

全光多输入多输出信号处理中光采样耦合器的优化

范鑫磊, 付松年, 唐 明, 刘德明

华中科技大学光学与电子信息学院下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 光采样耦合技术是全光多输入多输出(MIMO)信号处理中的关键技术。模式相关损耗(MDL)和插入损耗(IL)是影响器件性能的关键因素,矩阵条件数可以用于衡量光采样耦合器的性能。对支持 3 个线偏振模式(LP₀₁, LP_{11a}, LP_{11b})全光 MIMO 信号处理的光采样耦合器进行了理论分析。在 3 个采样点的情况下,对采样光斑的大小和位置进行优化,将矩阵条件数作为优化条件,并将 MDL 和 IL 分别降低至 0.03 dB 和 1.90 dB。研究发现,通过增加采样点的数目可以降低器件的 IL,优化后得到的 MDL 和 IL 分别为 0.04 dB 和 1.56 dB。尽管增加采样点的数目可以降低 IL,在少模光纤及采样点的几何限制下,仍存在最优采样点数目。

关键词 光纤光学; 全光多输入多输出; 光采样; 插入损耗; 矩阵条件数

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0406004

Optimization of Light Sampling Coupler in All-Optical Multiple-Input Multiple-Output Signal Processing

Fan Xinlei, Fu Songnian, Tang Ming, Liu Deming

National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Optical sampling coupling technique is one of key techniques in all-optical multiple-input multiple-output (MIMO) signal processing. Both the mode dependent loss (MDL) and the insertion loss (IL) are key parameters which effect the device performance. The condition number of matrix can characterize the performance of optical sampling coupler. The optical sampling coupler which supports all-optical MIMO signal with three linear polarization modes (LP₀₁, LP_{11a}, LP_{11b}) is numerically investigated. Under the condition of three sampling points, the condition number of matrix is used as the optimization condition to optimize the size and the position of sampling spots. MDL can be reduced to 0.03 dB and IL can be reduced to 1.90 dB. In order to further reduce the IL, the number of sampling points is increased. MDL is 0.04 dB and IL is 1.56 dB after the optimization for the size and the position of sampling spots. Although IL can be reduced when we increase the number of sampling points, an optimal number of sampling points exists under the geometric constraints of few mode fibers and sampling points.

Key words fiber optics; all-optical multiple-input multiple-output; light sampling; insertion loss; condition number of matrix

OCIS codes 060.1155; 060.1810; 060.4230

1 引 言

随着光纤通信技术的不断进步,时分复用、波分复用、偏振复用以及高阶调制格式的广泛应用,使得单模光纤的传输容量已经逼近香农极限^[1]。随着网络新应用的不断涌现,因特网数据流量持续增加,新型高速大容量光传输技术面临未来通信网络的重大挑战。模分复用(MDM)技术利用少模光纤(FMF)中各个模式间的正交性,将每个模式作为独立的信道进行信号传输,在接收端利用多输入多输出(MIMO)信号处理手段消

收稿日期: 2016-11-08; **收到修改稿日期:** 2016-12-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA015502)

作者简介: 范鑫磊(1992—),男,硕士研究生,主要从事模分复用通信系统等方面的研究。E-mail: xinlei@hust.edu.cn

导师简介: 付松年(1975—),男,博士,教授,主要从事光纤通信系统等方面的研究。E-mail: songnian@hust.edu.cn

(通信联系人)

除模式信道中产生的模式耦合和串扰,进一步提高光纤传输系统的传输容量和频谱效率,成为国内外研究的热点^[2]。对于 MDM 传输系统,在模式复用器/解复用器以及 FMF 传输中,模式耦合会造成不同模式信道间的信号混叠,因此必须在接收端进行 MIMO 信号处理。传统的 MIMO 信号处理方法是先使用模式解复用器完成模式分离,再用数个独立的相干接收机将光模拟信号转换为电数字信号,接着在数字域进行数字信号处理(DSP)以恢复出原始信号^[3]。这种方法需要高速的模数转换器件(ADC),DSP 功耗大,且随着符号率和模式数的提升,接收端的处理过程将会变得相当复杂。利用全光信号处理,不进行光电信号转换,直接将模式解复用和 MIMO 信号处理过程合二为一,并使用光波导直接对光信号进行处理,这种方法被称为全光 MIMO 信号处理^[4]。该方法不需要 ADC、DSP,能够降低系统功耗,且光波导结构有利于集成,可以降低接收机的硬件复杂度。

全光 MIMO 信号处理的工作原理可以分为 2 个步骤:1)由 FMF 到光波导的空间光采样过程,通过该过程可得到 FMF 中传输的所有信号的信息;2)由光波导结构对光信号的幅度和相位进行处理,从而获得原始信号。空间光采样过程可以看作是 FMF 中模式在采样点处的模场和光波导模场之间的酉变换,通过第二部分的光波导结构可以对该酉变换进行逆变换,从而恢复出原始信号。2011 年,Doerr 等^[4]提出一种全光 MIMO 结构,通过垂直光栅耦合器将单模光纤中的偏振复用信号耦合到片上,完成偏振解复用,再利用级联的相移器和耦合器调整其幅度和相位,消除偏振串扰,从而恢复出原始信号,实现了偏振复用-差分正交相移键控(PDM-DQPSK)信号的 2×2 MIMO 的偏振解复用。2012 年,Fontaine 等^[5]提出第一个全光 MIMO 光学芯片,实现了 6×6 MIMO 信号处理。同年,Bulow 等^[6]提出一种光采样器和级联耦合器组成的波导结构,计算出光纤与光采样耦合器之间的耦合矩阵,并根据其逆矩阵确定后续波导的参数,从而恢复出原始信号。

空间光采样过程是片上全光 MIMO 信号处理的基础,两个关键参数是模式相关损耗(MDL)和插入损耗(IL)。MDL 越接近 0,采样耦合过程对于系统传输容量的影响越小^[7];IL 越小,采样耦合过程对信噪比的影响越小,因此需要通过优化系统以降低 MDL 和 IL。研究发现,采样光斑的形状和排布方式都会对 MDL 和 IL 产生影响。Ryf 等^[8]对光斑耦合器在复用过程的应用进行了理论分析,对光斑的大小和间距进行了优化,得到 IL 为 2 dB。Blau 等^[9]通过改变光斑的形状,将 IL 进一步降低至 1.5 dB。但是通过改变光斑形状来降低 IL 的方法,需要使用分立的空间光学器件,系统结构复杂。

本文将上述复用过程中对 MDL 和 IL 的研究方法应用于接收端采样耦合器的研究,并且将矩阵条件数的概念作为优化条件。在支持 3 个模式复用的系统中,对光斑的大小和位置进行优化,得到 MDL 为 0.03 dB,IL 为 1.90 dB。通过增加采样点的数目,在保持 MDL 不变情况下,使得 IL 进一步降低至 1.56 dB。研究结果证明,增加采样点的数目可以在保持较小 MDL 的同时降低 IL;但受 FMF 尺寸的限制,只增加采样点并不能一直降低 IL,采样点数目存在一个最优值。

2 采样光斑分布的优化

Ryf 等^[8]阐述了基于光斑的模式耦合器的原理,FMF 中的各个传输模式组成了光纤中传输光场的完备正交基,因此其横截面的光场可以描述为 FMF 所支持模式的线性叠加。将 3 个采样光斑按照正三角形排列,可以在支持 3 个线偏振模式(LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b})的 FMF 端面激发出各个传输模式的线性组合。同理,在接收端将该耦合器反向工作,在 FMF 端面合理地安排采样点分布,便可以从 FMF 端面各个模式的线性组合中将各个模式信号分离开来,实现模式解复用。

图 1(a)所示为在 FMF 端面进行采样的 3 个采样点的光斑分布,大圆表示 FMF 的包层,虚线表示半径为 R 的 FMF 的纤芯,小圆表示半径为 r 的采样光斑, L 表示采样光斑圆心与 FMF 圆心之间的距离。图 1(b)所示为采用垂直光栅耦合器进行光斑采样的立体结构,FMF 与光学芯片耦合,光学芯片分为垂直光栅耦合区和信号处理波导区。光栅耦合区包括了 3 个垂直光栅耦合器,分布方式如图 1(a)所示,具体结构示意图如图 1(c)所示。垂直光栅耦合器的刻蚀深度为 90 nm,光栅周期为 580 nm,凹槽直径为 300 nm,脊波导宽度为 10 μm , Pol_x 波导长度为 850 μm , Pol_y 波导中弯曲波导的半径为 530 μm 。该耦合器在完成耦合过程的同时可实现偏振分束^[10],该过程的实现要求两路波导器件完全相同,否则会增大偏振相关损耗。该

结构在绝缘体上的硅完成制作,顶层硅厚度为 220 nm,掩埋二氧化硅层的厚度为1 μm,光栅和波导采用电子束光刻和反应离子刻蚀制作而成。将由光栅耦合区采集的信号输入到信号处理波导区进行 MIMO 信号处理,信号处理波导区的结构如图 1(d)所示,图中 In1~In6 为 6 个输入端口。给出 6×1 MIMO 解复用的结构,由相移器和分束器级联组成^[4],通过该部分调节光栅耦合器采集到的光信号的幅度和相位,完成全光 MIMO 信号处理过程。

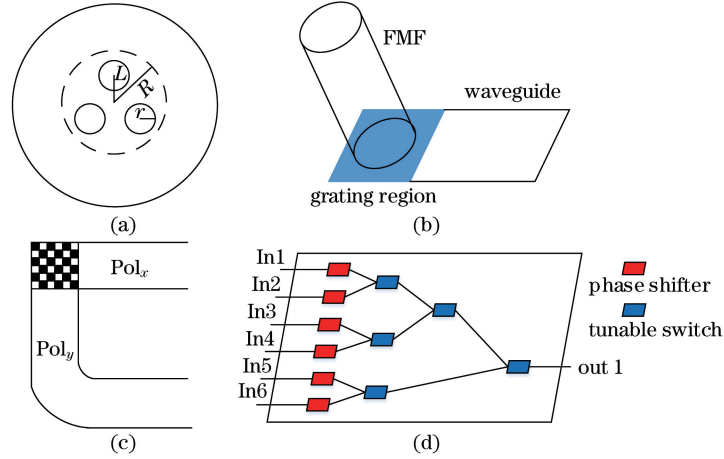


图 1 (a) 3 个采样点的光斑排布;(b)全光 MIMO 信号处理结构示意图;
(c)垂直光栅耦合器示意图;(d)信号处理波导区示意图

Fig. 1 (a) Spot arrangement of three sampling spots; (b) structural diagram of all-optical MIMO processing;
(c) diagram of vertical grating coupler; (d) diagram of waveguide region for signal processing

FMF 端面的模场分布和采样点处光波导模场之间的关系可以表示为一个酉变换,其变换矩阵可以由 3×3 矩阵 \mathbf{C} 表示,矩阵元素可由模场耦合公式表示为^[6]

$$C_{i,j} = \iint \psi_j \varphi_i^* dA, \quad (1)$$

式中 ψ_j 为 FMF 中的第 j 个模式的归一化模场, φ_i^* 为第 i 个垂直光栅耦合器处的归一化模场的复共轭, A 为采样光斑的面积。为了对该耦合过程进行分析,对矩阵 \mathbf{C} 进行奇异值分解^[11],可得

$$\mathbf{C} = \mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{V}^\dagger, \quad (2)$$

式中 \mathbf{U} 、 \mathbf{V}^\dagger 表示 3×3 的酉矩阵, \mathbf{A} 为对角矩阵。 λ_i 为矩阵 \mathbf{A} 的元素,表示 3 个正交耦合信道的强度传输系数。由强度传输系数计算得到模式相关损耗 L_{MDL} 和插入损耗 L_{IL} ^[8] 分别为

$$L_{MDL} = 10 \lg [\max(\lambda_n^2) / \min(\lambda_n^2)], \quad (3)$$

$$L_{IL} = 10 \lg \left(\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \lambda_i^2 \right)^{-1}. \quad (4)$$

为了评价分析耦合矩阵 \mathbf{C} ,引入条件数的概念,同时将其作为优化的目标参数。条件数是矩阵分析中用于衡量线性方程组病态与否的数学概念。在 MIMO 系统中,一般用矩阵的条件数衡量信道的好坏。信道矩阵条件数越趋近于 1,通信系统的信道容量越大,信道矩阵的条件数越大,输入端微小的改变将会导致接收端信号强度的强烈波动,因而对传输系统的性能产生影响。同理,对于所研究的光采样耦合器,耦合矩阵 \mathbf{C} 的条件数越趋近于 1,其对整个传输系统容量的影响就越小,输入端微小的改变对输出端的影响就越小,则越有利于后续的信号处理。矩阵 \mathbf{C} 的条件数定义为矩阵 \mathbf{C} 的范数与其逆矩阵的范数之积,即

$$\text{cond}(\mathbf{C}) = \|\mathbf{C}\| \cdot \|\mathbf{C}^{-1}\|. \quad (5)$$

先确定固定的采样光斑半径 r 和采样光斑位置 L ,根据(1)式计算得到各个采样光斑处的耦合系数 $C_{i,j}$,从而得到该固定采样光斑条件下的耦合矩阵 \mathbf{C} 。根据(2)式对矩阵 \mathbf{C} 进行奇异值分解,将其计算结果代入(3)~(5)式,可以得到 MDL、IL 和矩阵条件数。将上述 3 个值作为优化条件,改变 r 和 L ,重复上述计算过程进行优化,从而得到最优的 r 和 L ^[8]。

图 2 所示为当 $r=2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 \mu\text{m}$ 时, MDL 和 IL 随 L 的变化曲线。如图 2(a) 所示, 当 $r=2.0 \mu\text{m}$ 且 L 逐渐增大时, MDL 先减小后增大, $L=5.3 \mu\text{m}$ 时 MDL 取得最小值; IL 随着 L 的增大逐渐增大, 但变化范围较小, 因此最佳位置选取 $L=5.3 \mu\text{m}$ 。如图 2(b)~(f) 所示, 当 r 分别为 $2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 \mu\text{m}$ 时, 对应的最佳位置分别为 $5.4, 5.5, 5.8, 6.2, 6.6 \mu\text{m}$ 。

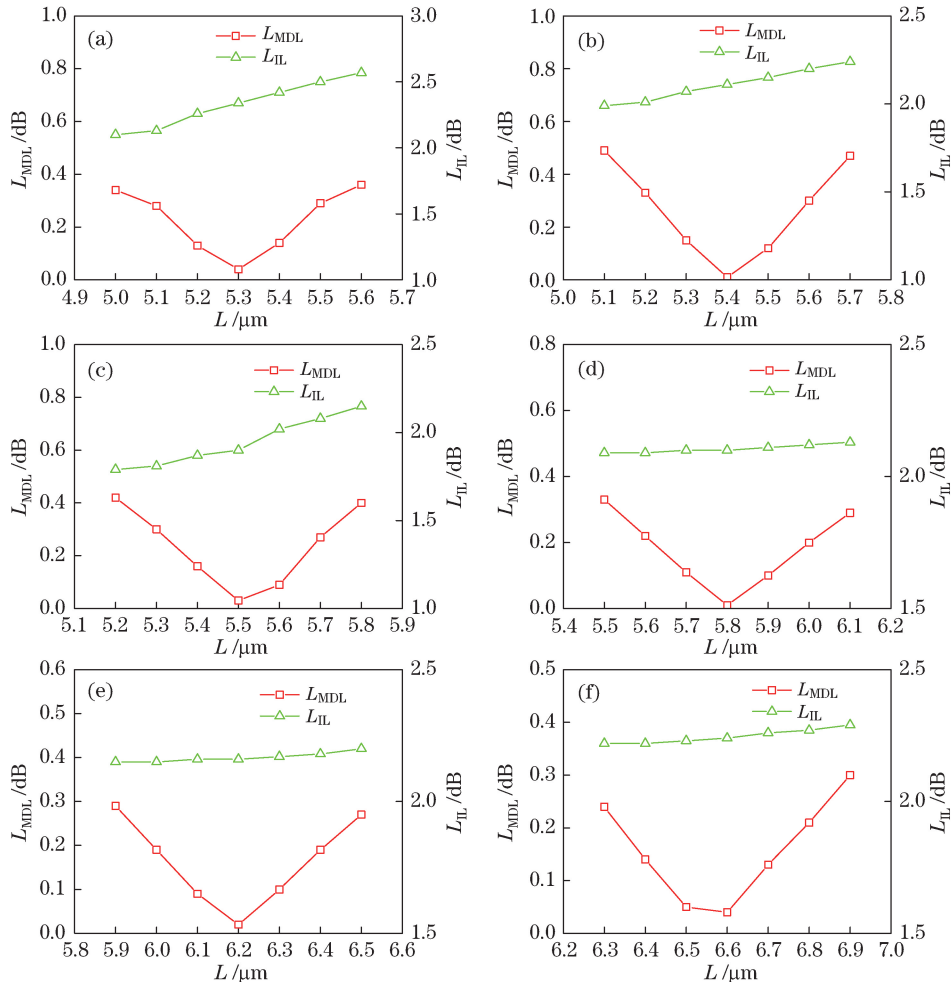


图 2 不同 r 时, MDL 和 IL 随 L 的变化。(a) $r=2.0$; (b) $r=2.5$; (c) $r=3.0$; (d) $r=3.5$; (e) $r=4.0$; (f) $r=4.5$

Fig. 2 Variations in MDL and IL with L at different r . (a) $r=2.0$; (b) $r=2.5$; (c) $r=3.0$; (d) $r=3.5$; (e) $r=4.0$; (f) $r=4.5$

以矩阵条件数作为优化参数进行计算。图 3 所示为 $r=3.0 \mu\text{m}$ 时, 耦合矩阵 C 的条件数随 L 的变化。 $r=3.0 \mu\text{m}$ 和 $L=5.5 \mu\text{m}$ 时耦合矩阵 C 的条件数最接近于 1, 因此其最佳位置 $L_{\text{opt}}=5.5 \mu\text{m}$, 与上述通过优化 MDL 和 IL 得到的最佳位置相同。改变 r 的值, 重复上述计算过程, 得到的最佳位置均与通过优化 MDL 和 IL 得到的最佳位置相同, 证明采用该最优采样点分布对于整个系统信号处理的影响较小。

将图 2(a)~(f) 最佳位置处的 IL 的值进行比较, 发现当 r 逐渐增大时, IL 先减小后增大, $r=3.0 \mu\text{m}$ 时, IL 取得最小值。由上述的计算结果可知, 最优解为 $r=3.0 \mu\text{m}$ 且 $L=5.5 \mu\text{m}$, 此时 $L_{\text{MDL}}=0.03 \text{ dB}$, $L_{\text{IL}}=1.9 \text{ dB}$, 这是当采样点为 3 个时的最优结果。

3 采样光斑数目的影响

为进一步降低 IL 且不引入额外的空间分立器件, 在不改变采样光斑形状的条件下, 通过增加采样点的数目来进一步降低 IL。

与采样点数为 3 时的计算思路相同, 将采样点的数目增加到 4, 考虑光纤模式的对称性, 将 4 个采样点按照正方形排布, 如图 4(a) 所示。通过计算可以得到不同 r 对应的不同最佳间距 L_{opt} , 将上述最优情况进行

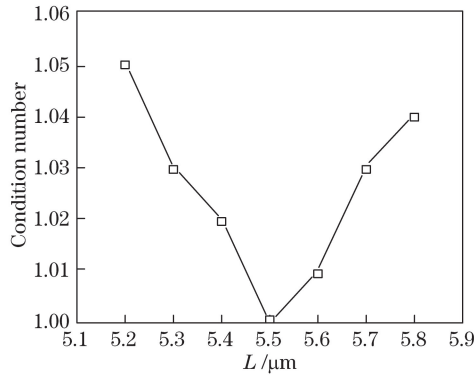


图 3 $r=3.0\ \mu\text{m}$ 时矩阵条件数随 L 的变化

Fig. 3 Condition number of matrix as a function of L at $r=3.0\ \mu\text{m}$

比较,得到如图 4(b)所示的结果。最佳位置 L_{opt} 对应的 MDL 的值均接近于 0, $r=3.5\ \mu\text{m}$ 时 IL 取得最小值。如图 4(c)所示,可把采样点数目增加至 5 个。如图 4(d)所示, r 只能取 $3.0\ \mu\text{m}$, 因为当 r 大于 $3.0\ \mu\text{m}$ 时,通过上述优化过程得到的最佳位置会使得各个采样点发生重叠,在实际中无法实现。当 $r=3.5\ \mu\text{m}$ 时,计算矩阵条件数随 L 的变化如图 5(a)所示的曲线,当 $L=5.8\ \mu\text{m}$ 时,矩阵条件数最小且接近于 1,与上述计算优化过程所得的 L_{opt} 相同。因此,可以得到 4 个采样点的最佳半径和最佳间距分别为 $r=3.5\ \mu\text{m}$ 和 $L=5.8\ \mu\text{m}$ 。此时 $L_{\text{MDL}}=0.04\ \text{dB}$, $L_{\text{IL}}=1.56\ \text{dB}$ 。

$r=3.0\ \mu\text{m}$ 时,矩阵条件数随 L 的变化如图 5(b)所示。当 $L=5.5\ \mu\text{m}$, 矩阵条件数取得最小,但是由于纤芯尺寸的限制不能取得最优的采样光斑半径 r , 所以矩阵条件数相比于采样点个数为 3 和 4 时较大。因此,当采样点为 5 个时,最佳的位置分布为 $r=3.0\ \mu\text{m}$ 且 $L=5.5\ \mu\text{m}$, 此时 $L_{\text{MDL}}=0.05\ \text{dB}$, $L_{\text{IL}}=2.2\ \text{dB}$ 。

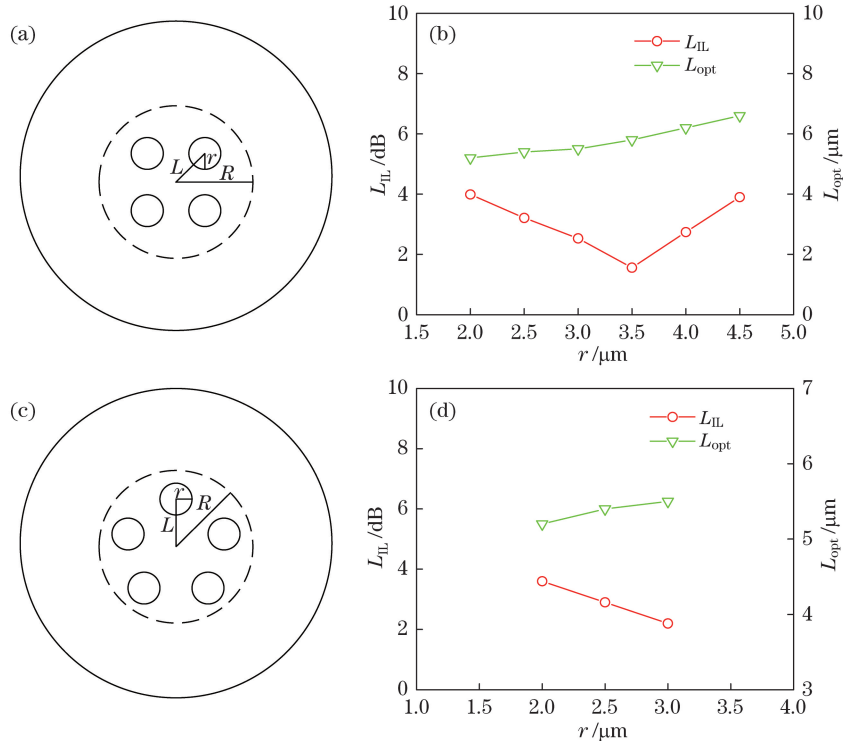


图 4 (a) 4 个采样点的光斑排布方式; (b) 4 个采样点时 L_{opt} 和 L_{IL} 随 r 的变化; (c) 5 个采样点的光斑排布方式; (d) 5 个采样点时 L_{opt} 和 L_{IL} 随 r 的变化

Fig. 4 (a) Spot arrangement of four sampling points; (b) L_{IL} and L_{opt} as a function of r when number of sampling points is 4; (c) spot arrangement of five sampling points; (d) L_{IL} and L_{opt} as a function of r when number of sampling points is 5

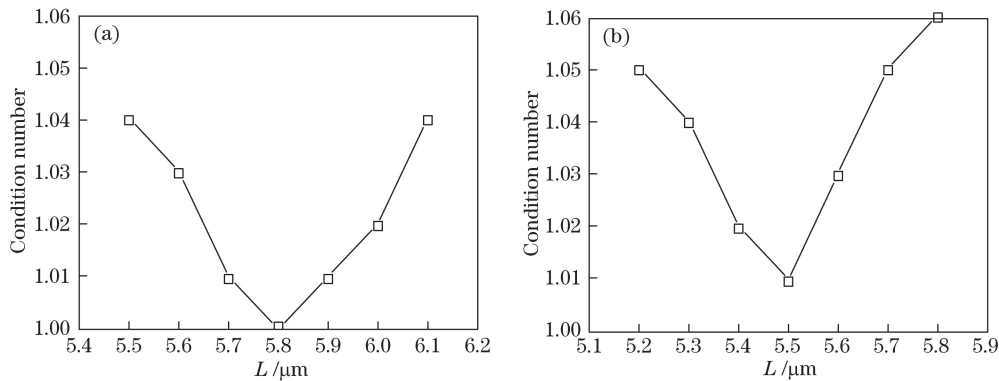


图 5 不同采样点数下条件数的变化曲线。(a) 4 点; (b) 5 点

Fig. 5 Curves of condition number under different sampling points. (a) four points; (b) five points

表 1 所示为当采样点数为 3~5 时的优化结果。通过增加采样点数,能够在保持 MDL 接近于 0 的情况下降低 IL;但是受 FMF 纤芯尺寸的限制,采样点的增加会使得采样点的分布出现空间上的重叠,其理论最优值所在的位置在实际中无法实现,因此 IL 并不是随采样点数的增加而一直降低,需要结合实际情况而定。

表 1 计算结果

Table 1 Calculation results

Parameter	Number of sampling points		
	3	4	5
L_{MDL}/dB	0.03	0.04	0.05
L_{IL}/dB	1.90	1.56	2.20

4 结 论

引入矩阵条件数的概念,并将其作为全光 MIMO 信号处理中的光采样耦合器的优化目标,得到了最优的采样光斑大小和位置。当采样点数为 3 时,IL 为 1.90 dB;当采样点数为 4 时,IL 由 1.90 dB 降低至 1.56 dB。研究发现,受光纤尺寸的限制,采样点数的增加使采样光斑分布位置无法达到理论的最佳位置,并使得 IL 不会随采样点数的增加而一直降低。矩阵条件数的引入,验证了优化过程的正确性,表明采样点处于最佳位置时,该耦合器具有稳定性,即输入端的微小变化对于输出端的影响较小。

参 考 文 献

- [1] Essiambre R, Kramer G, Winzer P J, *et al.* Capacity limits of optical fiber networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(4): 662-701.
- [2] Le Yansi, Wang Zhi, Li Qiang, *et al.* Research of three mode fiber multiplexers and demultiplexers[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(6): 0606004.
乐燕思, 王 智, 李 强, 等. 光纤型三模式复用解复用器的研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0606004.
- [3] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, *et al.* Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[C]. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, 2011: PDPB10.
- [4] Doerr C R. Proposed architecture for MIMO optical demultiplexing using photonic integration[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(21): 1573-1575.
- [5] Fontaine N K, Doerr C R, Mestre M A, *et al.* Space-division multiplexing and all-optical MIMO demultiplexing using a photonic integrated circuit[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2012: PDP5B.1.
- [6] Bulow H. Optical-mode demultiplexing by optical MIMO filtering of spatial samples[J]. *IEEE Photonic Technology Letters*, 2012, 24(12): 1045-1047.
- [7] Winzer P J, Foschini G J. MIMO capacities and outage probabilities in spatially multiplexed optical transport systems[J].

Optics Express, 2011, 19(17): 16680-16696.

- [8] Ryf R, Fontaine N K, Essiambre R J. Spot-based mode couplers for mode-multiplexed transmission in few-mode fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(21): 1973-1976.
- [9] Blau M, Marom D M. Optimization of spatial aperture-sampled mode multiplexer for a three-mode fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(23): 2101-2104.
- [10] Taillaert D, Harold C, Borel P I, *et al.* A compact two-dimensional grating coupler used as a polarization splitter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(9): 1249-1251.
- [11] Miller D A B. Self-configuring universal linear optical component[J]. Photonics Research, 2013, 1(1): 1-15.