0.2
Fiber dispersion (LP ₀₁) / (ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹)	20
Fiber dispersion (LP ₁₁) / (ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹)	21

4 仿真结果

通过采用 VPI 仿真平台联合 Matlab 编程软件的方式,对 SIC-MMSE 方法的解复用效果进行验证。为直观体现 MDL 对系统性能的影响,对接收信号星座图进行仿真。图 4(a)、(b)是 OSNR 为 18 dB,DMGD 为 9 ps/km,耦合强度为 -5 dB,MDL 分别为 5 dB、10 dB 条件下的解复用前的信号星座图,可以看出:当 MDL 较大时,信号失真较严重,此时需要对接收信号进行解复用。图 4(c)、(d)分别是 MDL 为 5 dB、10 dB 时 MMSE 算法解复用后的信号星座图,图 4(e)、(f)分别是 MDL 为 5 dB、10 dB 时 SIC-MMSE 算法解复用后的信号星座图。通过对比图 4(c)~(f)可以看出,SIC-MMSE 均衡后的信号聚集现象明显,相较于 MMSE 算法具有更好的解复用性能。

为了进一步体现 SIC-MMSE 算法的解复用性能,图 5 给出了在 DMGD 为 9 ps/km、耦合强度为 -5dB、传输距离为 1200 km 条件下,ML、SIC-

MMSE、MMSE 三种算法分别在 MDL 为 0 dB、5 dB、10 dB 情况下的误码率(BER)对比曲线。当 MDL 为 0 dB 时,各种算法的解复用差异很小,这是由于此时传输矩阵正交性未被破坏,算法性能保持良好;当 MDL 为 5 dB 时,相较于 MMSE 算法,SIC-MMSE 算法改善效果明显;当 MDL 为 10 dB 时,6 路信号的平均误码率达到 10^{-3} 时所需的 OSNR 分别为 25.2 dB、21.3 dB、19.6 dB,即 SIC-MMSE 算法的 OSNR 代价值比 MMSE 算法的低约 3 dB。

此外,探究了不同耦合模式下 MMSE、SIC-MMSE、ML 三种算法的解复用效果。图 6 给出了 DMGD 为 9 ps/km、MDL 为 10 dB、OSNR 为 25 dB、传输距离为 1200 km 条件下三种算法的 BER 随耦合强度的变化曲线。当耦合强度分别为 -6.3 dB、-9.2 dB 时,SIC-MMSE 方法与 ML 算法的误码率达到 10^{-3} ,而当耦合强度为 -3 dB 时,MMSE 算法仍不符合通信要求。这是由于耦合强度越大,信号之间的功率耦合就越大,而由 MDL 带来的功率差异会被平均。可以看出,随着耦合强度的增大(即强耦合模式下),各算法的解复用性能得到明显提升。

为对 SIC-MMSE 算法的计算复杂度进行衡量,图 7 中绘出了不同算法的计算复杂度随传输模式数量变化的曲线。SIC-MMSE 算法的计算复杂度的增长趋势与 MMSE 算法的相似,相对于 MMSE 算

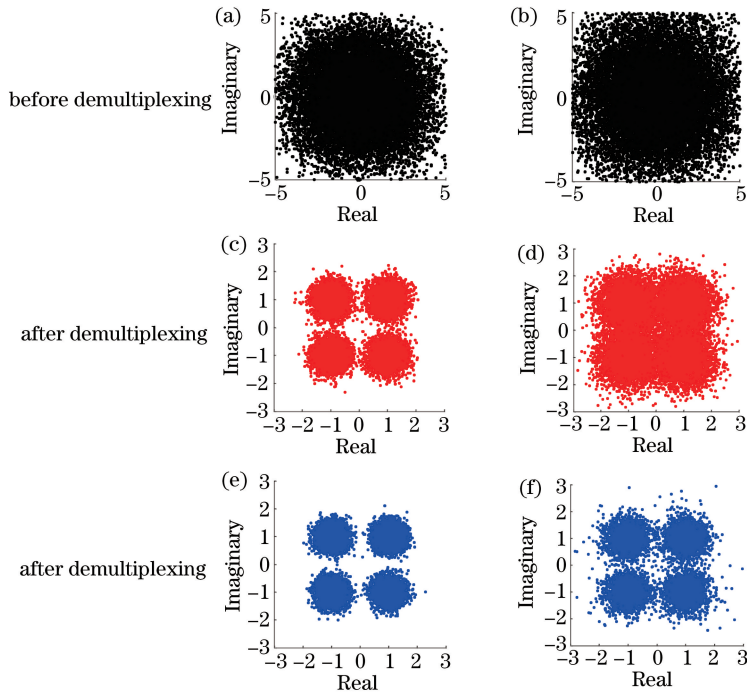


图 4 LP_{01x} 信号星座图。(a) MDL 为 5 dB;(b) MDL 为 10 dB;(c) MDL 为 5 dB 时,经 MMSE 均衡;(d) MDL 为 10 dB 时,经 MMSE 均衡;(e) MDL 为 5 dB 时,经 SIC-MMSE 均衡;(f) MDL 为 10 dB 时,经 SIC-MMSE 均衡

Fig. 4 Signal constellations of LP_{01x}. (a) MDL at 5 dB; (b) MDL at 10 dB; (c) MDL at 5 dB with MMSE demultiplexing; (d) MDL at 10 dB with MMSE demultiplexing; (e) MDL at 5 dB with SIC-MMSE demultiplexing; (f) MDL at 10 dB with SIC-MMSE demultiplexing

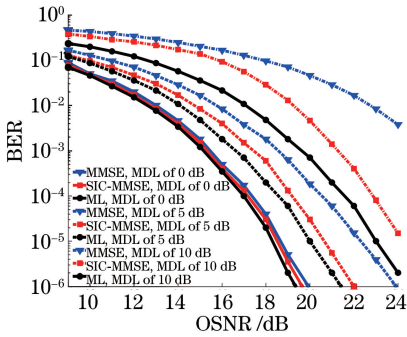


图 5 不同 MDL 下不同解复用方法的误码率(BER) 随 OSNR 的变化曲线

Fig. 5 Bit error rate (BER) versus OSNR under different MDL by different demultiplexing methods

法只有较小的复杂度牺牲,其解复用算法性能显著提高并逼近 ML 算法。当模式数量超过 4 时,相较于 ML 算法指数型增长的计算复杂度,SIC-MMSE 算法具有明显的计算复杂度优势。

5 结 论

为了实现 MDL 存在条件下的 MDM 系统解复用,采用 SIC 算法与 MMSE 算法结合的方式实现近似 ML 算法的 6×6 MDM 系统的解复用效果。分别在有、无 MDL 以及不同耦合强度下对 MMSE、

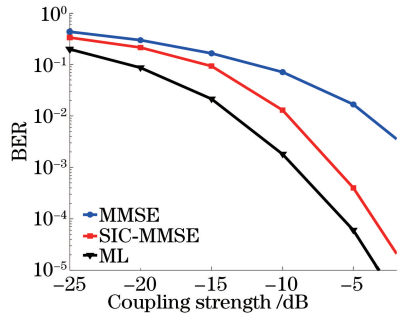


图 6 不同解复用方式的 BER 随耦合强度的变化曲线

Fig. 6 BER versus coupling strength by different demultiplexing methods

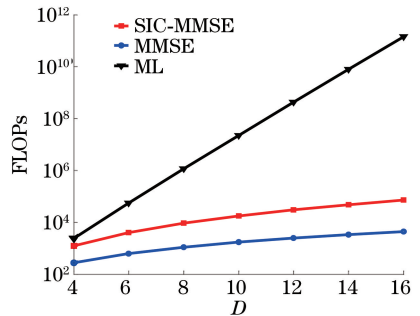


图 7 不同解复用方式的浮点运算次数

Fig. 7 Computational complexity of FLOPs for different demultiplexing methods

SIC-MMSE 与 ML 算法的解复用性能进行比较验证。通过仿真发现, SIC-MMSE 算法与 MMSE 算法相比能够有效补偿 MDL, 且计算复杂度增益较低; SIC-MMSE 算法能够近似实现 ML 算法的解复用性能, 且避免了计算复杂度随模式数量增加呈指数型增长的问题。

参 考 文 献

- [1] Liu Y P, Yang Z Q, Zhao J, *et al.* Intrinsic loss of few-mode fibers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 2107-2116.
- [2] Chen C G, Hu G J, Liu F, *et al.* Measurement of mode coupling in few-mode fiber based on rayleigh backscattering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0806002.
陈翠光, 胡贵军, 刘峰, 等. 基于背向瑞利散射的少模光纤模式耦合测量[J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0806002.
- [3] Li C, Zhao J, Wang W, *et al.* 4×100 Gbit/s long-distance quasi-single-mode bi-directional transmission with few-mode fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0206001.
李超, 赵健, 王伟, 等. 4×100 Gbit/s 少模光纤长距离准单模双向传输的实验研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0206001.
- [4] Lobato A, Ferreira F, Kushnerov M, *et al.* Impact of mode coupling on the mode-dependent loss tolerance in few-mode fiber transmission[J]. *Optics Express*, 2012, 20(28): 29776-29778.
- [5] Ho K P, Kahn J M. Mode-dependent loss and gain: statistics and effect on mode-division multiplexing [J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16612-16635.
- [6] Lobato A, Ferreira F, Rabe J, *et al.* On the mode-dependent loss compensation for mode-division multiplexed systems [C]. 15th International Conference on Transparent Optical Networks, 2013: 13779250.
- [7] Lobato A, Ferreira F, Inan B, *et al.* Maximum-likelihood detection in few-mode fiber transmission with mode-dependent loss [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(12): 1095-1098.
- [8] Awwad E, Othman G R B, Jaouën Y. Space-time coding and optimal scrambling for mode multiplexed optical fiber systems [J]. *IEEE International Conference on Communications*, 2015: 5228-5234.
- [9] Amhoud E M, Othman G R B, Jaouën Y. Design criterion of space-time codes for SDM optical fiber systems [C]. 23rd International Conference on Telecommunications, 2016: 16107604.
- [10] Jung Y M, Kang Q Y, Sahu J K, *et al.* Reconfigurable modal gain control of a few-mode EDFA supporting six spatial modes [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(11): 1100-1103.
- [11] Wada M, Sakamoto T, Yamamoto T, *et al.* Cladding pumped randomly coupled 12-core erbium-doped fiber amplifier with low mode-dependent gain [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(5): 1220-1225.
- [12] Antonelli C, Mecozzi A, Shtaf M, *et al.* Modeling and performance metrics of MIMO-SDM systems with different amplification schemes in the presence of mode-dependent loss [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2203-2219.
- [13] Yin Z L, Mao X P, Zhang Q N, *et al.* Fast recursive algorithm for implementation of MIMO ZF-SIC detection [J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(7): 67-74.
殷作亮, 毛兴鹏, 张钦宇, 等. 实现 MIMO 系统串行干扰消除迫零检测的快速递归算法 [J]. *通信学报*, 2012, 33(7): 67-74.
- [14] Kontik M, Coleri Ergen S. Scheduling in successive interference cancellation based wireless ad hoc networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(9): 1524-1527.
- [15] Wubben D, Bohnke R, Kuhn V, *et al.* MMSE extension of V-BLAST based on sorted QR decomposition [C]. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2003: 508-512.
- [16] Mehana A H, Nosratinia A. Lattice-reduction aided linear equalization in cyclic-prefix system [C]. *IEEE Global Telecommunications Conference*, 2011: 12505841.
- [17] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, *et al.* Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 521-531.
- [18] Hu S H. Research on power control for successive interference cancellation in wireless networks [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
胡松华. 无线网络串行干扰消除功率控制研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [19] Ren P Y, Ling J, Wang R. A simplified maximum likelihood detection algorithm based on noise analysis in V-BLAST system [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(3): 539-543.
任品毅, 令洁, 汪瑞. V-BLAST 系统中一种基于噪声分析的简化最大似然检测算法 [J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(3): 539-543.
- [20] Kim H, Lee H, Kim J. MMSE-based lattice-reduction-aided fixed-complexity sphere decoder for

low-complexity near-ML MIMO detection[C]. IEEE International Workshop on Local and Metropolitan Area Networks, 2015: 15180940.

domain-independent component analysis for MDM transmission [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(16): 1778-1781.

[21] Yan L, Hu G J. A fast and efficient frequency-