

文章编号: 0253-2239(2006)09-1303-5

新型多速率光码分多址实现方案的研究*

王文睿 于晋龙 付晓梅 杨恩泽

(天津大学电子信息学院光纤通信实验室 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 提出了一种新颖的多速率光码分多址系统的实现方案,使得光码分多址系统能够同时传输不同速率的用户信号。对系统的误码性能进行了理论分析,并讨论了在系统中加入硬件限幅器以提高系统性能的可能性。以同时传输两种不同速率信号为例,将系统与变码长光码分多址系统的误码性能进行了仿真和比较。分析表明,随着速率的增加,虽然地址码字的性能有一定下降,但其整体性能仍优于变码长的多速率的光码分多址系统。最后,设计了相应的实验,验证了码字的性能和实现多速率光码分多址系统的可能性。

关键词: 光通信; 光码分多址; 多媒体通信; 光纤布拉格光栅

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Study on Scheme Realizing Novel Multi-Rate Optical Code-Division Multiple-Access System

Wang Wenrui Yu Jinlong Fu Xiaomei Yang Enze

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science Ministry of Education, School of Electronic Information, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: A novel scheme to realize multi-rate optical code-division multiple-access system (OCDMA) is proposed, with which the OCDMA system can transmit signals with different data rates and quality at the same time. The bits error ratio (BER) of the system is analyzed theoretically, and the probability to improve the performance by using the hardware-limit is evaluated. Taking a system with two different rate signals as an example, the BERs of the proposed scheme and the multi-rate multi-length OCDMA are simulated and compared. The results show that, with the rise of transmission rate, the former system obtained a better general performance than the latter, though there appears a slight decline for the performance of the address code words for it. Finally, relevant experiments are done to verify the performance of the code and the probability of multi-rate OCDMA.

Key words: optical communication; optical code-division multiple-access; multimedia communication; fiber Bragg grating

1 引 言

光码分多址(OCDMA)通信具有抗干扰性强、保密性好、充分利用光纤的带宽、容量极大、随机异步接入等优点,成为当前全光接入技术的研究热点。目前,用于实现光码分多址的编码方案有很多,如光正交码(OOC)^[1]、素数码(PC)^[2]等。但这些编码方案都假设各用户数据的速率是一致的。然而,未来的光接入网应当能够支持多媒体业务(资料、语音、视频等)。这样就要求光码分多址系统中能够同时传输不同速

率、不同误码率要求的信号。为此, Wing C. Kwong^[3,4]和 Guu-Chang Yang^[5]分别提出了变码长光码分多址码字和变码重光码分多址码字,但这两种编码方案都要求不同用户的信号速率之间是严格的整数倍关系,这就限制了它们的实际应用。

本文提出了一种新颖的同时传输不同速率信号的光码分多址系统的实现方案,而且突破了不同信号速率之间严格整数倍关系的限制。并设计了相应的实验验证了本方案。

* 天津自然科学基金(05YFJMJC09400)资助课题。

作者简介: 王文睿(1980~),男,浙江宁波人,天津大学电信学院硕士研究生,主要从事光纤通信技术的研究。

E-mail: wwr_blue@163.com

收稿日期: 2005-09-14; 收到修改稿日期: 2005-11-24

2 多速率光码分多址系统的实现方案

在光码分多址系统中,一般情况下,每个用户都分配到一个唯一的地址码字,这些地址码字之间满足一定的正交性要求。在通信过程中,每个用户根据目的地地址码字传送资料:源信号为“1”码时,传送一个完整的目的地地址码,源信号为“0”时则不传送任何信号。因此,地址码码字的速率实际上和源信号的速率是一致的。这样,当光码分多址系统要支持多媒体业务时,由于不同用户间源信号的速率是不同的,若依旧采用一般的编码方案,则对应地址码的码片之间的速率也不相同,从而不再满足正交性要求。

为了让地址码字之间仍旧满足正交性要求,目前有一种方法是让扩频后的码片周期一致,这样其实不同速率的信号采用的地址码字长度是不同的,也就是变码长光码分多址码字^[3]。

本文提出一种新的多速率光码分多址地址码编码方案:如果让地址码码字周期固定,设其周期为 t_c ,如图 1 所示,不同速率的信号就包含了不同周期个地址码元,不妨设两个不同速率分别为 v_1 和 v_2 的信号分别 n_1 和 n_2 个地址码元周期, $n_1 = 1/(v_1 t_c)$, $n_2 = 1/(v_2 t_c)$ 。

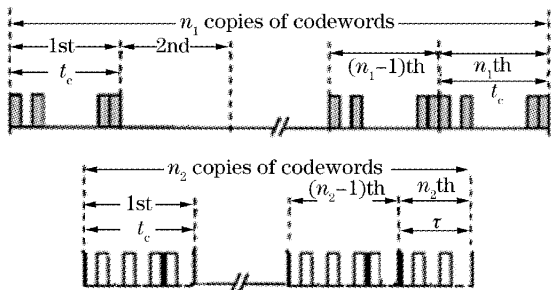


图 1 多速率光码分多址地址码字结构示意图

Fig.1 Structure of the multi-rate OCDMA code words

这样,虽然不同用户的源信号速率可能是不同的,但地址码字周期一致,所以地址码字可以采用各种常见的同速率光码分多址系统的地址码字,包括光正交码、素数码以及各种二维编码等。

3 性能分析

为简单起见,先讨论 n_1 和 n_2 都是整数时的情况。此时,如果将速率为 v_1 的用户信号中的“1”码用 n_1 个周期 t_c 的“1”码表示,而将速率为 v_2 的用户信号中的“1”码用 n_2 个周期 t_c 的“1”码表示,再分别用同速率光码分多址地址码字进行编码,得到的结果与不同速率光码分多址编码方案得到的结果一致。因此,原信号事实上可以视作两个速率均为 $1/t_c$ 的

信号用同速率光码分多址地址码字进行编码。

当 n_1 和 n_2 至少有一个不是整数时,码字之间的相关特性与具体选择的地址码字有关。但一个周期为 t 的信号中的“1”码可以用 $E(t/t_c)[E(\cdot)$ 为取整符号]个周期 t_c 的完整的“1”码和一个不完整的“1”码来表示。而一个不完整的地址码字对其他码字的干扰不超过一个完整的地址码字的干扰。所以,总的干扰不大于 $E(t/t_c) + 1$ 个周期的完整的地址码字造成的干扰。

相对地,对一个周期为 t 的信号的译码过程也可以看作两个步骤。首先,将编码码字看作周期为 t_c 的同速率光码分多址系统进行译码。译码后,每个信号周期内将会出现多个“1”码。然后,再按周期 t 进行积分运算,得到最后的解码信号。

假设在多速率光码分多址实现方案中选取的同速率光码分多址地址码字的互相关限为 1。常用的地址码字,包括一维码字中光正交码字(OOC)、光跳频码字,以及几乎所有的二维光码分多址地址码字^[6~8]都满足这个条件。在满足该假设的前提下,我们可以用文献[9]中采用误码分析方法由码字碰撞的概率来推导系统的误码特性。

忽略背景噪声和探测器噪声,只考虑多用户干扰的影响。此时,当且仅当总的多址干扰大于等于判决门限 Th 时,会产生误码。假设系统总共同容纳 N 个用户,每个用户传输“0”码和传输“1”码的概率相同。设选取的同速率光码分多址地址码字族中“1”码的碰撞概率为 q ,则同样可以认为,在多速率光码分多址系统中,“1”码的碰撞概率为 $[E(t/t_c) + 1]q$,由此,可以认为第一步译码后系统的误码概率为

$$PE_1 \leq \frac{1}{2} \sum_{i=Th}^{N-1} \binom{N-1}{i} (q')^i (1-q')^{N-1-i}, \quad (1)$$

其中 $q' = [E(t/t_c) + 1]q$ 。事实上这个误码率与一个信号周期为 t 的同速率光码分多址系统的误码率十分接近。

而第二步解码仍旧可以看作对第一步解码信号进行积分后的结果,其系统误码率可以表示为

$$PE_2 \leq \frac{1}{2} \sum_{i=ThE(t/t_c)}^{E(N-1)/t_c + 1} \binom{E[N-1]t/t_c + 1}{i} (q)^i (1-q)^{E(N-1)/t_c - i}, \quad (2)$$

为了进一步减小系统误码率,可以在第一步解码后加入了硬件限幅器,将大于阈值 Th 的解码结果限幅至为阈值,则系统误码率为

$$PE \leq \frac{1}{2} \left[\sum_{i=Th}^{N-1} \binom{N-1}{i} (q')^i (1-q')^{N-1-i} \right]^{E(t/t_c)}. \quad (3)$$

由于变码长光码分多址地址码字是在光正交码地址码的基础上生成的,为了便于进行性能比较,多速率光码分多址系统方案也以采用码长为 L ,码重心为 $\omega(L, \omega, 1)$ 的光正交码作为地址码字为例。此时,由(2)式、(3)式,可以推出基于光正交码的多速率光码分多址系统实现方案的误码概率,在不加硬件限幅器的情况下第二步解码后系统误码率为:

$$PE_2 \leq \frac{1}{2} \sum_{i=ThE(t/t_c)}^{E[(n-1)t/t_c]+1} \binom{E[(N-1)t/t_c]}{i} \left(\frac{\omega^2}{2L}\right)^i \left(1 - \frac{\omega^2}{2L}\right)^{E[(N-1)t/t_c]-i} \quad (4)$$

同样也可以通过加入硬件限幅器来进一步改善系统的误码特性,在加入硬件限幅器的情况下,则系统误码率为

$$PE \leq \frac{1}{2} \left[\sum_{i=Th}^{N-1} \binom{N-1}{i} \left(\frac{\omega^2}{2L}\right)^i \left(1 - \frac{\omega^2}{2L}\right)^{N-1-i} \right]^{E(t/t_c)} \quad (5)$$

其中

$$\omega' = \left[\frac{E(t/t_c) + 1}{2(t/t_c)} \right]^2 \frac{\omega^2}{2L}$$

图 2 给出了系统和变码长光码分多址系统误码率性能的一个比较。在讨论中,忽略了系统中各种随机噪声的影响,只考虑多址干扰引起的误码。以采用 {1201, 4} 的光正交码作为地址码,高速用户速率为低速用户速率为的两倍。而变码长光码分多址同样由 {1201, 4} 的光正交码扩展而成,码长分别为 2402 和 4804,这样变码长光码分多址系统中的高速用户速率也为低速用户的两倍。可以看出:无论高速用户还是低速用户。在不加硬件限幅器的情况下,所设计的多速率光码分多址系统性能略好于变码长光码分多址系统,当加入硬件限幅器,系统性能将进一步得到明显改善。而高速用户与低速用户相比,低速用户将得到更好的误码性能。

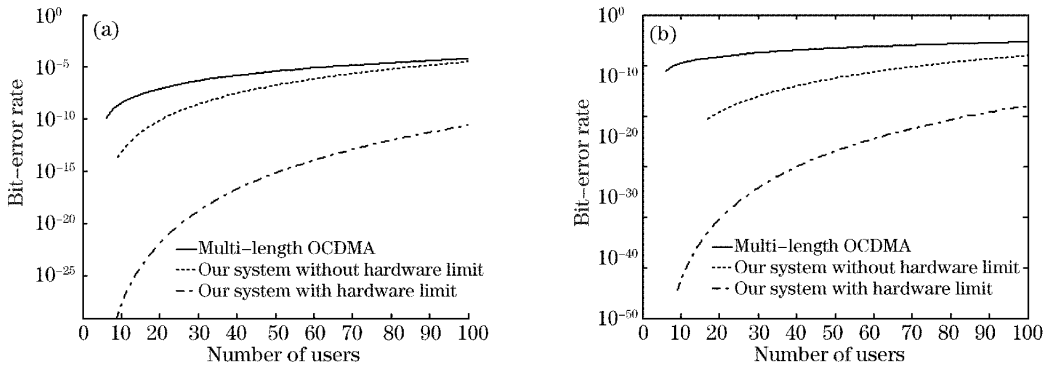


图 2 系统和变码长光码分多址系统误码率性能的比较。(a)高速用户,(b)低速用户
Fig. 2 Comparison of the system performance between our multi-rate OCDMA and multi-length OCDMA.
(a) Users with higher bit rate, (b) users with lower bit rate

4 系统实验

实验装置如图 3 所示,光源使用掺铒光纤放大器的自发辐射,首先由 Anritsu ME522A 误码分析仪提供的 500 MHz 时钟信号经 LiNbO₃ 调制器进行外调制,从而得到 500 MHz 的光时钟信号。时钟信号由 2×2 耦合器分配给两个 LiNbO₃ 调制器,两路信号分别由 62.5 Mb/s 和 30 Mb/s 伪随机码信号进行二次调制。然后分别经过环形器进入编码器,每个编码器由三个各级级联的布拉格光栅组成,进行素数调频编码,本文中,高速数据(62.5 Mb/s)的编码器采用反射波长分别为 1549.9 nm、1550.9 nm 和 1553.0 nm,谱宽为 0.3 nm 的光栅级联做编码器。另一路低速

(31.25 Mb/s)数据的编码器,采用三个反射波长分别为 1549.9 nm、1548.7 nm 和 1552.3 nm,谱宽 0.3 nm 的光栅级联做编码器。各个光纤布拉格光栅均为长 2 cm 的切趾光栅,级联光栅间由长 7 cm 的光纤相连。两路编码光栅有一个反射波长重合。反射信号由环形器输出,即为携带用户地址的编码后的信号。经过背对背传输,收端环型器 2 端连接的译码器结构与高速资料的编码器是共轭的。即地址码只与高速数据的编码器地址相同。环形器 3 端输出的译码后信号经过掺铒光纤放大器放大后,经由 P-N 结光电管(PIN)检测,通过一个低通滤波器恢复成初始的数据信号。

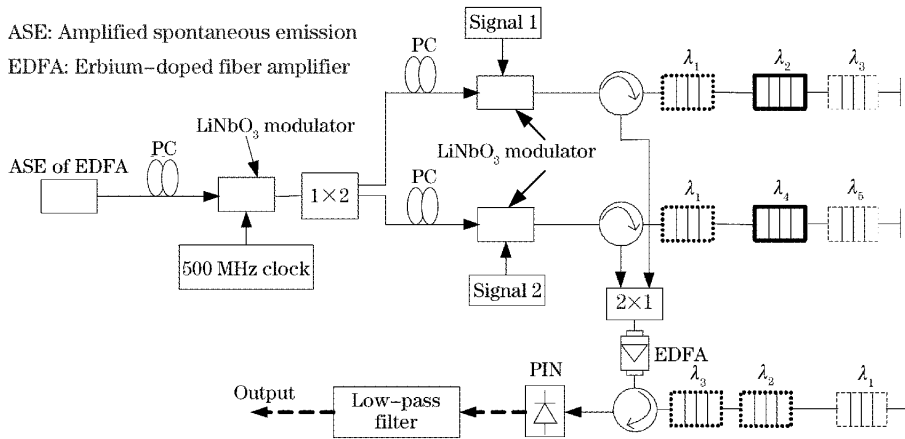


图 3 多速率光码分多址系统实验装置图

Fig. 3 Setup of the multi-rate OCDMA experiment

5 实验结果与分析

采用 $p=5$ 的素数跳频码字作为系统的地址码字, 选用了 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 作为高速数据的地址码字、 $(\lambda_1, \lambda_4, \lambda_5)$ 作为低速数据的编码码字, 其中 $\lambda_1 = 1549.9 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1550.9 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 1553.0 \text{ nm}$, $\lambda_4 = 1548.7 \text{ nm}$, $\lambda_5 = 1542.3 \text{ nm}$.

实验中, 高速数据采用了 500 Mb/s, 非归零码, 码型为 FF00(16 进制)的信号作为用户的数据信

号, 相当于 62.5 Mb/s 速率的一个 1,0 信号序列。用该用户数据信号对 500 Mb/s 的光时钟信号进行二次调制, 得到的波形如图 4(a)所示, 可见原用户数据信号中的“1”码由八个连续的“1”信号表示。这样光纤布拉格光栅编码器实际上是对 62.5 Mb/s 的信号进行编码。因此只要时钟信号的频率不变, 当用户数据的速率发生变化时, 实际上改变的只是每个数据信号周期内“1”码的个数, 而光纤布拉格光栅

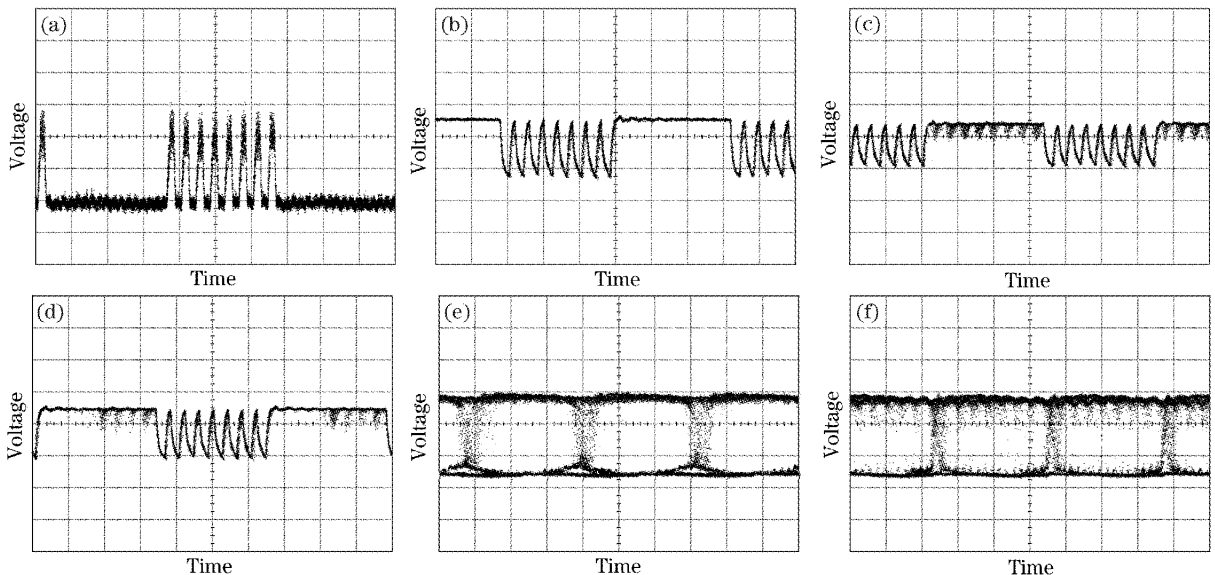


图 4 (a) 二次调制后信号波形图, (b) 无干扰多速率光码分多址系统过 PIN 后波形图, (c) 有干扰多速率光码分多址系统过 PIN 后波形图, (d) 有干扰同速率光码分多址系统过 PIN 后波形图, (e) 无干扰多速率光码分多址系统最终解码眼图, (f) 有干扰多速率光码分多址系统最终解码眼图

Fig. 4 (a) Waveform after twice modulations, (b) waveform of the multi-rate OCDMA without interference after PIN, (c) waveform of the multi-rate OCDMA with interference after PIN, (d) waveform of the same-rate OCDMA with interference after PIN, (e) eye diagram of the multi-rate OCDMA without interference when decoded, (f) eye diagram of the multi-rate OCDMA with interference when decoded

编码器的结构则无需改变。

这样实际上,在多速率光码分多址系统中,第一步编码通过二次调制将原来的多速率信号转变为一个 500 Mb/s 的同速率光码分多址系统,而对该同速率光码分多址系统的编解码采用了码元重叠的跳频光码分多址(SO-FFH-OCDMA)实现方案^[11]。

图 4(b)给出了无干扰情况下背对背传输后经过 PIN 检测后的波形。与图 4(a)的比较可以看出经过 PIN 检测后,系统恢复出二次调制后的波形,只是由于过了一个反向放大器,得到的是原波形的反码。图 4(c)有干扰用户情况下 PIN 检测后的波形。与图 4(b)相比,原来 0 码位置出现一系列小峰。这是干扰用户对高速用户的多址干扰引起的。

作为对比,又进行了一个同速率光码分多址系统的实验。该同速率光码分多址系统同样采用 $p=5$ 的素数跳频码字,系统用户数据信号速率为 500 Mb/s,光纤布拉格光栅编解码器采用的就是多速率光码分多址系统实验中采用的光纤布拉格光栅编解码器,从而保证了地址码码字和编解码器性能一致。为比较起见,特设定用户信号也为 FF00(16 进制)。图 4(d)给出了该同速率光码分多址系统的解码波形。与多速率光码分多址系统相比,原来 0 码位置亦出现一系列小峰,不过小峰集中在 0 码的后半周期,这主要由于两路用户信号的速率和数据一样,引起多址干扰的位置也相对固定造成的。但是多址干扰的峰值与信号峰值之比两个系统相差不多,从而可以验证上面分析中对多速率光码分多址系统经过第一步骤解码后性能与同速率光码分多址系统误码性能基本一样的结论。

最后,设定用户信号为 FFFF0000FF00FF(16 进制),相当于 62.5 Mb/s 的 1100101 伪随机码信号。并分别测量了无干扰和有干扰情况下通过整个系统后的电信号眼图,如图 4(e)和图 4(f)所示,可以看出即使在有干扰的情况下,系统的眼图依旧比较清晰,从而证明了本系统的可行性。

6 结 论

本文设计了一种新颖的多速率光码分多址系统

的实现方案。并对该方案的系统性能进行了理论分析,结果表明:本系统比变码长地址码字实现光码分多址系统能取得更好的误码性能,且第一步解码就可以得到接近于同速率光码分多址系统的性能。并设计了相应的实验对上述结论进行了验证,也证明了利用多速率光码分多址系统实现同时传输多种不同速率数据信号的异步光接入网的可能性。

参 考 文 献

- 1 J. A. Salehi. Code division multiple access techniques in optical fiber networks - Part I: Fundamental principles [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1989, **37**(8): 824~833
- 2 G. C. Yang, W. C. Kwong. Performance analysis of optical CDMA with prime codes[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(7): 569~570
- 3 W. C. Kwong, G. C. Yang. Design of multilength optical orthogonal codes for optical CDMA multimedia networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, **50**(8): 1258~1265
- 4 G. C. Yang, W. C. Kwong. Performance comparison of multiwavelength CDMA and WDMA + CDMA for fiber-optic networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1997, **45**(11): 1426~1434
- 5 G. C. Yang. Variable-weight optical orthogonal codes for CDMA networks with multiple performance requirements [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1996, **44**(1): 47~55
- 6 Fu Xiaomei, Yu Jinlong, Li Enbang *et al.*. The study of time/frequency encoding optical code division multi-access communication with Bragg grating arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 961~964 (in Chinese)
付晓梅,于晋龙,李恩邦等. 利用布拉格光栅阵列实现二维光码分多址的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 961~964
- 7 Ding Meiling, Zhang Xianmin, Chen Kangsheng. The hybrid direct sequence/frequency hopping optical CDMA system with FBGs based encoder/decoder[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 842~845 (in Chinese)
丁美玲,章献民,陈抗生. 基于光纤布拉格光栅编解码器的直接序列扩频跳频光码分多址系统[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 842~845
- 8 Fu Xiaomei, Yu Jinlong, Wang Wenrui *et al.*. The characteristics of two-dimension optical orthogonal code encoding OCDMA communication with Bragg grating arrays [J]. *J. Optoelectronic • Laser*, 2005, **16**(12): 1459~1462 (in Chinese)
付晓梅,于晋龙,王文睿等. 二维光正交码编码光码分多址系统研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(12): 1459~1462
- 9 J. A. Salehi, C. A Brackett. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks. Part II: Systems performance analysis [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1989, **37**(8): 834~842
- 11 Wu Chen. *The Research on FFH-OCDMA System and Its Applications* [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2003. 29~35 (in Chinese)
吴琛. FFH-OCDMA 系统及其应用研究[D]. 上海:上海交通大学, 2003. 29~35