

文章编号: 1001-3806(2011)03-0330-04

多幅度数字脉冲间隔调制的水下无线光通信研究

魏巍¹, 华良洪², 张晓晖^{1*}, 饶炯辉¹, 王文博³

(1. 海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033; 2. 中国人民解放军 海军装备部, 北京 100841; 3. 中国人民解放军 海军司令部 四部, 北京 100841)

摘要: 为了研究适用于水下无线光通信的调制方式, 采用分析水下无线光通信的信道模型, 并推导该信道中用多幅度数字脉冲间隔调制方式的误包率表达式、带宽利用率和功率利用率的方法, 对不同调制方式进行了理论分析比较。结果表明, 多幅度数字脉冲间隔调制的带宽利用率和功率利用率最高。这一结果对选择适合于水下无线光通信的调制方式是有帮助的。

关键词: 光通信; 差错性能; 带宽利用率; 功率利用率; 多幅度脉冲间隔调制; 水下

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.03.012

Performance of underwater wireless optical communication employing multilevel digital pulse interval modulation

WEI Wei¹, HUA Liang-hong², ZHANG Xiao-hui¹, RAO Jiong-hui¹, WANG Wen-bo³

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Department of Naval Equipment, People's Liberation Army, Beijing 100841, China; 3. 4th Department, Department of Naval Command, People's Liberation Army, Beijing 100841, China)

Abstract: In order to investigate a digital modulation applicable for underwater wireless optical communication (UWOC), the model of the UWOC channel was analyzed. The packet error rate, bandwidth efficiency and energy efficiency of the channel based on multilevel digital pulse interval modulation (MDPIM) was deduced. Comparison was carried out between different modulation modes. Both power efficiency and bandwidth efficiency are the highest for MDPIM. The results help to determine the modulation suitable for underwater wireless optical communication.

Key words: optical communication; error performance; bandwidth efficiency; power efficiency; multilevel digital pulse interval modulation; underwater

引言

在无线光通信中, 广泛应用实现相对简单的强度调制/直接检测脉冲光通信系统^[1-6]。各种强度调制方式中, 采用何种调制方式取决于所涉及系统的一系列准则, 而对于水下无线光通信系统有两大基本准则: 较高的带宽利用率和功率利用率。带宽利用率^[2]是指在传输一定数据的条件下所需带宽, 所需带宽越少, 带宽利用率越高。尽管水下光信道的带宽理论值很大, 但由于光源的调制速率限制以及水体散射引起光的时域展宽, 水下光通信的带宽往往比理论值小很多, 因此, 需要在有限的带宽内传输尽可能多的信息。功率利用率^[2]是指在传输一定数据的条件下, 达到指定差

错性能所需平均发射光功率, 所需功率越小, 功率利用率越高。对于水下小型通信系统, 眼睛的保护、电池的使用、光源的发光功率都对平均发射光功率设置了上限, 故采用功率利用率较高的调制方式系统的稳定性越高。因此, 水下无线光通信需要一种功率利用率和带宽利用率同时较高的强度调制方式。而目前强度调制中, 开关键控 (on-off key, OOK) 调制的带宽利用率最高, 但功率利用率最低, 脉位调制 (pulse position modulation, PPM)、差分脉位调制 (different pulse position modulation, DPPM)、脉冲间隔调制 (pulse interval modulation, PIM)、双头脉冲间隔调制 (double-heads pulse interval modulation, DH-PIM) 等各种方式, 本质上都通过采用一定的映射关系, 牺牲带宽利用率来提高功率利用率, 还没有一种功率利用率和带宽利用率都较高的调制方式。GHASSEMLOOY^[7]在2006年对脉冲间隔调制进行改进, 提出了多幅度数字脉冲间隔调制 (multilevel digital pulse interval modulation, MDPIM), 作

作者简介: 魏巍 (1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为无线光通信、光纤通信。

* 通讯联系人。E-mail: zhangxiaohui 505@vip.sina.com

收稿日期: 2010-08-24; 收到修改稿日期: 2010-09-07

者先分析了水下无线光通信信道模型,介绍了MDPIM调制原理,计算了MDPIM的带宽利用率,接着通过推导该方式下基于水下无线光信道的误包率,求得了其功率利用率,在和其它调制方式进行比较后研究发现,MDPIM同时具有较高的带宽利用率和功率利用率,提出可将MDPIM用于水下无线光通信。

1 水下无线光通信的信道模型

由于功率利用率和通信系统的差错性能密切相关,而任何对差错性能的分析都离不开信道的信号功率和噪声功率,因此,需要先分析水下无线光通信的平均接收光功率和平均噪声功率,即信道模型。通信距离较短时(小于100m),水体散射引起光脉冲的时间域展宽量非常小^[8-9],可以忽略不计。这时由水体光传输指数衰减定律知道经过一段传输距离 z 后平均接收光功率为^[3]:

$$P_r = A_s G_r \frac{l^2}{4[z \tan(\theta/2)]^2} P_s \cdot \exp(-cz) \quad (1)$$

式中, P_s 是发射光功率, c 是水体衰减系数, A_s 是发射机损耗, G_r 是接收机增益, l 是接收透镜直径, θ 是光束远场发散角。而GILES将水下无线光通信的平均噪声视作4种噪声源的集合,其功率谱密度为^[10]:

$$N_0 = \sqrt{P_{bg,sn}^2 + P_{sig,sn}^2 + P_{dark,sn}^2 + P_{apm,n}^2} \quad (2)$$

式中, $P_{bg,sn}$ 是环境光引起的散弹噪声功率密度, $P_{sig,sn}$ 是信号光引起的散弹噪声功率密度, $P_{dark,sn}$ 是暗电流引起的散弹噪声功率密度, $P_{apm,n}$ 是前置放大器噪声密度,则平均噪声功率为 $N_0 B$, B 为系统带宽。

2 MDPIM 信号调制原理

多幅度数字脉冲间隔调制中随着振幅值阶数的增加,其硬件实现难度迅速加大,因此,实用性最强的是2阶幅值脉冲间隔调制,本文中的MDPIM都是指2阶幅值的MDPIM。它将 M 个bit的OOK数据映射成最短2个、最长 $2^{M-1} + 1$ 个时隙(slot)的信号包(packet),每个信号包的第1个时隙是一个幅值变化的脉冲,当这 M bit OOK数据的第1个bit为0时,脉冲幅值为 v ,第1个bit为1时,脉冲幅值为 $2v$,其后是一个保护时隙 T_g 和一连串空时隙 d 。当脉冲幅值为 v 时,空时隙数目 d 等于输入的二进制OOK数据的十进制值;当脉冲幅值为 $2v$ 时, d 等于输入的二进制OOK数据取反后的十进制值,其信号序列可以写成^[7]:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n p(t - T_n) \quad (3)$$

式中, n 是瞬时信号包数, $a_n \in \{1, 2\}$ 是脉冲幅度序列, $p(t)$ 是脉冲波形, T_n 是第 n 个信号包开始的时间,在

MDPIM信号里,每一个信号包由一个脉冲时隙和一个保护时隙开头,后面的间隔时隙的数目表示信号包的信息,所以^[7]:

$$T_n = T_0 + T_s(2n + \sum_{k=0}^{n-1} d_k) \quad (4)$$

$d_k \in \{0, 1, \dots, 2^{M-1} - 1\}$ 代表第 k 个信号包的间隔时隙数目。图1是MDPIM的信号映射图,和PPM, DPPM

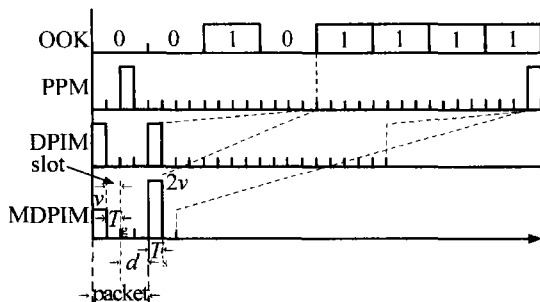


Fig. 1 Signal structures of MDPIM, DPIM, PPM and OOK 和DPIM相比,MDPIM的平均时隙长度更短。

3 带宽利用率

以非归零码(non-return zero, NRZ)OOK调制的带宽利用率为基准进行归一化,设OOK数据传输率为 R_b ,MDPIM的平均信号长度 $L_{ave} = (2^{M-1} + 3)/2$,所需带宽 $R_{MDPIM} = R_b(2^{M-1} + 3)/(2M)$,其带宽利用率为:

$$U_{MDPIM} = R_b/R_{MDPIM} = (2M)/(2^{M-1} + 3) \quad (5)$$

而其它几种调制方式的带宽利用率 $U_{PPM} = R_b/R_{PPM} = M/2^M$, $U_{DPPM} = 2M/(2^M + 1)$, $U_{DPIM} = 2M/2^{M+3}$, $U_{DHPIM} = 2\alpha M/[2^{M-1} + 2\alpha + 1]$ 。当 $M > 2$ 时,MDPIM的带宽利用率高于其它的调制方式(见图2)。

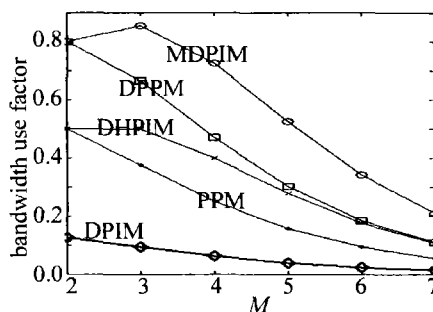


Fig. 2 Bandwidth efficiencies of several modulation modes

4 MDPIM 水下无线光通信的误包率

MDPIM是DPIM的一种,所以它的误比特特性首先具备DPIM的误比特特性,如误判到多余的脉冲(误警)会把一个信号包分成两个短信号包,漏判存在的脉冲会将两个信号包合为一个长信号包。又因MDPIM存在多幅度,故还存在幅度之间的误判。鉴于通常使用的误比特率已经无法准确衡量系统的差错性能,只能采用误包率来衡量,当检测到信号包中有一个

时隙出现错误时,就认为这个包有错。将 N 个 OOK 信号每 M 个一组按 MDPIIM 方式调制,其误包率的计算式如下^[11]:

$$P_{pe} = 1 - \prod_{n=1}^{NL_{ave}/M} (1 - P_{se}) \quad (6)$$

式中, L_{ave} 是 MDPIIM 的平均长度, NL_{ave}/M 是 MDPIIM 信息包个数的均值, P_{se} 是单个时隙信号出错的概率。若判决电路的输入信号:

$$y(t) = \begin{cases} I_p + n(t), & (\text{幅度为 } 2 \text{ 的脉冲}) \\ k_0 I_p + n(t), & (\text{幅度为 } 1 \text{ 的脉冲}) \\ n(t), & (\text{无脉冲}) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \text{无脉冲被判为 } 1 \text{ 脉冲的概率: } P_{0e}(y) = \int_{k_1 I_p}^{\infty} I_p P_0(y) dy = Q\left(k_1 \frac{I_p}{\sigma}\right) \\ \text{1 脉冲被判为无脉冲或 } 2 \text{ 脉冲的概率: } P_{1e}(y) = Q\left[\left(k_0 - k_1\right) \frac{I_p}{\sigma}\right] + Q\left[\left(k_2 - k_0\right) \frac{I_p}{\sigma}\right] \\ \text{2 脉冲被判为无脉冲或 } 1 \text{ 脉冲的概率: } P_{2e}(y) = \int_{-\infty}^{k_2 I_p} P_2(y) dy = Q\left[\left(1 - k_2\right) \frac{I_p}{\sigma}\right] \end{cases} \quad (8)$$

式中, $Q(x) = \int_x^{\infty} \exp[-(y - I_p)^2 / (2\sigma^2)] / (\sqrt{2\pi}\sigma) dy$, 令光探测器的灵敏度为 R , 光脉冲是矩形脉冲, 则 2 脉冲的峰值电流为 $I_p = RP_r 2L_{ave} / (1 + k_0)$, 其信噪比为:

$$I_p / \sigma = RP_r \sqrt{ML_{ave} / (N_0 R_b)} 2 / (1 + k_0) \quad (9)$$

当传输大量数据时,接收 2 脉冲和 1 脉冲是等概率的,其概率都是 $P_2 = P_1 = 1 / (2L_{ave})$, 无脉冲的概率是 $P_0 = (L_{ave} - 1) / L_{ave}$, 则每个时隙发生错误的概率 $P_{se} = P_0 P_{0e} + P_1 P_{1e} + P_2 P_{2e}$, 由 Bernoulli 分布式(见(6)式)可得 $P_{pe} \approx \frac{NL_{ave}}{M} P_{se}$, 即 MDPIIM 的误包率。在时钟完全同步的情况下,假设 1 脉冲的幅值是 2 脉冲的一半,即 $k_0 = 0.5$, 令硬判决的门限 $k_1 = 0.25, k_2 = 0.75$, 则 MDPIIM 的误包率:

$$P_{pe, MDPIIM} \approx \frac{N(2^{M-2} + 2)}{M} \times Q\left[\frac{RP_r}{3} \sqrt{\frac{M(2^{M-1} + 3)}{2N_0 R_b}}\right] \quad (10)$$

5 MDPIIM 的功率利用率

在光通信中更关心的往往是达到指定误包率所需最小平均发射光功率,功率利用率即为最小平均发射光功率除以 R_b ^[2]。对(10)式进行反演,并将(1)式、(2)式带入其中,由功率利用率的定义得:

$$V_{MDPIIM} = P_{pe, MDPIIM} / R_b \approx Q^{-1}\left[\frac{P_{pe, MDPIIM} M}{N(2^{M-2} + 2)}\right] \frac{3}{\exp(-cz) A_s G_r R} \times$$

式中, I_p 是探测器的峰值电流, k_0 是幅度为 1 的脉冲(以下简称 1 脉冲)峰值电流和幅度为 2(以下简称 2 脉冲)峰值电流的比值, $0 < k_0 < 1$ 。令 $n(t)$ 是通信系统的噪声,假设该噪声是高斯白噪声,则 $n(t)$ 均值为 0, 方差为 $\sigma^2 = N_0 B$, 这时 2 脉冲、1 脉冲和无脉冲时的探测信号的概率密度分别为 $P_2 = \exp[-(y - I_p)^2 / (2\sigma^2)] / (\sqrt{2\pi}\sigma)$, $P_1 = \exp[-(y - k_0 I_p)^2 / (2\sigma^2)] / (\sqrt{2\pi}\sigma)$, $P_0 = \exp[-y^2 / (2\sigma^2)] / (\sqrt{2\pi}\sigma)$ 。由于存在两个幅值脉冲,所以有两个判决门限 $k_1 I_p$ 和 $k_2 I_p$ 分别判决无脉冲、1 脉冲和 2 脉冲, $0 < k_1 < k_0 < k_2 < 1$ 。每一个时隙出错的概率由 3 部分组成:

$$\sqrt{\frac{2N_0}{M(2^{M-1} + 3)R_b}} \frac{4[\tan(\theta/2)]^2}{d^2} \quad (11)$$

为便于比较分析,假设硬判决门限为 0.5 时,OOK 的误包率 $P_{pe, OOK} \approx NQ\left(\frac{RP_s E}{\sqrt{N_0 R_b}}\right)$, 若通信系统要求误包率小于 10^{-6} , 此时由定义求得 OOK 的功率利用率 $V_{OOK} = P_{pe, OOK} / R_b \approx Q^{-1}\left(\frac{10^{-6}}{N}\right) 4[\tan(\theta/2)]^2 \times \sqrt{N_0 / R_b} / [\exp(-cz) A_s G_r R d^2]$, 以此对其它调制方式的平均发射光功率需求进行归一化(见图 3)。

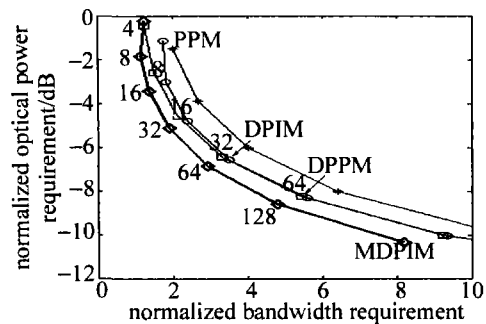


Fig. 3 Average optical power requirement for different modulation modes

包长度 $L = 2^M$, 在 $L \geq 16$ 后, DPIM 和 DPPM 两种调制方式的性能差别不大,但优于 PPM; MDPIIM 在各种包长度下所需要的光功率是最少的,即其功率利用率最高,并且所需的带宽(横坐标)也是最少的,尤其在 $L = 128$ 时,其所需带宽比 $L = 64$ 的 DPIM 或 DPPM 少 $0.631R_b$, 但所需要的平均发射光功率比后者反而减少了 0.335dB , 所需带宽不到 5 倍的 R_b , 而 $L = 64$ 的

DPIM 或 DPPM 大于 5 倍的 R_b , 即 MDPIM 的功率利用率和带宽利用率都是最高的, 它提高了功率利用率, 改进了信息传输速率, 信道容量和传输带宽要求, 这对于水下光通信系统这种功率受限和带宽受限的系统更具优势。

6 结 论

分析了水下信道模型, 采用 MDPIM 调制方式, 推断了水下无线光通信系统的带宽利用率和功率利用率。在和其它几种调制方式进行比较后发现, MDPIM 同时具有较高的带宽利用率和功率利用率, 是更适于用于水下光通信中的调制方式。

参 考 文 献

- [1] SCHILL F, ZIMMER U, TRUMPF J. Visible spectrum optical communication and distance sensing for underwater applications [C]// Proceeding of ACRA' 2004. Canberra, Australia: The Australia Robotics and Automation Association Inc., 2004:1-8.
- [2] SHIU D Sh, KAHN J. Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication [J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(8):1201-1210.
- [3] VASILESCU I, KOTAY K, RUS D. Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network [C]//Conference on Embedded Networked Sensor Systems Archive Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. San Diego, USA: Association for Computing Machinery, 2005:154-165.
- [4] WEID J P, SILVA J A P. Underwater cableless data transmission [C]//OCEANS '93 Engineering in Harmony with Ocean. Victoria, Canada: IEEE, 1993:191-193.
- [5] WANG H X, ZHU Y B, ZHANG T Y. Performance study of optical wireless DH-PIM and DPIM [J]. Laser Technology, 2007, 31(1):92-94 (in Chinese).
- [6] ZHANG K, GONG M L, ZHANG H T. Performance of dual header-pulse interval modulation for wireless infrared multipath channels [J]. Laser Technology, 2003, 27(1):4-7 (in Chinese).
- [7] GHASSEMLOOY Z, ALDIBBIAT N M. Multilevel digital pulse interval modulation scheme for optical wireless communications [C]// Transparent Optical Networks, 2006 International Conference. Nottingham, U K; International Conference on Transparent Optical Networks, 2006:149-153.
- [8] McLEAN J. Beam spread function with time dispersion [J]. Applied Optics, 1998, 37(21):4708-4712.
- [9] MOORADIAN G C, GELLER M, STOTTS L B. Blue-green pulsed propagation through fog [J]. Physical Ocean, 1980, 10(4):2093-2101.
- [10] GILES J. Underwater optical communications systems part 2 basic design considerations [C]//Military Communications Conference, 2005. Atlantic City, USA: IEEE, 2005:1700-1705.
- [11] ALDIBBIAT N M, GHASSEMLOOY Z, McLAUGHLIN R. Error performance of dual header pulse interval modulation (DH-PIM) in optical wireless communications [C]//Optoelectronics 2001 IEE Proceedings. London: IEEE, 2001:91-96.
- [1] SCHILL F, ZIMMER U, TRUMPF J. Visible spectrum optical communication and distance sensing for underwater applications [C]// Proceeding of ACRA' 2004. Canberra, Australia: The Australia Robotics and Automation Association Inc., 2004:1-8.
- [2] SHIU D Sh, KAHN J. Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication [J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(8):1201-1210.
- [3] VASILESCU I, KOTAY K, RUS D. Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network [C]//Conference on Embedded Networked Sensor Systems Archive Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. San Diego, USA: Association for Computing Machinery, 2005:154-165.
- [4] WEID J P, SILVA J A P. Underwater cableless data transmission [C]//OCEANS '93 Engineering in Harmony with Ocean. Victoria, Canada: IEEE, 1993:191-193.
- [5] WANG H X, ZHU Y B, ZHANG T Y. Performance study of optical wireless DH-PIM and DPIM [J]. Laser Technology, 2007, 31(1):92-94 (in Chinese).
- [6] ZHANG K, GONG M L, ZHANG H T. Performance of dual header-pulse interval modulation for wireless infrared multipath channels [J]. Laser Technology, 2003, 27(1):4-7 (in Chinese).
- [7] GHASSEMLOOY Z, ALDIBBIAT N M. Multilevel digital pulse interval modulation scheme for optical wireless communications [C]// Transparent Optical Networks, 2006 International Conference. Nottingham, U K; International Conference on Transparent Optical Networks, 2006:149-153.
- [8] McLEAN J. Beam spread function with time dispersion [J]. Applied Optics, 1998, 37(21):4708-4712.
- [9] MOORADIAN G C, GELLER M, STOTTS L B. Blue-green pulsed propagation through fog [J]. Physical Ocean, 1980, 10(4):2093-2101.
- [10] GILES J. Underwater optical communications systems part 2 basic design considerations [C]//Military Communications Conference, 2005. Atlantic City, USA: IEEE, 2005:1700-1705.
- [11] ALDIBBIAT N M, GHASSEMLOOY Z, McLAUGHLIN R. Error performance of dual header pulse interval modulation (DH-PIM) in optical wireless communications [C]//Optoelectronics 2001 IEE Proceedings. London: IEEE, 2001:91-96.

(上接第 307 页)

析了不同冷却时间下的温度场, 以及晶体厚度对对温度场冷却的影响。所采用的研究方法可以应用到其它类型各向异性激光晶体温度场计算中, 如 Nd: YVO₄ 等激光器的热分析。研究结果可以为 SSHCL 热分析进一步研究提供研究基础, 为优化 SSHCL 设计提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] LI X Q, DOU Zh G, LI Q, *et al.* The study status of new lasers and its applications [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2008, 19(6):95-99 (in Chinese).
- [2] WANG B S, JIANG H H, ZHANG Q L, *et al.* Analysis on the temperature field of LD array pumped Nd: GGG disc laser in heat-capacity mode [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2007, 24(6):688-693 (in Chinese).
- [3] DONG W W, LI L, SHI P, *et al.* Thermal effect of Nd: GdVO₄ crystal end-pumped by fiber coupled diode laser [J]. Laser Technology, 2009, 33(6):633-637 (in Chinese).
- [4] LI L, DONG W W, SHI P, *et al.* Thermal effect of high power Yb: YAG microchip solid-state laser [J]. Laser Technology, 2010, 34(1):8-12 (in Chinese).
- [5] ZHENG X F, SHI P, LIU W, *et al.* Thermal effect of Nd: GdVO₄ crystal pumped by variable radius by LD [J]. Laser Technology, 2008, 32(6):642-644 (in Chinese).
- [6] HU H, CAI Zh, JIANG J F. Numerical simulation of thermodynamics in cooling for heat capacity laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(11):1507-1511 (in Chinese).
- [7] SHI P, CHEN W, LI L, *et al.* Semianalytical thermal analysis on a Nd: YVO₄ crystal [J]. Applied Optics, 2007, 46(19):4046-4061.
- [8] SHI P, CHEN W, LI L, *et al.* Semianalytical thermal analysis of thermal focal length on Nd: YAG rods [J]. Applied Optics, 2007, 46(26):6655-6661.
- [9] SABAEIAN M, NADGARAN H, MOUSAVE C. Analytical solution of the heat equation in a longitudinal pumped cubic solid-state laser [J]. Applied Optics, 2008, 47(13):2317-2325.
- [10] SHI P, LI J P, CHEN W, *et al.* Thermal effect of Nd: GdYO₄ cube microchip laser with back surface cooling [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7):1772-1776 (in Chinese).