

多模光纤链路中多输入多输出技术的研究

王源泉 方武良 陶理 朱江波 迟楠

(复旦大学通信科学与工程系专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 200433)

摘要 随着波分复用(WDM)、偏振复用(PDM)和高阶调制等技术的使用,单模光纤的传输容量已经快速接近其香农极限。目前有望突破该极限的方法是空分复用(SDM),这使得多模光纤重新受到关注。基于多模光纤的多输入多输出(MIMO)技术是解决信息爆炸式增长的新领域。研究并比较了光 MIMO 系统的各种实现方式,其中重点介绍了模群分集复用(MGDM)技术;同时也阐述了相干多输入多输出系统(COMIMO)相应的内容。最后指出多模光纤 MIMO 系统中存在的问题,以期对以后的研究有所裨益。

关键词 光通信;多模光纤;多输入多输出;波分复用;正交频分复用;模群分集复用

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.100601

Research of Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Technique in Multimode Fiber Links

Wang Yuanquan Fang Wuliang Tao Li Zhu Jiangbo Chi Nan

(State Key Laboratory of Application Specific Integrated Circuit and System, Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract As the wide application of wavelength division multiplexing (WDM), polarization division multiplexing (PDM) and high-order modulation techniques, the transmission capacity over single mode fiber is rapidly reaching its Shannon limit. The only known way to overcome this limit is space-division multiplexing (SDM), which causes a significant resurgence of research interest in the multimode fibers. The multiple-input multiple-output (MIMO) technique based on multimode fiber is a new area to answer explosive growth demand for transmission capacity. Implementations of optical MIMO, coherent optical MIMO (COMIMO) systems and highlight mode group division multiplexing (MGDM) are studied and compared. Meanwhile, some problems existing in the multimode fiber MIMO system are discussed to provide a help for further research.

Key words optical communications; multimode fiber; multiple-input multiple-output; wavelength division multiplexing; orthogonal frequency division multiplexing; mode group division multiplexing

OCIS codes 060.2330; 040.0040; 250.0250

1 引言

多模光纤是最早用于数据传输的导波介质,相对于单模光纤,其对准容忍度高,数值孔径大,开销低,安装方便,容量理论上比单模光纤要大^[1]。特别是针对短距离传输高带宽需求的接入网,多模光纤占据着主导地位。但由于模间色散的影响,其距离带宽积受到严重限制,因此应用远不及单模光纤广泛。随着波分复用(WDM)、偏振复用(PDM)和多维多阶调制等技术的使用,单模光纤的传输容量已经快速地接近其香农极限^[2],目前有望突破这一极限的办法是空分复用(SDM),因此国内外对多模光纤开始进行初步探索,使其在接入网、光互连等领域发挥更大作用。

为了提高多模光纤的传输性能,降低系统成本,目前主要有以下两方面研究:1)系统中新型器件的研制给系统性能带来很大提升,比如垂直腔面发射激光器(VCSEL)及其模块的商用化大大降低了运行成本,多

收稿日期: 2011-04-11; 收到修改稿日期: 2011-05-16; 网络出版日期: 2011-08-06

基金项目: 国家 973 计划(2010CB328300)、国家自然科学基金(600837004, 60777010)、中国博士后基金(20090460593)、上海博士后自然科学基金(10R21411600)和上海市曙光学者基金资助课题。

作者简介: 王源泉(1990—),男,博士研究生,主要从事光纤通信系统方面的研究。E-mail: speedboy_yq@163.com

导师简介: 迟楠(1974—),女,教授,博士生导师,主要从事光通信系统方面的研究。E-mail: nanchi@fudan.edu.cn

芯多模光纤的使用增大了系统的传输容量^[3]; 2) 新的多模光纤通信技术可以用来提高系统的传输能力, 单输入单输出(SISO)系统中, 先进的均衡技术^[4]可支持更高的传输速率, 多输入多输出(MIMO)系统中可以采用的实现方式有选择模式激发技术^[5]、WDM^[6]、副载波复用/正交频分复用(OFDM)^[7]、角度/模式复用^[8]等, 这些复用方式都是基于传输自由度的去耦。MIMO链路的传输容量理论上与发射机/接收机的最小数目呈线性增长关系, 这使得其有望成为突破带宽瓶颈的一种很有前景的方法^[9]。

MIMO技术在无线通信中已经获得深入研究, 利用多发射和多接收天线来获得显著的复用和阵列增益。它可以在有限的频谱资源、不增加发射功率的前提下, 以较小的系统复杂度换来性能的大幅提升。多模光纤中的多模传输和模间耦合类似于无线通信中的多径和散射环境, 因此可以把MIMO技术引入到多模光纤中。同样, 基于多模光纤的MIMO链路也包含多个发射机和多个接收机, 在接收端还有电信号处理单元。与早期多模光纤分集技术不同的是传输通道之间不要求保持物理去耦, 这可以由接收端电信号处理单元来实现非相关, 给MIMO技术的实现提供了很大的可操作性。

2 MIMO实现方式

2.1 波分复用

波分复用技术通过增加并行传输波长的数量来增加系统的容量, 目前密集波分复用(DWDM)技术已经成为长距离、高速率、大容量光通信系统的主流技术, 而且只需在发射端和接收端分别增加复用和解复用器, 并对链路做一定的改造, 就可以轻松实现系统的升级。为了满足局域网爆炸式信息增长需求, 引入WDM技术是个不错的选择。文献[10]中利用自适应光学和DWDM基于多模光纤的实验系统实现了 10×10 Gb/s 无线电中继传输 2.2 km, 但是DWDM的成本阻碍了它在接入网中进一步的应用。为了解决这个问题, 稀疏波分复用(CWDM)技术应运而生。CWDM技术以比DWDM宽得多的波长间隔进行波分复用, 从而对激光器和复用解复用器的要求都降低了不少。基于多模光纤波分复用系统的收发机的设计以及光纤布拉格光栅在此系统中的应用分别在文献[11]、[12]中有所研究。为了克服模间色散的影响, 此系统中广泛使用的是中心注入技术^[13,14], 可以限制高阶模式的激发, 从而减小模间时延。一种基于中心注入的多模光纤WDM系统实验框图如图1所示^[13]。

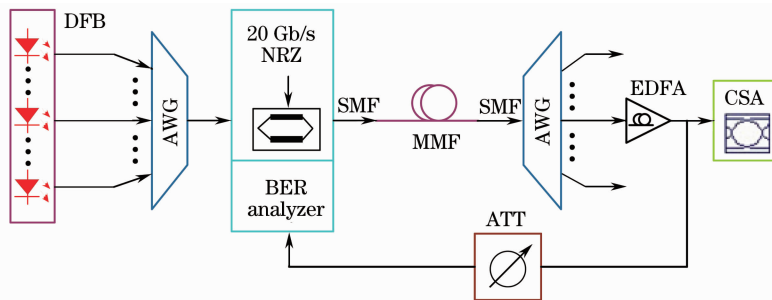


图1 波分复用传输系统框图

Fig.1 Block diagram of the WDM transmission system

系统中采用窄线宽分布反馈(DFB)激光器和单模光纤中心注入激发有限模式的方法来减少色散。图1中发射机由10个波长可调的窄线宽DFB激光器组成, 波长范围为 $1540.56 \sim 1554.96$ nm, 波长间隔为 1.6 nm, 用商用的40通道波长阵列光栅耦合和解耦。20 Gb/s的非归零(NRZ)信号分别加载到这10路波长信道中实现200 Gb/s的传输。经过调制后由单模光纤中心注入激发多模光纤的低阶模式, 再用单模光纤把传输后的低阶模式耦合出来。测试和观察工具为误码率(BER)分析仪和信号分析仪。采用这种系统可以获得的容量为 $1 \text{ Tb}/(\text{s} \cdot \text{km})$ 。

2.2 正交频分复用

除了上述的波分复用技术之外, OFDM技术也常用于多模光纤MIMO系统中。OFDM是一种特殊的多载波复用技术, 其基本原理是将高速传输的信号转化成多路低速的数据流, 并加载到正交的副载波上分别经过调制后发送出去。与传统的频分复用技术相比, 其子载波的频谱可以相互重叠, 这样不但可以减小载

波间串扰,消除多径传输带来的码间干扰,还可以提高系统频谱的利用率,这些优点在无线通信中已经得到证实并获得广泛应用。把 OFDM 引入到多模光纤通信系统中,利用多模光纤的高通特性来传输,色散补偿方便^[15],针对深度频率选择性衰落的问题,可以用自适应调制技术来解决。根据探测技术可以把光 OFDM 分成直接探测(DDO-OFDM)和相干探测(CO-OFDM),在偏振色散容忍度、频谱效率和对光信噪比的要求上,CO-OFDM 的性能更胜一筹,是长距离传输链路中新兴的一种很有潜力的技术,但是发射机和接收机实现复杂、造价高昂;系统相对简单的 DDO-OFDM 有望用在短距离接入网中,其调制解调原理框图如图 2 所示。

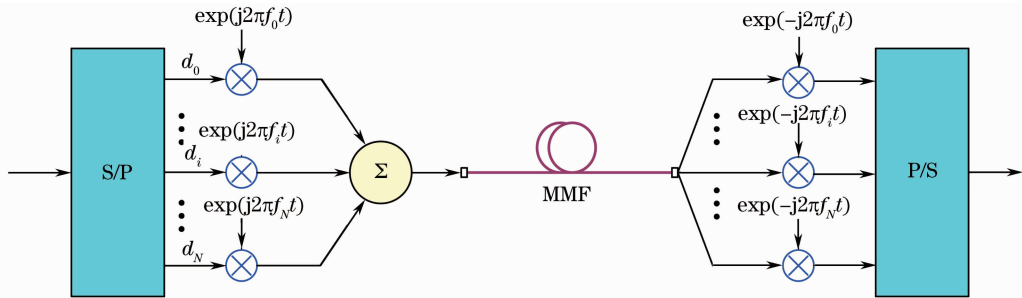


图 2 多模光纤 OFDM 系统框图

Fig. 2 Conceptual diagram for an optical OFDM system

OFDM 信号可以表示成

$$s(t) = \sum_{i=0}^N s_i(t) = \sum_{i=0}^N d_i(t) \exp(j2\pi f_i t), \quad (1)$$

式中 $s_i(t)$ 表示第 i 个子载波, $d_i(t)$ 是第 i 个子载波上的信号, f_i 是第 i 个子载波的频率。第 m 个子载波和第 n 个子载波的正交性可以用 δ_{mn} 表示, 其具体表达式如下^[15]

$$\delta_{mn} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s_m s_n^* dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \exp[j2\pi(f_m - f_n)t] dt = \exp[j\pi(f_m - f_n)T_s] \frac{\sin[\pi(f_m - f_n)T_s]}{\pi(f_m - f_n)T_s}, \quad (2)$$

为了在整个符号周期内保持正交性即 $m \neq n$ 时 $\delta_{mn} = 0$, 子载波频率间应满足

$$f_m - f_n = k \frac{1}{T_s}, \quad (3)$$

其调制和解调可以通过快速傅里叶变换(FFT)和快速傅里叶逆变换(IFFT)来实现,这是在时域的高速信号处理。文献[16]中也提出了一种用时间透镜直接在光域实现傅里叶变换和逆变换的方法,利用了光域固有的高带宽,其性能和 FFT 相当。把 OFDM 引入多模光纤中的尝试起步不久,但是传输速率和容量的提升、发送方式的改进、补偿方法的创新都取得了一定的进展,色散和非线性效应也都有所研究,加之目前数字信号处理(DSP)技术的发展,多模光纤中的 OFDM 技术的应用前景越来越广阔。

2.3 模式/模群分集复用

波分复用技术和正交频分复用技术在多模光纤中取得了一定的进展,但是都没有充分利用多模光纤的带宽资源,采用的方式也是尽量避免多模光纤中多个模式的产生或进行色散补偿。多模光纤的多个模式和模间耦合与无线通信中的多径和散射效应类似,因此也可以把用在无线通信中改善多径效应的 MIMO 技术引入到多模光纤中。多个模式在空间上的特性增加了系统的空间自由度,这种 MIMO 技术利用多模光纤中的模间色散而不是单纯避免它,既减轻了模间色散带来的影响又增加了系统的传输容量。文献[8]中首次提出了利用多模光纤模间色散进行传输的方案,之后引起了广大科研人员的兴趣,对这种技术进行了深入的探讨和实验验证。截至目前,基于多模或少模光纤的 2×2 ^[17]、 3×3 ^[18]、 4×4 ^[19] 和 6×6 MIMO 系统^[20] 都已得到实验证实,并取得良好传输性能。

其原理框图如图 3 所示^[8],在发射端 N 个独立的比特流用相同的射频(RF)调制,用产生的信号再去调制 N 个激光器,然后耦合到多模光纤中;在接收端,分束器将光功率分配到 M 个探测器上,通过直接探测的方式把光信号转化成电信号,经过 RF 解调并送入 MIMO 信号处理电路后即可恢复初始的 N 路信号。值得注意的是虽然对 RF 的调制格式不做要求,但是必须保证 N 路信号上的 RF 调制格式一致,以确保每路时钟同步。

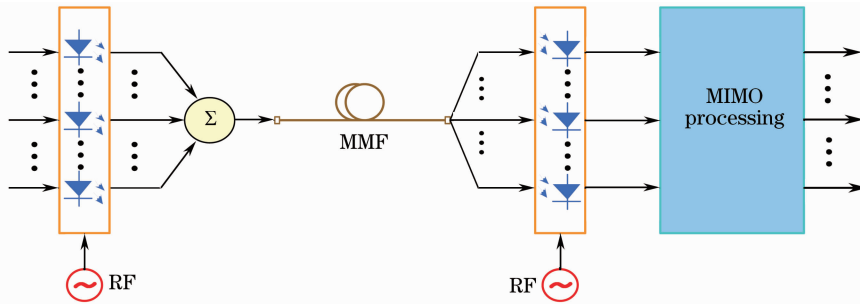


图 3 多模光纤 MIMO 系统框图

Fig. 3 General outline for the MIMO system based on MMF

实现这种技术常见的方法有模式复用和模群分集复用(MGDM)^[17]：多模光纤中的模式可以用正交的函数来表示，通过在不同模式上加载不同的信号并在接收端把不同模式分别耦合出来探测达到并行传输的方式称为模式复用；模群分集复用是通过激发正交的模群并在接收端解复用实现多输入多输出传输。目前实现模式/模群分集复用常见的方式有以下几种。

2.3.1 不同角度入射，倾斜布拉格光栅探测

多模光纤中传输的模式跟模式传播常数有关，也就是和入射角有关，以不同角度入射可以激发不同的模式，这样可以达到信道的复用。如果把多路数据分别调制后以不同入射角耦合进光纤从而实现多路信号的并行传输，在输出端检测不同模式的功率即可把初始数据恢复出来。文献[21]中提出了一种用倾斜光纤布拉格光栅测量不同模式功率的方法。

倾斜光纤布拉格光栅可以使前向传输的模式变成辐射模耦合出光纤。这些模式需要满足的相位条件如下

$$\beta_m + \frac{2\pi n_{\text{clad}} \sin \varphi_m}{\lambda} = \frac{2\pi \cos \theta_g}{\Delta_g}, \quad (4)$$

式中 β_m 是 m 阶导模的传播常数， n_{clad} 是光纤包层折射率， φ_m 是 m 阶导模的辐射角度， θ_g 是光纤光栅的倾斜角， Δ_g 是光栅的周期。根据(4)式，不同传播常数的模式如角度适当就可以耦合到辐射模，辐射出的功率和导模的功率成比例，如果比例系数给出，就可以测出导模功率分布，从而实现解复用。但是多模光纤的简并模式中简并模式的传播常量非常接近，对应的辐射光线的辐射角近似于连续而无法分离。而不同阶简并模式的传播常量相差较大，对应的辐射光线在空间分离。

2.3.2 全息技术

前面的方法利用角度耦合，在发射端耦合进多模光纤和在接收端解复用来误差比较大，处理麻烦。利用全息技术实现多模光纤 MIMO 系统中并行信道的复用和解复用在相关文献中有所研究^[22]。该方式利用了计算机生成全息图和光学相关器来实现。计算机生成全息图技术能实现期望的各种入射条件，这样可以使每个信道都有其独特的入射状况，可以用 $h(x, y)$ 来表示，从而能利用光纤中不同的模式进行传输。在光纤的接收端面有不同的强度分布，利用光相关器处理强度的空间外形函数 $r(x, y)$ 进行处理。当 $r(x, y)$ 和滤波器设定好的传输函数 $F(u, v)$ 匹配时，相关器会产生一个强峰值 $a(x, y) = f(x, y) \otimes r(x, y)$ ，从而实现信道的解复用而不需要任何复杂的电处理。

2.3.3 偏心激励，空间探测

偏心激励是在实验当中广泛使用的一种方式，在文献[18]、[23]的实验中都是采用这种方法。其基本原理是：在中心入射一般低阶模得到较强激励，高阶模激励较弱；偏心入射高阶模的激励较强；偏置不同的距离，激励出的模式不同，其在光纤末端面的空间分布也不同。文献[24]中对偏心激励的光功率分布做了较为详细的说明。不同模式在多模光纤中的传输区域不同，一般低阶模在中心区域传输，高阶模在外层区域传输。图 4 是其原理示意图，根据不同模群在光纤输出端面分布位置不同，可以利用空间探测器或多段探测器(MSD)进行探测，从而达到模式分集复用的效果。这种方法比前一种方法实现起来更为简单，但是在接收端探测误差较大，需要比较复杂的算法。

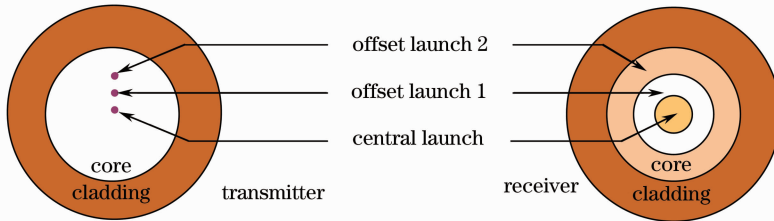


图4 不同偏心距入射输出端光纤端面的分布

Fig. 4 Output distributions of different distances offset launch

2.3.4 三种实现方法的比较

理论上以上3种方法都可行,虽然通过了实验的验证,但是它们的应用都有一定的局限性,下面对它们的优缺点做一个简单的比较。

第1种方法原理很简单,理论上也充分利用了多模光纤的带宽资源,但是可操作性很差。在发射端,激光器发出的激光有一定的发散角,而且不同角度入射的光会激发别的模式;在接收端,倾斜布拉格光栅分离不同的模式系统比较复杂,能分离的模式数不多。结合这两方面的原因,这种方法已经几乎被摒弃。

第2种方法优点是完全在光域内实现而不需要光-电-光转换,这给系统的稳健性提供了保证,而且利用全息技术实现模式的选择很精确;不过计算机生成全息图技术和相关器的利用给系统带来了很大的复杂性,可操作性不强。

第3种方法偏心注入空间探测简单、可操作性强,对设备的要求不是特别高,花费较小;但是必须结合复杂的算法,这给实时传输带来很大阻碍,而且偏置间隔不能太小,目前最多有3路光同时注入,进一步增加很困难。

2.4 相干光 MIMO

MGDM技术的核心思想是利用模间色散而不是避免它。在上面的系统中,为了确保MIMO处理中足够的模式分集,对多模光纤的最短长度和副载波的最小频率都有要求。这在一定程度上限制了它的使用,基于此有人提出了相干光MIMO技术。通过射频副载波和光载波的频率比的调整可以减小所需多模光纤的最短长度或者最小频率。相干光MIMO技术的另外一个优势是可以通过DSP实现,DSP的使用会大大改善系统的性能^[9]。

相干光MIMO系统如图5所示,其发射和接收都是相干的。激光器输出光束被分配到多个并行链路,各路经过调制之后耦合到多模光纤中进行传输。在接收端,利用本地激光振荡器进行相干解调。耦合到多模光纤的每个输入的模场功率稍有不同,注入条件、耦合、分离等过程会导致接收机接收到的是所有发射机不同模式功率分布的信号^[25]。用于相干解调的本地激光振荡器是由原始窄带宽激光器驱动,为了确保相位和频率相同,也可以采用锁相环。相干解调后产生的信号送入MIMO信号处理电路中离线处理。

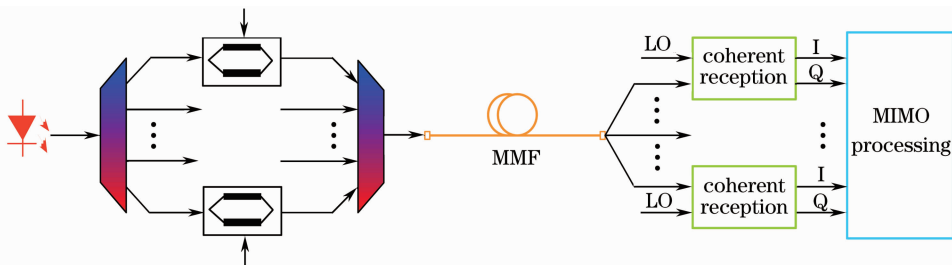


图5 相干光 MIMO 系统框图

Fig. 5 Coherent optical MIMO link

3 结 论

除了上述4种常用的实现方式之外,还有多输入单输出(MISO),相干传输直接探测MIMO技术,此外带有判决反馈(DFE)和光均衡的MIMO系统也经常在文献中出现。这些方式都可以增大系统的容量,改善

传输性能,同时也各自存在着一些缺点限制了其广泛应用。波分复用技术能很好地提升系统的容量,升级比较方便,但是对色散的容忍度较低,目前还只能使用窄线宽激光器,造价比较昂贵;光正交频分复用技术频谱利用率高,能减小色度色散和偏振模色散,但是信号峰均比高,对频率偏移也很敏感;模群分集复用技术可以丰富空间自由度,充分利用了多模光纤的带宽资源,可操作性比较强,但是信号的解复用需要复杂的算法;相干 MIMO 系统性能比前 3 种明显突出,但对光源要求太高,还必须保证信号光和本振光偏振方向相同,使得系统太过复杂。表 1 总结了它们的优缺点。

表 1 几种 MIMO 技术的性能比较

Table 1 Performance comparison of different MIMO techniques

MIMO realization	Transmission capacity	Cost	Upgrade ability	Process complexity	Dispersion influence	Spectral efficiency
WDM	Quite high	Relatively high	High	Simple	Strongest	Low
OFDM	Relatively high	High	Relatively high	Simple	Strong	High
MGDM	High	Low	High	Complexity	Weak	High
CO-MIMO	High	Quite high	Relatively high	Quite complexity	Weak	Highest

详细介绍了多模光纤 MIMO 系统,综述了多种实现方式并分析各自的优缺点。虽然这些技术引入到多模光纤中都历时不长,但使得光纤链路无论是传输容量的提升还是实现方式的多样化都得到了很大的发展,从而促进了多模光纤在接入网甚至骨干网的应用。这些技术都给多模光纤提供了不同的空间自由度,如果能把 WDM 技术和 MGDM 技术结合起来,或者把 OFDM 技术和 MGDM 结合起来,传输性能会进一步改善。

参 考 文 献

- 1 C. H. Kwok, D. G. Cunningham, I. H. White. Shannon capacity calculation on multimode fibres[J]. *IET Optoelectron.*, 2009, **3**(3): 149~157
- 2 R. J. Essiambre, G. Kramer, P. J. Winzer *et al.*. Capacity limits of optical fiber networks[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(4): 662~701
- 3 Benyuan Zhu, T. F. Taunay, M. F. Yan *et al.*. 70 Gb/s multicore multimode fiber transmissions for optical data links[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(22): 1647~1649
- 4 X. Zhao, F. S. Choa. Demonstration of 10 Gb/s transmissions over a 1.5-km-long multimode fiber using equalization techniques[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8): 1187~1189
- 5 L. Raddatz, I. H. White, D. G. Cunningham *et al.*. Influence of restricted mode excitation on bandwidth of multimode fiber links[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(4): 534~536
- 6 L. B. Aronson, B. E. Lemnoff, L. A. Buckman *et al.*. Low cost multimode WDM for local area networks up to 10 Gb/s [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(10): 1489~1491
- 7 L. Raddatz, I. H. White. Overcoming the modal bandwidth limitation of multimode fiber by using passband modulation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(2): 266~268
- 8 H. R. Stuart. Dispersive multiplexing in multimode optical fiber[J]. *Science*, 2000, **289**(5477): 281~283
- 9 A. Tarighat, R. C. J. Hsu, A. Shah *et al.*. Fundamentals and challenges of optical multiple-input multiple-output multimode fiber links[J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2007, **45**(5): 57~63
- 10 Rahul A. Panicker, J. P. Wilde, J. M. Kahn *et al.*. 10×10 Gb/s DWDM transmission through 2.2 km multimode fiber using adaptive optics[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(15): 1154~1156
- 11 P. S. Guilfoyle, K. M. Patel, M. T. Harris *et al.*. Multi-mode WDM transceiver[C]. IEEE Fiber-Optics and Photonics Technology Conference, 2008. 67~68
- 12 X. J. Gu, W. Mohammed, Y. W. Smith. Demonstration of all-fiber WDM for multimode fiber local area networks[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(1): 244~246
- 13 I. Gasulla, J. Capmany. 1 Tb/s · km multimode fiber link combining WDM transmission and low-linewidth lasers[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 8033~8038
- 14 Hwan Seok Chung, Sun Hyok Chang, Kwangjoon Kim. 6×86 Gb/s WDM transmission over 2 km multimode fiber using center launching technique and multi-level modulation[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(10): 8098~8102
- 15 W. Shieh, H. Bao, Y. Tang. Coherent optical OFDM: theory and design[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 841~859

- 16 Dong Yang, Shiva Kumar. Realization of optical OFDM using time lenses and its comparison with optical OFDM using FFT [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(20): 17214~17226
- 17 Stefan Sehölmann, Steven Soneff, Werner Rosenkranz. 10.7 Gb/s over 300 m GI-MMF using a 2×2 MIMO system based on mode group diversity multiplexing[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2007. OTuL2
- 18 S. Schölmann, N. Schrammar, W. Rosenkranz. Experimental realisation of 3×3 MIMO system with mode group diversity multiplexing limited by modal noise[C]. Proc. OSA Top. Meet. Optical Fiber Communication, 2008. JAW68
- 19 Marcin Kowalczyk, Jerzy Siuzdak. Four-channel incoherent MIMO transmission over 4.4 km MM fiber[J]. *Microw. Opt. Techn. Lett.*, 2011, **53**(3): 502~506
- 20 R. Ryf, S. Randel, A. H. Gnauck *et al.*. Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2011. PDPB10
- 21 Yang Chun, Wang Yong, Xu Changqing. Separate detection of degenerated mode group of multimode fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1459~1463
杨春, 王勇, 徐长青. 多模光纤中简并模式群的分别探测[J]. 光学学报, 2006, **26**(10): 1459~1463
- 22 P. L. Neo, T. D. Wilkinson. Holographic implementation of optical multiple-inputs, multiple-outputs (MIMO) on a multimode fiber[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2006. CMNN2
- 23 Wang Jinfei, Hu Guijun, Qu Renhui *et al.*. Multimode fiber communication system based on mode group diversity multiplexing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1966~1969
王晋飞, 胡贵军, 曲仁慧等. 多模光纤模式群分集复用系统[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 1966~1969
- 24 Yang Chun, Bi Xiaofeng, Guan Zhiqiang. Optical power distribution in multimode polymer optical fiber under offset launching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1259~1264
杨春, 毕晓峰, 管志强. 偏心激励聚合物光纤横截面的光功率分布[J]. 光学学报, 2004, **24**(9): 1259~1264
- 25 Akhil R. Shah, Rick C. J. Hsu, Alireza Tarighat *et al.*. Coherent optical MIMO[C]. *SPIE*, 2005, **5814**: 121~127