

光码分多址通信技术研究

邱 昆, 张崇富, 安晓强

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室 成都 610054)

【摘要】介绍了光码分多址的技术原理。综述电子科技大学光纤通信重点实验室在波分复用/光码分多址混合网络、光正交码构造、码间干扰和双极性OCDMA系统等OCDMA通信技术方面所进行的研究工作和成果,最后指出了OCDMA系统的技术优势和面临的问题。

关键词 光码分多址; 码型构造; 码间干扰; 双极性码; 混合网络

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A

Study on Optical Code Division Multiple Access Communications Technology

Qiu Kun, Zhang Chongfu, An Xiaoqiang

(Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks UEST of China, Ministry of Education Chengdu 610054)

Abstract Optical Code Division Multiple Access (OCDMA) Communications Technology is introduced in detail. The research results of the achievement of Wavelength Division Multiple Access/Optical Code Division Multiple Access (WDM/OCDMA) hybrid networks, construction for OOCs, multiple access interference(MAI) and bipolar OCDMA system studied. Finally, some predominances and key techniques are proposed.

Key words optical code division multiple access; construction for code; multiple access interference; bipolar code; hybrid networks

光纤通信技术在近年得到了长足的发展,为了更进一步的提高光纤利用率,挖掘出更大的带宽资源,提出了许多光域上的复用技术,如波分复用(WDM)、光时分复用(OTDM)、光码分复用(OCDM)、光频分复用(OFDM)和副载波复用(SCM)等,其中前三种复用技术最具潜力。

光码分多址(OCDMA)是将CDMA技术与光纤通信技术相结合的一种新技术,如果结合两种通信方式的特点,则具有很强的技术优势和广阔的应用前景。1978年,E Marom 等人提出了在光处理中采用光纤延迟线技术,为OCDMA技术的发展从理论和实验上奠定了基础^[1]。近年来OCDMA技术也得到了很大的突破和创新,在理论和实验上也取得了长足的发展。本文介绍OCDMA通信技术的基本原理,阐述OCDMA通信技术方面进行的研究工作和成果,最后指出OCDMA通信的技术优势和面临的问题。

收稿日期:2004-07-08

基金项目:国家863计划资助项目(2001AA122071)

作者简介:邱 昆(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信理论与技术的研究。

1 OCDMA通信技术

1.1 OCDMA系统结构

OCDMA系统一般考虑为无源星形结构,在此结构中,星形耦合器是网络中心,每个用户通过光纤或光无线媒质与之相连,OCDMA通信技术分为光有线CDMA技术和光无线CDMA技术,光有线CDMA系统中光传输信道为光纤媒质,光无线CDMA系统中传输媒质为微波或激光光线,通过微波或激光实现信号的传输,光无线CDMA系统根据传输信道可以分为自由空间、室内无线和大气无线光CDMA系统,光无线CDMA系统特别适合应用到局域网、军事网或移动网络中。

图1给出了OCDMA通信系统原理框图,系统中有 N 对发送和接收用户,每个用户具有不同的地址码,系统发射端采用超短光脉冲(皮秒量级)对用户信息数据进行处理,经过编码器给处理后的信息数据附上光正交码字(单极性码或双极性码),形成光脉冲序列,光脉冲序列通过光传输信道传输,再通过星型耦合器耦合到光传输网,光传输网把用户信息广播给每个用户,接收端由光解码器进行解码(编码器和解码器的原理、结构相同),经检测器、阈值判决器后用户便能提取到有用信息数据。

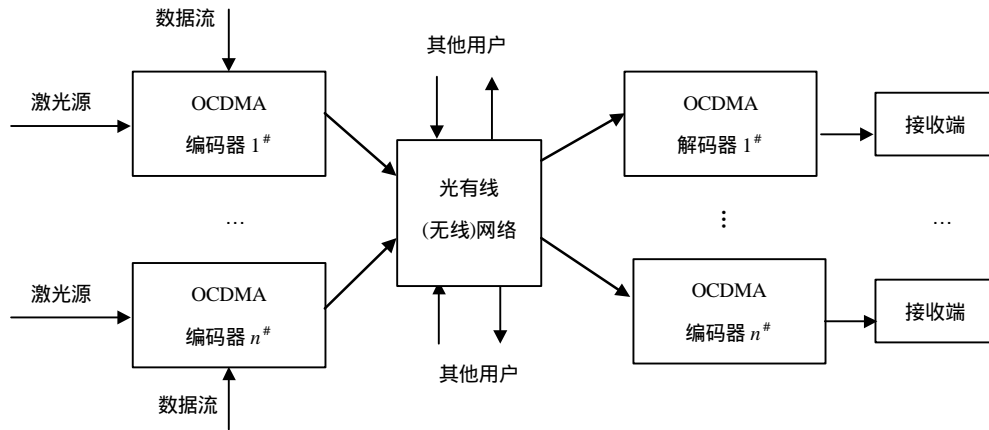


图1 OCDMA通信系统原理框图

波分复用/光码分复用(WDM/OCDMA)混合网络模型如图2所示,它分析了网络带宽分配、码字转换、码分配方案和WDM/OCDMA混合网络构架;研究了OCDMA和WDM/OCDMA网络性能,导出网络误码率公式;针对加性白色高斯噪声信道模型,将信息论应用到网络系统性能的分析上,得到网络的吞吐量公式。研究表明:WDM/OCDMA混合网络较单纯OCDMA网络具有容量大,网络扩展容易、方便等优点。

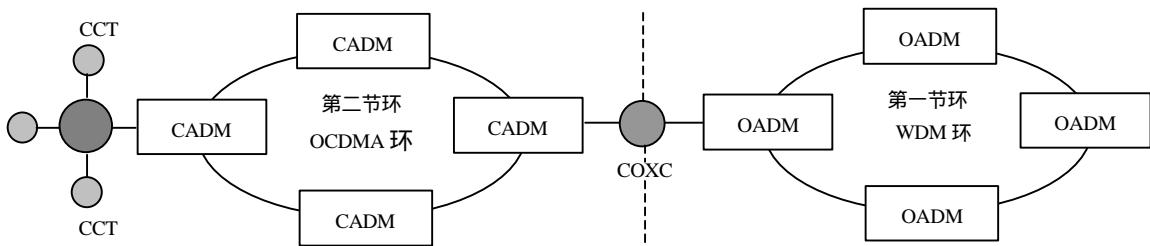


图2 WDM/OCDMA网络结构

1.2 OCDMA系统的地址码

1.2.1 光正交码基本问题

OCDMA技术是在光域中对信号进行处理,所以不存在负的物理量,导致光信号处理中只能采用非负值域(0、1),这与电域CDMA技术中能采用的双极码(-1、1)有本质的区别。在电CDMA技术中采用的扩频码,如Gold码、Walsh码和 m 序列等,具有很好的自、互相关性,而在单极性码中互相关值并不能保证为零。因

此,在OCDMA技术中设计好的地址码成为关键技术之一。

地址码 $F(v, k, I_a, I_c)$ 的性能是用码长、码重、 I_a 、 I_c 和码字个数来衡量,尤其是后三者,在同样码长和码重情况下, I_a 、 I_c 越小,解码时自相关旁瓣干扰和多用户干扰就越小,系统误码率也越低,系统通信容量就越大,这是OCDMA能否同WDM竞争的关键,还需要考虑其对应的光编码器结构复杂程度。目前研究较多的有光正交码及其变种码、素数码及其变种码、唯一叠和码、混合码和用于空间光通信的空间结构码等。

地址码设计不仅要自相关和互相关性能好,还要考虑与光解码器输出自相关峰值位置相邻码片处的峰值也要尽量小,这对地址码的设计提出了更高要求。光正交码必须表现出良好的相关特性,其光正交码自、互相关特性表示为^[2]

$$\mathbf{q}_{xx}(t) = \sum_{i=0}^{l-1} x_i x_{i \oplus t} \begin{cases} = k & t=0 \\ I_a & 1 \leq t \leq l-1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\mathbf{q}_{xy}(t) = \sum_{i=0}^{l-1} x_i y_{i \oplus t} \begin{cases} I_c & t=0 \\ 0 & 1 \leq t \leq l-1 \end{cases} \quad (2)$$

光正交码 C 容量定义为光正交码包含的码字数,用 $|C|$ 表示。如果给定 v, k, I_a, I_c ,那么最大可能的码字为 $F(v, k, I_a, I_c)$,假定 $I = \max\{I_a, I_c\}$,则有Johnson限为

$$F(v, k, I) = \frac{(v-1)(v-2)\cdots(v-I)}{k(k-1)\cdots(k-I)} \quad (3)$$

由等重码的Johnson界知,如果光正交码 $F(v, k, I_a, I_c)$ 含有 $\lfloor (v-1)/[k(k-1)] \rfloor$ 码字,则称为最佳光正交码。

1.2.2 光正交码与循环差集族

光正交码构造与组合设计有着紧密联系^[3],特别是一个最佳光正交码 $(v, k, 1)$ 等价于一个最佳循环差集族 $CDF(v, k, 1)$ 。一个循环差集族 $CDF(v, k, 1)$,可以定义为模 v 的剩余类环 Z_v 上的一族 k 元子集(称为基区组) $B = \{B_1, B_2, \dots, B_t\}$,使得模 v 的每一个非零剩余整数在由集合 B 产生的所有差中至多出现一次,很明显,基区组个数 t 满足 $t \lfloor (v-1)/[k(k-1)] \rfloor$ 。当 $t = \lfloor (v-1)/[k(k-1)] \rfloor$ 时,称 $CDF(v, k, 1)$ 是一个最佳循环差集族。

光正交码是一个二元 $(0, 1)$ 序列族,一般码重量 k 要比码长度 v 小得多,用集合理论可以更简单地表示光正交码,此时,一个 $(v, k, 1)$ 光正交码可以看作是一族模 v 剩余整数集合上的 k 元子集,每个 k 元子集对应于一个码字,而 k 元子集中的元素表示码字中“1”的位置序号。一个最佳 $(v, k, 1)$ 光正交码确定了一个最佳循环差集族 $CDF(v, k, 1)$,而一个最佳 $CDF(v, k, 1)$ 同样可确定一个最佳 $(v, k, 1)$ 光正交码,从组合设计的观点来看,两者是等价的。

1.2.3 光正交码构造

光正交码研究主要集中在3个方面:1)码字个数理论界(上界、下界)问题;2)光正交码构造方法问题;3)特定长度和重量光正交码存在性问题。F R K Chuang 等人在码字个数理论界方面做了大量的研究工作,并取得了许多非常重要的结果^[2-4]。F H Ryoh, J X Yin 等人阐述了光正交码与组合设计间的关系^[5]。文献^[6]在码字构造问题作了研究,取得了具有较高参考价值的结果。码存在性问题而言,Bose, Buratti等人在这方面做了大量的研究工作,并用组合设计和初等数论的相关理论,证明了码长满足特定条件的光正交码是存在的^[7],但是,他们并未给出这些光正交码的具体构造方法。

作者对光正交码构造方法展开了深入的研究,基于F H Ryoh等人的思想,将光正交码的构造问题转化为循环差集族的构造问题,以有限域和初等数论的基本理论为基础,在此基础上,提出几种最佳光正交码的构造算法,通过计算机编程实现这些算法,搜索得到了一些最佳 $(v, k, 1)$ 光正交码。

1)提出了一种构造循环差集算法,采用我们提出的循环差集算法得到的数据,结合传统递归方法,可得到 $(v, k, 1)$ 光正交码,该光正交码具有较好的相关特性^[8]。2)光正交码的构造与组合设计有着紧密的联系。特别地,一个最佳 $(v, k, 1)$ 光正交码等价于一个最佳 $(v, k, 1)$ 循环差集族。本文的基本思想是将光正交码的构造问题转换为循环差集族的构造,基于有限域和初等数论的基本理论,对差集族的基本概念和特性进行了分析和研究,在此基础上,借助计算机辅助设计,构造出了一些最佳 $(v, k, 1)$ 循环差集族,从而得到了一些最佳 $(v, k, 1)$ 光正交码^[9]。3)在构造方法2)的基础上,对循环差集所有的基区组生成元作了改变,通过计算机可以搜索到满足特定约束条件的生成元集,采用这种算法可以得到一些新的光正交码^[10]。

2 OCDMA技术中码间干扰

2.1 OCDMA码型设计

可以采用归零码(RZ)来减小相邻脉冲之间互相作用。在相同传信率条件下,采用RZ意味着需要更窄的光脉冲,在普通单模光纤中这将会导致更严重的色散现象。在不改变脉冲宽度的情况下使用RZ,这将意味着系统的传信率要下降。因此,这是一个需要折衷考虑的方案。参考光通信系统中克服色散的方案,可针对OCDMA系统的光脉冲展宽设计出线路码。跳频扩时OCDMA系统中近年来提出了二维跳频扩时码组,在时间和波长上选择各自的伪随机地址码,通过两者适当组合,达到码组优化,组合后跳频扩时码保留了原有码组优点。光信号在时间上的单极特性,优化的码组互相关峰值可满足小于等于“1”,自相关峰值达到码重值,自相关旁瓣值可以达到“0”。为克服一维码组稀疏缺点,在时间上对伪随机地址码应尽量选取码长和码重之比较小地址码。素数码产生比较简单,每个素数码可以通过分割为 p 个等长度子序列、每个序列中仅包含一个脉冲被扩展,扩展后的素数码码长与码重之比为素数 p ,但扩展后的素数码不能应用于异步OCDMA系统,可通过在波长码组选择上来克服MAI。波长码组选择上,应选取同一码字中没有相同波长的码组,以达到码字互相关峰值尽量小,理论上采用二维码组的OCDMA系统性能要远远优于其他一维码组的OCDMA系统,如系统可用码字数量大大增加,码字长度减小,在同样码长条件下系统能承载用户大大增加,在光限幅器作用下,系统性能得到了显著提高,是目前最有可能实现的OCDMA系统之一。与时域振幅编码OCDMA系统相比,跳频扩时系统最大特点在同一个用户分配了不同波长资源而不是一个用户占用一个波长或者波段。在实际应用中,近年来基于光纤光栅编解码器的跳频扩时系统实验研究受到了较多的关注,尽管还需实践的进一步验证和发展,但广阔的应用前景和技术进步已经明确了OCDMA系统的这一发展方向。

2.2 改善OCDMA系统结构

光限幅器可以消去超过限幅器阈值光脉冲能量^[12],以减小了系统中存在的干扰信号,由色散导致相邻光脉冲影响也会部分消除,提高系统性能^[13]。采用光硬限幅器会导致对光功率利用率降低,如何提高对光功率利用而更好应用光硬限幅器是突破OCDMA技术关键之一。近年来有学者提出了可调阈值硬限幅器,系统具有两个分支,一个分支通过光探测器和积分器来确定突发用户数量,根据用户数来设置另一个分支的可调阈值。采用硬限幅器OCDMA系统应考虑重新设计光限幅器,以提高其性能,它不仅是阈值器件,还是再生和整形器件。

2.3 多用户检测技术

多用户检测技术更能充分利用光信号能量,减小多用户干扰(MAI)。多用户检测技术分为:适合单极性码非相关匹配滤波器探测技术(MFD);零差相关探测(HCD);自零差相关检测(Self-HCD)等。多阶段接收器、优化接收器、本地搜索接收器和干扰抑制接收器等是多用户检测中关键器件是研究热点技术。多用户检测是充分利用系统中所有用户或系统用户子集相关信息,如光地址码序列,信号强度,延迟等,对接收信号进行信号恢复,这就比单用户检测接收机有着较大程度改善。然而,多用户检测依赖于对系统中其他用户解码信息掌握,从而降低了系统灵活性。

2.4 色散管理技术

色散管理技术成功应用在WDM技术中为如何应用到OCDMA技术中提供了技术支持。二阶色散导致光脉冲展宽是OCDMA系统性能下降主要原因^[13]。与采用普通单模光纤相比,采用色散位移光纤系统误码率性能提高,接近于理想情况,这种情况下,光脉冲展宽减小,相邻码片间相互作用也减小。除直接在网络中采用色散位移光纤外,普通单模光纤搭配色散补偿光纤也是消除色散影响方法之一。色散位移光纤或单模光纤搭配色散补偿光纤的方案是提高系统性能常用方法之一^[15]。如何实现对不同编码方式OCDMA系统的色散补偿是OCDMA技术走向实用化要解决的一个关键技术。

3 双极性OCDMA技术

双极性OCDMA技术是解决系统容量和系统性能的备选方案之一。编解码器是实现双极性OCDMA系统技术和相干探测关键器件^[15], 编码器由色散光栅(DG)、共焦透镜(FL)和液晶调制器(LCM)构成。文献[15]详细研究了频域相位OCDMA系统中光功率、码位误差和码字特性等对系统性能的影响

文献[16]提出了基于频分信道双极性光码分多址通信的实现方案, 系统中采用了单极性码转换为双极性码的码字构造方法, 理论研究了系统性能。研究结果表明系统具有较高用户容量和较好相关性性能。

双极性OCDMA系统中码字的选择直接影响系统的性能, 常直接采用双极性码, 如Walsh、Gold等在电CDMA中广泛应用的码字, 但对系统光学要求很高, 结构复杂, 基于传统OCDMA系统研究了双极性码在OCDMA系统中的应用, 得到了一些重要的结果。在双极性系统的实现上也有采用双极性码与单极性码的转换思想^[16], 采用了补码原理实现双极性系统的实现, 码字转换分为变长和非变长方案。

4 OCDMA技术优势和面临的问题

4.1 OCDMA技术具有优势

1) OCDMA技术可以实现光信号直接复用与交换, 使传输速率可达Tb/s的数量级, 能动态的分配带宽资源, 扩展网络容易, 网络升级简单, 网管也简单, 很适合于实时、高突发、高速率和保密的通信业务。2) 通过给用户分配唯一码字实现多址, 可在无交换中心的情况下实现点到点、点到多点的通信方式, 且一个节点的故障不影响系统中其他的节点, 用户可随时的接入, 不需用户的同步, 时延也很小。3) 具有很高的保密性和可靠性, 在OCDMA系统中是采用每个用户分配唯一的地址码, 所有需获得用户信息就必须采用与发送方相匹配的地址码, 作相关解码, 而得到用户信息, 对于在不知道确切地址码的情况下是很难获得信息的。4) 光域里的信号处理简单, 没有像波分复用(WDM)那样对波长的严格控制, 也不需像光时分复用(OTDM)那样严格的时钟同步。在多用户随机接入同一个信道时, 不要求波长可调和稳定器件等, 一般对光源性能要求较低, 所有现也成熟的光通信系统的光源即可用于OCDMA系统, 大大的降低了系统的成本。5) 可以承载视频电话、视频电视、多媒体、数据和高清晰度图像等多种业务, 实现对传输速率的完全透明。OCDMA系统的拓扑结构灵活, 具有交叉连接能力, 可构成真正“透明”的全光通信网。

4.2 面临的问题

目前上述OCDMA技术优势并未完全体现出来。如地址码构造困难, 能提供可使用地址码字有限, 这样就谈不上保密性; 在较长码长和较短码重下, 对时域振幅编解码OCDMA系统而言, 则导致系统传输速率下降, 而码片速率高, 不能实现真正的“透明”等。作为一门新技术还面临着许多问题。

4.2.1 光正交码构造

构造出相关性好的光正交码是OCDMA技术应用于高速局域网重要技术保证。需要进一步解决的问题: 高自相关性、低互相关性, 优化光正交码的存在性问题, 多维光正交码构造算法, 大容量可用码字和适合梯形结构对称性等。

4.2.2 OCDMA技术中码间干扰

OCDMA系统中, 光信号具有宽谱、公用信道等特点, 由于光纤中色散和非线性效应可能使OCDMA系统产生码间干扰; 码字构造上也可能使系统产生码间干扰, 如自、互相关性不理想; 系统中探测器、阈值门限器等也可能使系统的信号产生误判断, 而使系统误码率恶化。在研究码间干扰机理后, 怎样去减少码间干扰, 如硬限幅器是否能把“硬”改为“软”; 传输信道怎样设计更为合理, 减少信道对传输信号本身和信号间畸变, 以减少码间干扰。此外还有多自由度与大带宽、时域和光学频率带宽范围的频谱透过率不平坦问题、可变带宽编码等问题。

4.2.3 双极性OCDMA系统

双极性系统吸引着许多学者, 也取得一些突破, 研究较多是如何实现双极性OCDMA技术, 但也面临着许多问题, 如用单极性码构造双极性码, 但码长变长, 就如何找到理想的适合双极性OCDMA系统的码字是关键; 在双极性系统中又怎样应用光信号去实现双极性传输, 由于双极性与光特性一对矛盾怎样解决; 编

解码器技术在双极性OCDMA技术中是关键,编解码器合理设计和编解码器制造工艺保证,即按理论设计编解码器如何实用化等。

4.2.4 其他问题

除了上述问题外,需要一个比较全面地涵盖OCDMA系统方案的理论体系,这将对OCDMA技术研究具有较大指导意义,减少对OCDMA技术研究局限性和盲目性;在系统性能方面,很多研究涉及了系统理论分析和系统仿真,但都在假定信道理想情况下进行的。在系统方案上,什么样的方案能很好应用并没定夺,也是OCDMA技术走向实用化的关键;在OCDMA网络方面,OCDMA与WDM、OTDM系统网络并不相互排斥,怎样把其融入另一种或另两种网络中去,也是值得研究的问题。

5 结束语

OCDMA技术从一提出来就受到了世界上许多学者的关注,也是未来极具发展潜力的一种通信技术,它符合未来信息时代的要求。OCDMA技术起步较晚,还处于实验室研究阶段,在理论和实验方面取到了一些突破与创新,但OCDMA技术要走向实际应用,还有很多问题,但OCDMA技术在未来的通信领域担起重要角色是毋庸置疑的。

参 考 文 献

- [1] Marom E. Optical delay line matched filters[J]. IEEE Transactions on,1978,25(6):360-364
- [2] Fan R K. Chung J A. Salehi. Optical orthogonal codes: design, analysis, and applications[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1998, 35(5): 595-604
- [3] Hall M. Combinatorial theory[M]. 2nd edition, New York: Wiley, 1986
- [4] 杨义先. 光正交码[J]. 电子学报, 1991, 19(1): 25-31
- [5] Ryoh Fujihara, Ying Miao. Optical orthogonal codes: their bounds and new optimal constructions[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2000, 46(11): 2 396-2 406
- [6] Ge Gennian, Yin Jianxing. Constructions for optimal $(v, 4, 1)$ optical orthogonal codes[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2001, 47(11): 2 998-3 004
- [7] Marco Buratti. Constructions of $(q, k, 1)$ difference families with q a prime power and $k=4,5$ [J]. Discrete Mathematics, 1995, (138): 169-175
- [8] An Xiaoqiang, Kun Qiu. Construction for optimal optical orthogonal codes[J]. IEEE 2002 International Conference on, 2002,29(1):96-100
- [9] An Xiaoqiang, Qiu Kun. A new construction for optimal optical orthogonal codes[J]. Journal of Optical Communications. 2003,24(1):17-21
- [10] 邱 昆, 安晓强. 一种最佳光正交码构造法[P]. 中国发明专利: 02134106.6
- [11] 左 超, 马文华, 林金桐. 色散和非线性效应对单极性光码分多址系统性能的影响[J]. 北京邮电大学学报, 2001, 24(2): 26-30
- [12] Ohtsuki T. Performance analysis of direct-detection optical asynchronous CDMA system with double optical hard-limiters[J]. J.Lightwave Technol.,1997,15(3):452-457
- [13] 张崇富, 邱 昆, 安晓强, 等. 色散和非线性效应对快跳频光码分多址性能影响的研究[J]. 高技术通讯, 2003,13(9):5-8
- [14] Chua C H, Abbou F M, Chuah H T, *et al.* Performance analysis on phase encoded OCDMA communication system in dispersive fiber medium[J]. IEEE PHOTONICS TECH. LETTERS. 2004,16(2):668-670
- [15] 张崇富, 邱 昆, 安晓强, 等. 频域相位编解码光码分多址系统性能的研究[J]. 电子科技大学学报, 2003,32(3):304-308
- [16] 张崇富, 邱 昆, 安晓强. 基于频分信道双极性光码分多址实现的研究[J]. 光子学报,2004,33(3):229-232
- [17] Dennis Tasshi, Young James F. Measurements of BER performance for bipolarencoding of an SFS[J]. IEEE Journal of Lightwave Technol.,1999,17(9):1 542-1 546
- [18] 安晓强, 邱 昆, 张崇富. 光纤码分多址通信技术[J]. 电子科技大学学报, 2003,32(3):251-255
- [19] Zhao Ch, Ma H W, Pu T H, *et al.* The impact of group velocity on frequency-hopping OCDMA system [J]. J. Lightwave Technol.,2001,19(10):1 416-1 419

编辑 徐安玉