

文章编号: 0253-2239(2006)02-0181-6

基于成像光通信的时间-空间扩频混合 光码分多址编码方案

潘卫清 刘立人 鲁伟 郎海涛 王吉明

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 为了在成像光通信中充分利用时间和空间两种频带资源,以成像光通信为基础,提出一种利用二维光正交 Pattern 码结合时域扩频实现光码分多址(OCDMA)编码的新方案。分析在该方案中存在的多址干扰噪声,并给出了噪声的概率密度函数,然后讨论由多址噪声引起的误码率与判决门限、用户数、码长积和码重积之间的关系。在相同的码容量下与时域扩频光码分多址编码和空间扩频光码分多址编码方案相比,该方案能降低对相关器件性能(时域码片数量和空间像素规模)的要求,而且还可获得更小的误码率。最后给出编码-解码的光学实现方案。

关键词: 光通信; 码分复用; 光正交码; 二维光正交地址模式码; 时间-空间扩频混合光码分多址

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Hybrid OCDMA Coding Scheme of Time-Spatial Frequency Spreading Spectrum Based On Optical Imaging Transmission

Pan Weiqing Liu Liren Lu Wei Lang Haitao Wang Jiming

(Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: For using the time and space frequency resources in imaging transmission fully, a new hybrid optical code division multiaddress (CDMA) coding scheme is proposed, which is based on imaging transmission with two-dimensional optical orthogonal pattern code and time frequency spread spectrum. Then the authors analyze the multiplex access interference noise and calculate the probability density function of interference noise in interfering optical orthogonal signature codes. The bit-error rate caused by the multiplex access interference noise is derived and plotted as a function of receiver threshold, number of users, code length and code weight product. Compared respectively with time spreading code and spatial spreading code optical CDMA, the authors' scheme has a lower bit-error rate and releases the requisition of relative devices such as the number of code chips in time domain and the pixels in space domain. Finally a design scheme of encoder-decoder is presented.

Key words: optical communication; code division multiple access; optical orthogonal code; optical orthogonal signature patterns; time-spatial frequency spreading hybrid OCDMA

1 引 言

在传统的通信系统中,光码分多址(OCDMA)^[1~3]是通过给每路信号分配唯一的、且相关性好的地址码来实现信道复用的。由于经过编码器后,光脉冲的频谱得到了展宽,所以码分多址(CDMA)通信又称为扩频通信。从光码分多址发展的角度来看,纯粹的时域扩频已是一种过时的技术,

因为这种技术采用单极性非相干编码,编码质量不高。随着地址码容量的提高,传输信号的频谱会扩得很宽,对于光纤链路很难进行色散补偿。随着社会和经济的发展,人们对高速率大容量的通信要求越来越迫切^[4],这就需要研究新的通信方法和高吞吐量的光码分多址网路^[5]。其中 Nakamura 等^[6]提出了光纤成像通信。但由于这种通信需要采用特殊

作者简介: 潘卫清(1976~),男,浙江临安人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事成像光通信系统及编码研究。E-mail: pan_weiqing@163.com

收稿日期: 2005-02-25; 收到修改稿日期: 2005-06-23

的成像光纤作为传输链路,成本过高无法使用,而且与现有的光纤网络不能很好兼容,所以研究的人较少。而在自由空间光通信中,由于不需铺设任何光纤等有线设备,采用成像通信可扩大通信容量,而且不会增加过高的成本^[7]。针对成像光通信,Kitayama^[8]提出了二维空间光码分多址方案。

为了在成像通信中充分利用时间和空间两种频带资源,提高通信容量,改善码分复用系统性能,同时降低码容量的增加对相关器件性能的要求,我们综合时间和空间扩频两种技术,提出了时间-空间扩频混合光码分多址编码方案。

2 新的光码分多址编码原理

光通信一般采用的是直接检测(IM-DD)方式,这决定了在光码分多址中地址序列必须采用单极性码。在目前,研究得较多的单极性码有光正交码(OOC)、素数码、 2^N 码等。

先讨论时间扩频常用的光正交码^[9]。一个 $(L, \omega, \lambda_a, \lambda_c)$ 等重光正交码就是一组长度为 L ,码重(即码字中“1”的数目)为 ω ,自相关限制为 λ_a ,互相关限制为 λ_c 的0,1序列所组成的集合,并且每个码字 $(x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$ 的循环自相关函数和任意两个相异码字 $(x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$ 与 $(y_0, y_1, \dots, y_{n-1})$ 之间的循环互相关函数分别满足

$$\sum_{i=0}^{L-1} x_i \cdot x_{i \oplus \tau} = \begin{cases} \omega, & \tau = 0 \\ \leq \lambda_a, & 1 \leq \tau \leq n-1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\sum_{i=0}^{L-1} x_i \cdot y_{i \oplus \tau} \leq \lambda_c, \quad 1 \leq \tau \leq n-1 \quad (2)$$

这里的“ \oplus ”是模 L 加。

另外,当时 $\lambda_a = \lambda_c = 1$,这种时间地址码的容量 Φ 与 L, ω 的关系如下

$$\Phi(L, \omega, 1) \leq \frac{L-1}{\omega(\omega-1)}, \quad (3)$$

从(3)式可以看到,这种码的容量与码的长度成正比,并且码重越小,容量越大,因此,为了在不增加编码器复杂性的情况下,一般采用码重较小的码字。

用于成像光通信码分复用的二维空间 Pattern 光正交码(OOSP),是由前面的一维光正交码扩展而来的^[8]。一个 $(M^2, v, \delta_a, \delta_c)$ 二维空间 Pattern 光正交码是由 M^2 个0,1码组成的 $M \times M$ 二元矩阵的集合,其中矩阵中“1”的个数为 v , δ_a 和 δ_c 分别表示自相关限制和互相关限制。并且每个 Pattern 码的循环自相关和任意两个相异 Pattern 码的循环互相

关分别满足

$$\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} e_{i,j}^{(q)} e_{k \oplus i, j \oplus l}^{(q')} \begin{cases} = v, & k = l = 0 \\ \leq \delta_a, & 1 \leq k, l \leq M-1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} e_{i,j}^{(q)} e_{k \oplus i, j \oplus l}^{(q')} \leq \delta_c, \quad 1 \leq k, l \leq M-1 \quad (5)$$

式中 i, j 分别为0,1码在矩阵中所在行与列的位置坐标, k, l 为相应的位置平移量,这里的“ \oplus ”是模 M 加。其相关原理如图1所示。当两矩阵作相对平移相叠加时,其中“1”对应的阴影方块重叠数就是该平移量对应的相关值。当时,光正交空间 Pattern 码的容量 C 与码的长度和重量之间的关系为

$$C(M^2, v, 1) \leq \frac{M^2 - 1}{v(v-1)}. \quad (6)$$

本文提出的空间和时间混合扩频光码分多址方案,是地址码由一维时域光正交码和二维空间光正交 Pattern 码组合而成的,它们的扩频示意图如图2所示。其具体规则为:将时间地址码集 $(L, \omega, 1)$ -OOC中每个地址码序列中的“1”用空间地址码集 $(M^2, v, 1)$ -OOSP中的同一个空间地址码来代替。例如某个时间扩频正交码为 $(1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0)$,它与某个空间扩频正交码 SP_i 组合而成的码为 $(SP_i, 0, 0, SP_i, 0, SP_i, 0, 0)$ 。显然这种编码方案的码容量为 ΦC 。

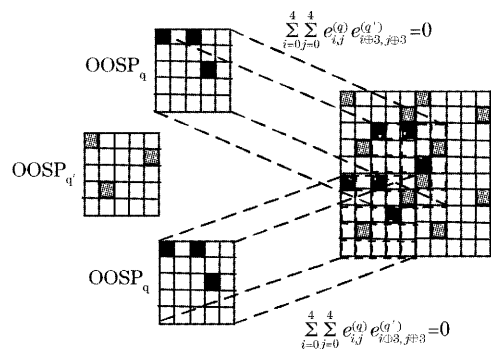


图1 两正交空间 Pattern 码互相关

Fig.1 Cross correlation of two OOSPs

3 性能分析

3.1 自相关性

因为 $(L, \omega, 1)$ -OOC的码重为 ω , $(M^2, v, 1)$ -OOSP的码重为 v ,所以其自相关的最大值为 ωv 。当时 $1 \leq \tau \leq L-1$,二维正交地址模式码(OOSP)的空间平移量 $1 \leq k, l \leq M-1$ 时,由于时间地址码和空间地址码都采用正交码,所以其旁瓣值最多为1。

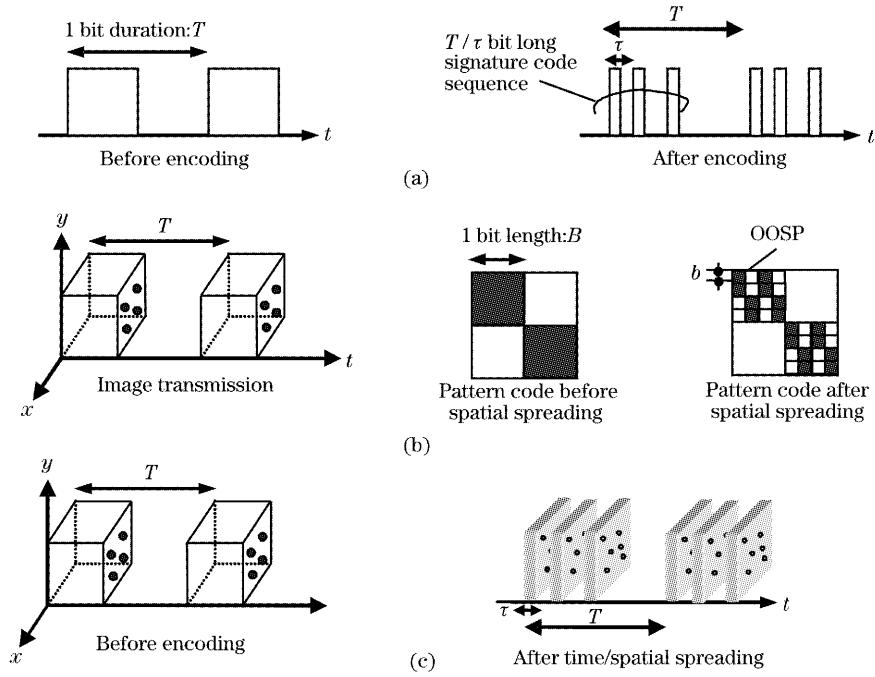


图 2 (a)时间扩频,(b)空间扩频,(c)时间-空间混合扩频

Fig. 2 (a) Time-frequency spreading, (b) spatial frequency spreading, (c) time-frequency spatial hybrid frequency spreading

3.2 互相关性

本方案中,相异的地址码可分三种情况:1)时间地址码相同而空间地址码不同(T^sP^d);2)时间地址码不同空间地址码相同(T^dP^s);3)时间地址码和空间地址码都不同(T^dP^d)。

情况 1(T^sP^d):由于时间地址码相同,当时间平移量 $0 \leq \tau \leq L-1$ 时,由时间地址码的自相关性可知其最大相关值取 w ,由于空间地址码不同,当空间平移量 $0 \leq k, l \leq M-1$ 时,其最大互相关值取 1,所以在该情形下时间-空间扩频码的最大互相关值为 w ,其余可取的值为 1 和 0。

情况 2(T^dP^s):由于时间地址码不同,当时间平移量 $0 \leq \tau \leq L-1$ 时,由时间地址码的互相关性可知其最大相关值取 1,由于空间地址码相同,当空间平移量 $0 \leq k, l \leq M-1$ 时,其最大自相关值取 v ,所以在该情形下时间-空间扩频码的最大互相关值为,其余可取的值为 1 和 0。

情况 3(T^dP^d):由于时间地址码不同,当时间平移量 $0 \leq \tau \leq L-1$ 时,由时间地址码的互相关性可知其最大相关值取 1,由于空间地址码不相同,当空间平移量 $0 \leq k, l \leq M-1$ 时,其最大互相关值取 1,所以在该情形下时间-空间扩频码的最大互相关值为 1。

综合以上三种情况可知,时间-空间扩频码的最大互相关值为 $\max(w, v)$ 。

3.3 多址干扰概率密度

首先考虑两个不同地址码之间的干扰概率密度。仿照文献[10,11]和的分析方法,只考虑码片同步的情况。分三种情形讨论:

情况 1(T^sP^d):两相同时间地址码之中的一个作循环平移,然后两者叠加,其中发生所有“1”所在位置恰好都重叠在一起的概率为 $1/(2L)$,而只有一个“1”所在位置重叠的概率为 $(w^2-1)/(2L)$,没有重叠的概率为 $1-w^2/(2L)$ 。两个不同空间地址码之间循环平移叠加,只有一个“1”所在位置发生重叠的概率为 $v^2/(2M^2)$,没有重叠的概率为 $1-v^2/(2M^2)$ 。那么由相同时间地址码和不同空间地址码组合成的两互异地址码之间,有 w 个“1”重叠的概率为 $v^2/(2LM^2)$,发生一个“1”重叠的概率为 $(w^2-1)v^2/(2LM^2)$,没有重叠的概率为 $1-w^2v^2/(2LM^2)$ 。

其他两种情况与情况 1 类似,其结果总结如下:
情况 1(T^sP^d):

$$P_I(u) = \frac{v^2}{2LM^2} \delta(u-w) + \frac{(w^2-1)v^2}{2LM^2} \delta(u-1) + \left(1 - \frac{w^2v^2}{2LM^2}\right) \delta(u), \quad (7)$$

情况 2(T^dP^s):

$$P_{II}(u) = \frac{w^2}{2LM^2}\delta(u-v) + \frac{(v^2-1)w^2}{2LM^2}\delta(u-1) + \left(1 - \frac{w^2v^2}{2LM^2}\right)\delta(u), \quad (8)$$

情况 3(T^dP^d):

$$P_{III} = \frac{w^2v^2}{2LM^2}\delta(u-1) + \left(1 - \frac{w^2v^2}{2LM^2}\right)\delta(u). \quad (9)$$

其中各情形发生的概率见表 1。

表 1 各情形发生的概率

Table 1 The probability of each case

Case	T^dP^d	T^dP^s	T^dP^d
Probability	$P_1 = \frac{\Phi-1}{\Phi C-1}$	$P_2 = \frac{C-1}{\Phi C-1}$	$P_3 = \frac{(\Phi-1)(C-1)}{\Phi C-1}$

由(3)式和(6)式可知时间地址码和空间地址码的容量与码长 L 和 M^2 成正比,而与码重 w, v 成反比,所以当地址容量很大时,(7)式和(8)式中重叠数取 w, v 的概率就很小,可忽略不计,从而综合以上三种干扰情形得到两互异地址码之间的平均干扰概率密度为

$$P(u) = P_1P_I + P_2P_{II} + P_3P_{III} \approx \frac{w^2v^2}{2LM^2}\delta(u-1) + \left(1 - \frac{w^2v^2}{2LM^2}\right)\delta(u), \quad (10)$$

由此可计算两互异地址码之间的光脉冲重叠个数的平均值为

$$m_u = \frac{w^2v^2}{2LM^2}, \quad (11)$$

方差为

$$\sigma_u^2 = \frac{w^2v^2}{2LM^2}\left(1 - \frac{w^2v^2}{2LM^2}\right), \quad (12)$$

当有 N 个用户同时通信时,假设各码址之间的干扰是相互独立的,则某地址码受到的干扰光强等于其它 $N-1$ 个地址码单独干扰光强之和,其概率密度为

$$P(I) = \sum_{i=0}^{N-1} \binom{N-1}{i} \left(\frac{w^2v^2}{2M^2L}\right)^i \times \left(1 - \frac{w^2v^2}{2M^2L}\right)^{N-1-i} \delta(I-1), \quad (13)$$

多址干扰光强的平均值和方差分别为

$$m_I = (N-1) \frac{w^2v^2}{2M^2L}, \quad (14)$$

$$\sigma_I^2 = (N-1) \frac{w^2v^2}{2M^2L} \left(1 - \frac{w^2v^2}{2M^2L}\right). \quad (15)$$

3.4 多址干扰噪声引起的误码率分析

在码分多址系统中,当接收端接收数据“0”,即发送的光强为 0 时,如果多址干扰的噪声超过判决门限 q_{th} ,此时就会发生码元接收错误,该错误发生的概率定义为误码率(Bit error rate, BER)。

$$R_{BE} = \frac{1}{2} \int_{q_{th}}^{\infty} P(I) dI = \frac{1}{2} \sum_{i=q_{th}}^{N-1} \binom{N-1}{i} \times \left(\frac{w^2v^2}{2M^2L}\right)^i \left(1 - \frac{w^2v^2}{2M^2L}\right)^{N-1-i}, \quad (16)$$

由(16)式可知,多址干扰误码率与判决门限 q_{th} 、码重积 wv 、码长积 M^2L 以及同时通信的用户数 $(N-1)$ 有关,它们的关系曲线见图 3。

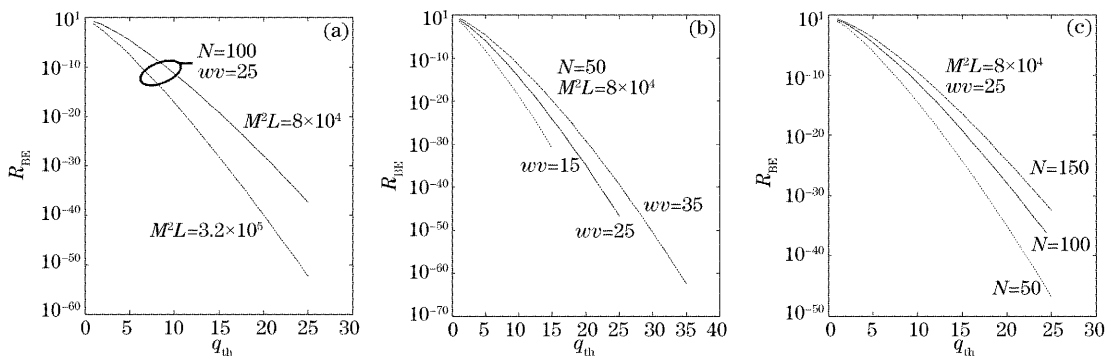


图 3 误比特率在(a)不同码长积 M^2L , (b)不同码重积 wv , (c)不同用户数 N 下随判决门限值 q_{th} 的变化曲线

Fig. 3 Bit error rate performance versus threshold q_{th} for (a) different code length product M^2L , (b) different code weight product wv , (c) different number of users N

干扰噪声误码率随 q_{th} 的增大而减小,但判决门限的最大取值不能超过地址码的自相关峰值 wv ,否则会发生接收码元“1”时出错。图 3(a)显示误码率随码长积 M^2L 增加而减小。由图 3(b)可看出,在相同码长积 M^2L 和用户数 N 的情况下,通过同时

增大 wv 和 q_{th} ,可降低误码率。图 3(c)指出误码率随同时通信的用户数的增加而增大。

前面分析了基于成像通信的时间-空间扩频混合光码分多址的原理和性能,下面将该编码方案与文献[3]提出的串行通信时间扩频编码,及文献[8]提出的

并行通信空间扩频编码方案作比较。假设系统要求的地址码容量为 100,同时通信的用户数为 $N=50$,则采用 $w=5$ 的时间扩频光正交编码方案需要的码长为 $L=2001$,当 $q_{th}=w$ 时, $R_{BE}=7.2 \times 10^{-6}$;采用 $v=5$ 空间扩频光正交码需要的像素为 $M^2=2001$,当 $q_{th}=v$ 时, $R_{BE}=7.2 \times 10^{-6}$;而采用时间-空间扩频混合编码方案,取 $w=5, \Phi=10, v=5, C=10$,则 $L=201, M^2=201$,当 $q_{th}=wv$ 时, $R_{BE}=4.3 \times 10^{-40}$ 。从三个方案的比较可见,为满足相同的地址容量要求,采用时间-空间扩频混合光码分多址方案可降低系统对器件性能的要求(时域码片的宽度和数量,空域像素规模),同时减小了误码率。

3 编码-解码实现方案

图 4 给出的是每帧传输一比特信息的时间-空间扩频光码分多址实现方案。发射端,时间-空间扩频编码器由空间扩频编码器和时间扩频编码器两部分组成。其中空间扩频编码器由空间光调制器和空间 Pattern 地址码发生器组成;时间扩频编码器由光纤延迟线构成。需要说明的是这里所用的光纤都为成像光纤。接收端的解码器与编码器采用相同设备,只是时间和空间的先后顺序有了变化。另外,成像光通信的收发装置可采用自由空间成像光通信装置^[7]。

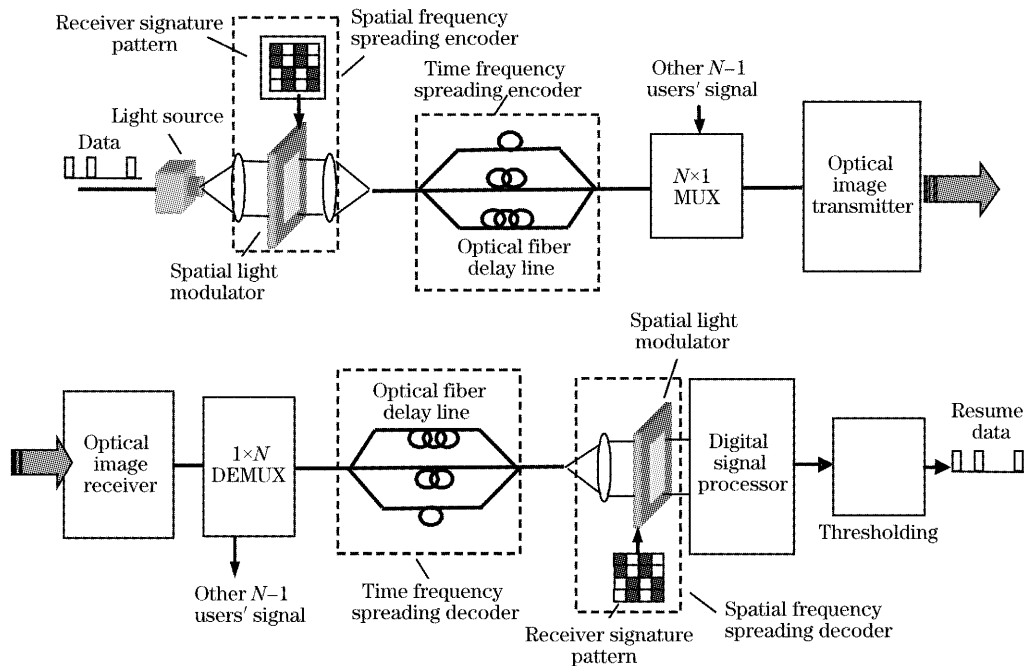


图 4 时空扩频光码分多址的光学实现方案

Fig. 4 Scheme of encoder and decoder for time-spatial frequency spreading spectrum OCDMA

3 结 论

本文提出了一种时间-空间扩频混合光码分多址编码方案,分析了该方案的自相关性和互相关性,给出了在码片同步条件下多址干扰的概率密度函数,然后分析了由多址干扰噪声引起的误码率与判决门限、码长积、码重积和用户数之间的关系,并将新编码方案与原有的方案作了比较,结果表明在相同码容量下新方案可降低系统对器件的要求,而且误码率也有降低,这为系统容量的增加和升级提供了可能,最后给出了编码-解码的实现方案。

参 考 文 献

- 1 Li Yuquan, Pu Tao, Xu Ming *et al.*. OCDMA network and key technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(Suppl.): 721~722
- 2 B. Hamzeh, M. Kavehrad. OCDMA-coded free-space optical links for wireless optical-mesh networks[J]. *J. IEEE Trans. Commun.*, 2004, **52**(12): 2165~2174
- 3 J. A. Salehi. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks—Part I: Fundamental principles [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1989, **37**(8): 824~833
- 4 R. M. Gagliardi, A. J. Mendez, M. R. Dale *et al.*. Fiber-optic digital video multiplexing using optical CDMA[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(1): 20~26
- 5 Zuo Chao, Ma Wenhua, Gao Yiran *et al.*. Experimental research on optical code division multiplex access system based on spectral slicing[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(1): 41~44 (in Chinese)

- 左超,马文华,高屹然等. 基于频谱分割的光码分多址接入系统实验研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(1): 41~44
- 6 M. Nakamura, K. Kitayama. Image fiber-optic 2-D parallel optical interconnects based on space-CDMA[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3632**: 331~338
- 7 Weiqing Pan, Liren Liu, Wei Lu. Optical pattern communication based on imaging optics[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5892**: 530~540
- 8 K. Kitayama. Novel spatial spread spectrum based fiber optic CDMA networks for image transmission[J]. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1994, **12**(4): 762~772
- 9 F. R. K. Chung, J. A. Salehi, V. K. Wei. Optical orthogonal code design, analysis, and applications[J]. *J. IEEE Trans. Infor. Theory*, 1989, **35**(3): 595~604
- 10 M. Nakamura, K. Kitayama. System performances of optical space code-division multiple-access-based fiber-optical two-dimensional parallel data link[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(14): 2915~2924
- 11 J. A. Salehi, C. A. Brackett. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks—part II: Systems performance analysis[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1989, **37**(8): 834~842

首届 LASER. World of Photonics China 展会将于近期在上海举行

每两年一届在德国慕尼黑举办的 LASER. World of Photonics 是国际激光、光电子领域的顶级盛会,覆盖了从激光、光学到光电子的整条产业链。于 2005 年 6 月结束的上届展会汇集了全球 1000 多家的行业领先企业,在四天的展会期间共有近 3 万名来自全球各地的专业观众。

借助母展国际化的特点和国际影响,首届 LASER. World of Photonics China (LASER China)不久也将在上海隆重开幕。目前已有国内外 100 多家展商报名参展,其 70% 参展商是活跃在全球市场的国际性领先企业。展会主要分为激光元件、激光设备两大展区,展会期间还将举行多场高质量的激光技术国际研讨会。

LASER China 还将与第 5 届慕尼黑上海电子展同期同地举办,与电子工业这一激光产业的主要应用领域充分互动,共同打造全球化交流平台和国际性顶级专业盛会。

一、首届展会展商规模庞大

目前,中国激光光电子市场正以年平均 30% 的速度增长,世界各国激光光电子制造商日益认识到中国市场的重要性,德国 Spectaris 协会中有 41% 的企业已与中国建立商业往来。中国市场的吸引力加上 LASER World of Photonics 的号召力,使得众多国际企业对 LASER China 表现出浓厚兴趣,决定参加首届展会。

TRUMPF, Rofin, Coherent, GSI, Jenoptik, Melles Griot, PRC, nLight, Miyachi, Spectra Physics, JDS Uniphase, Laservall, Bystronic 等国际领先企业均预定了大规模的展台,将在会期作集中展示。TRUMPF 更是在显著位置预订了 150 平方米的大型展台,展出其具有世界领先水平的激光切焊等方面的精密设备。同时,国内领先企业也毫不示弱,团结普瑞玛、大族、楚天、华工、国科、长春新产业、华北奥依特、泰德激光、海特等国内知名企业也早早预订了展位,与国际企业一分高下。这一切都预示着本届 LASER China 将一举奠定国内激光、光电子行业的顶级展会。

二、同期举行各种高质量的活动

展会期间还将推出各项高水准的同期活动,其中包括:“中德激光技术——现状、趋势与发展研讨会”,“激光器前沿技术最新发展及应用国际研讨会”,“LASER VISION”展团,以及 Intec. net 合作论坛。

“中德激光技术——现状、趋势与发展研讨会”由慕尼黑国际博览集团和汉诺威激光中心(Laser Zentrum Hannover)共同组织。该会议为期两天,将围绕激光材料加工技术现状、发展及未来趋势进行专题研讨。演讲公司包括:Coherent, Lambda Physik, Spectra Physics 以及中国科学院上海光学精密机械研究所等。中国作为世界第二大机械工具消费市场,近来又成为世界最大的机械工具进口国,激光粗加工与精细加工领域的课题将是会议热点。

“激光器前沿技术最新发展及应用国际研讨会”激光器前沿技术最新发展及应用国际研讨会将围绕固态激光器、CO₂ 激光器、纳米激光器、超短/超快/超强激光器等新型激光器前沿技术与最新应用展开讨论。到会作技术报告的科学家来自中国科学院、北京大学、天津大学、华中科技大学、华南师范大学、中国科学院上海光学精密机械研究所等科研院所。

此次研讨会得到美国相干(Coherent)公司的大力支持,将有多名来自该公司的科技专家到会发言。

“LASER VISION”展团由慕尼黑国际博览集团和 TU 柏林服务公司主办。展团旨在为德国以及其他欧洲国家的高等院校、研究机构和技术革新企业提供机会,向参展的中国和国外的专家们展示各自的研究成果和产品研发成果。

intec. net 合作论坛专门为那些正在寻求机会进入中国的企业,尤其是中型企业而设立,在特定范围内寻求合适的国际合作伙伴,安排洽谈会、组织参观相关公司,以方便有合作兴趣的国际企业同潜在的中国合作者见面洽谈。

详情您可以登录展会官方网站:www.laserchina.net,或与我们联系:

慕尼黑展览(上海)有限公司

邮编:201204

http://www.mmi-shanghai.com

上海市浦东新区银霄路 393 号

电话:+86 21 50450808

百安居浦东商务大厦 502 室

传真:+86 21 50458100

E-mail:laser@mmi-shanghai.com