

文章编号: 0253-2239(2010)03-0660-05

# 一种光码分多址无源接入网及其性能研究

李传起<sup>1</sup> 周 谔<sup>2\*</sup> 宋 标<sup>2</sup> 孙婷婷<sup>2</sup> 赵立龙<sup>2</sup> 朱迎春<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>广西师范大学电子工程学院, 广西 桂林 541004  
<sup>2</sup>南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044)

**摘要** 提出了一种基于时隙分组光码分多址(OCDMA)技术的无源光接入网模型,给出了一种时隙分组 OCDMA 的随机接入协议,系统采用比特填充单极性  $m$  序列为地址码。推导了此种随机接入协议下的无源光网络的网络吞吐量数学模型,并对网络的吞吐量性能进行了分析研究。理论分析和仿真结果表明,分组时隙 OCDMA 网络具有较高的网络吞吐量,单个用户接收功率的降低或多用户干扰的增加,会降低系统网络的吞吐量。随着负载的增大,单个用户接收功率越小网络的吞吐量越低。通过减小分组长度可以提高网络的吞吐能力。

**关键词** 光纤通信; 光码分多址; 网络吞吐量; 随机接入协议

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103003.0660

## A New OCDMA Passive Access Network and Its Performance Analysis

Li Chuanqi<sup>1</sup> Zhou Xu<sup>2</sup> Song Biao<sup>2</sup> Sun Tingting<sup>2</sup> Zhao Lilong<sup>2</sup> Zhu Yingchun<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China  
<sup>2</sup> College of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

**Abstract** A new architecture of access network based on slotted optical code division multiple access (OCDMA) packet passive optical network (PON) is proposed. The random access protocol based on this network is presented, and the bit-stuffed unipolar  $m$ -sequence is used as the address code. Next, mathematic model of the network throughput of the passive optical network under the given protocol is derived. The throughput performance is numerically investigated. Theoretical analysis and simulation results show that the proposed slotted OCDMA packet network obtains a better network performance. The network throughput will be deteriorated by reducing the received optical power or increasing the multiple access interference. But the throughput decreases as the received power decreases when the offered traffic becomes larger. By reducing the packet length, the network throughput will be improved.

**Key words** optical fiber communication; optical code division multiple access; network throughput; random access protocol

## 1 引 言

光码分多址(OCDMA)技术能够充分地利用光纤中的巨大带宽,具有支持用户随机接入、网络容量有弹性、网络控制协议简单、支持多速率的业务、保密性强和安全性高等特点。随着光学器件以及光纤制作水平的不断提高,光码分多址在光纤宽带接入网和光分组交换技术中受到越来越多的研究和

重视。

在目前的光纤到户(FTTH)宽带接入服务中主要是采用基于时分复用(TDM)的无源光网络(PON),例如异步传输模式(ATM)-PON和以太网(Ethernet)-PON,在提供高速下行速率的同时,只能提供较低的上行速率,本质上是受限制于基于时隙多址接入的协议。在上行数据方面,它也很难向用

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-27

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2008437)和江苏省高校自然科学基金(07KJB510066)资助课题。

作者简介: 李传起(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信 OCDMA 网络技术方面的研究。

E-mail: leecq@nuist.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: zhouxusean@126.com

户提供多速率的上行数据传输<sup>[1,2]</sup>。OCDMA 技术允许多用户共享同一信道,可以大大地提高信道的利用率。如果运用时隙 OCDMA 在 PON 系统中,由于用户通过码字与光纤线路终端(OLT)进行信息传输而与上下行带宽无关,将可以为用户提供对称并且高达吉比特级别的上下行速率,甚至多速率的上行数据传输。而由于系统的信道利用率提高,系统的网络吞吐量也将大大提高。

本文提出一种基于时隙分组 OCDMA 技术的无源光接入网模型,给出了时隙分组 OCDMA 的随机接入协议。网络数据链路层的接入协议的优劣会直接影响到网络的性能<sup>[3~10]</sup>。系统地址码采用比特填充单极性  $m$  序列,采用比特 0 和比特 1 同时被编码的方式,接收端使用并行干扰抑制方案<sup>[11]</sup>,减小多用户干扰的影响,提高网络的性能。根据时隙分组 OCDMA 的随机接入协议以及系统结构,推导了

此种随机接入协议下的网络吞吐量数学模型,对网络的吞吐性能进行了仿真和分析。

## 2 系统结构

图 1 为基于时隙分组 OCDMA 技术的无源光网络结构。位于终端机房的 OLT 和安装于每个用户家庭的光网络单元(ONU)通过一个  $1 \times N$  耦合器连接在一起。可将每个 ONU 视为一个用户。在每一个 ONU 中均有光发送设备和光接收设备,光发送设备和光接收设备分别具有可调谐的光编码器和解码器<sup>[12]</sup>。在此 OCDMA 网络中,每个 ONU 被认为是随机接入的。当用户需要发送业务数据时,系统将分配给该用户一个地址码字,并调节该用户的光编码器按照被分配到的码字进行信号编码,在接收端系统将调节光解码器采用该码字进行解码。

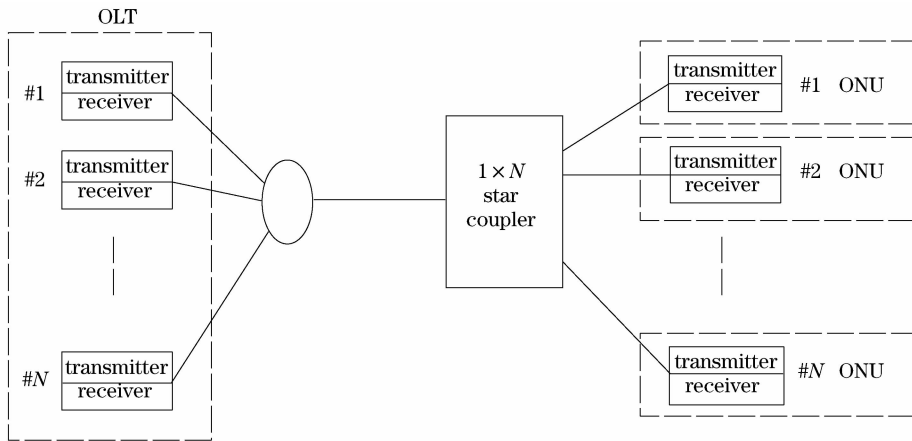


图 1 分组时隙 OCDMA 的无源光网络结构

Fig. 1 Architecture of the slotted OCDMA packet PON

假设 OCDMA 网络是一个随机接入,分组同步,广播式的网络。且每个用户发送分组数据和数据到达某接收端均处于某一个时隙的起始时刻,同时分组数据的长度恰好等于一个时隙的长度,即  $T_{\text{packet}} = KT_{\text{bit}} = T_{\text{slot}}$ , 其中  $K$  为每个分组的比特数。每个用户发送的数据通过星形耦合器都可以被所有其他的用户和 OLT 接收到。同时假定每个用户到星形耦合器的距离相等,这样可以忽略远近效应的影响并认为每个用户从 OLT 接收到的光功率相等。该系统具有自动重传的功能,当用户发送的分组数据,在接收端成功接收到,接收端将发送确认信息。如未能正确接收,接收端将向发送端发送重传请求,发送端会以一定概率重新发送该分组数据。

在目前的非相干 OCDMA 系统中,多用户干扰(MUI)是影响其系统用户容量的主要因素。同时假

设系统最大用户数为  $M$ ,文中可用地址码字的数量大于系统的最大用户数  $M$ 。系统中的码字按照以下方法进行分配。当有用户需要进行数据传输时,分配给该用户一个码字,同时将该码字从码池中去除。如果系统不给用户分配地址码,则用户无法进行数据传输。可以看出系统通过码字的分配,能控制网络中用户的数量,使得网络容量有弹性。需指出的是,给出的随机接入协议要求预传输协调。即发送设备会首先向所有用户发送一个控制分组,包括发送用户,接收用户,信息所使用的码字等信息。控制分组可以在另一个通道使用特定波长进行传输和接收。

## 3 数学模型和理论分析

使用提供的负载  $G(n)$  和网络的吞吐量  $\beta(n)$  作

为两个主要的性能指标,对上述随机接入协议下的网络吞吐量进行分析。 $\beta(n)$  代表每个时隙系统成功接收到的平均分组个数,  $G(n)$  代表每个时隙平均发送出的分组个数。假设系统中具有  $N$  个用户,在控制分组数据成功的传输后,每个空闲用户以  $P_o$  的概率发送新的分组数据,按照系统所分配到的地址码字进行信息编码。如果接收端正确接收到了分组数据,则会向发送端发送一个确认信息,通知发送端是否正确接收。如果没能正确接收,发送端将进入积压模式,成为积压用户并以  $P_r$  的概率重新发送该分组数据。

在某一个特定时隙的开始时刻,系统中有  $n$  个处于积压状态的用户数,则提供的负载  $G(n)$  和网络的吞吐量  $\beta(n)$  分别为

$$G(n) = (N - n)P_o + nP_r, \quad (1)$$

$$\beta(n) = \sum_{j=0}^{N-n} \sum_{i=0}^n [(i+j) \wedge M] P_s[(i+j) \wedge M] \times P_1(i|n)P_2(j|n). \quad (2)$$

式中  $(i+j) \wedge M$  表示取两个数中的最小数。另

$$P_1(i|n) = \binom{n}{i} P_r^i (1 - P_r)^{n-i}, \quad (3)$$

$$P_2(j|n) = \binom{N-n}{j} P_o^j (1 - P_o)^{N-n-j}, \quad (4)$$

$$P_s(x) = [1 - P_b(x)]^K. \quad (5)$$

式中  $P_1(i|n)$  表示在  $n$  个积压用户的情况下,有  $i$  个用户重新发送分组数据的概率;  $P_2(j|n)$  表示在  $n$  个积压用户的情况下,在  $N-n$  个空闲用户中,有  $j$  个用户开始发送新的分组数据。 $P_s(x)$  表示同时发送  $x$  个分组数据时,接收端成功接收的概率;  $P_b(x)$  表示同时发送  $x$  个分组数据时,系统的比特误码率。显然  $P_s(x)$  是与系统所采用的地址码以及接收机的结构有关。

采用比特填充单极性  $m$  序列为地址码,比特填充单极性  $m$  序列由两个互补的子序列  $b_i(n)$  和  $b'_i(n)$  组成。每个输入的数据比特 1 和比特 0 被分别编码为波形  $b_i(n)$  和  $b'_i(n)$ 。而在接收端采用并行干扰抑制方案,如图 2 所示。在不考虑光电检测过程中的噪声时,通过此方法可以将其他用户产生

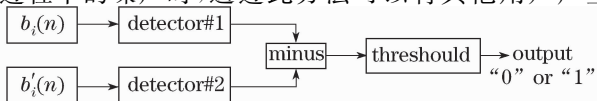


图 2 并行干扰抑制的解码方案图

Fig. 2 Decoding scheme diagram in the parallel cancellation scheme

的互相关值(多址干扰)消除<sup>[11]</sup>。假设采用雪崩二极管(APD)光电检测器,比特 1 和比特 0 出现的概率相等,都等于 1/2。则系统的比特误码率为

$$P_b(x) = 1/2P_z(z < 0/Sr = 1) + 1/2P_z(z > 0/Sr = 0) = 1/2 \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z^2}} \exp\left[-\frac{(z - \mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right] dz + 1/2 \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z^2}} \exp\left[-\frac{(z + \mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right] dz \quad (6)$$

并行结构中,上支路的解码输出结构为  $X$ ,下支路的解码输出结果为  $Y$ ,经相减器后的输出结果  $Z$ ,其均值  $\mu_z$  和方差  $\sigma_z^2$  为

$$\begin{aligned} \mu_z &= E(X - Y) = \mu_x - \mu_y = GT_c(d\lambda_s + d\lambda_s/M_c) = GT_c\lambda_s F/2(1 + 1/M_c), \\ \sigma_z^2 &= E[(Z - \mu_z)^2] = E\{[(x - \mu_x) - (y - \mu_y)]^2\} = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 = G^2 F_e T_c \{ [d + 2I(k)]\lambda_s + \{2Kd - [K + 2I(k)]\}\lambda_s/M_c + 2F(\lambda_b + I_b/e)2\} + 2F(T_c I_s/e + \sigma_{th}^2), \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $\lambda_s$  代表署名序列中码片 1 被传输时入射光子到达率,可表示为  $\lambda_s = \eta P/hf$ ,  $G$  为 APD 的平均雪崩增益,  $I_b$  为 APD 的体漏电流,  $I_s$  为 APD 的表面漏电流,  $\lambda_b$  是背景光,  $F_e$  是过剩噪声系数,  $F_e = k_{eff}G + (2 - 1/G)(1 - k_{eff})$ ,  $k_{eff}$  是 APD 的有效电离率,  $\sigma_{th}^2$  是热噪声的方差,  $\sigma_{th}^2 = 2k_B T_r T_c / (e^2 R_L)$ ,  $k_B$  为波尔兹曼常数,  $T_r$  是接收器的噪声温度,  $R_L$  是接收机负载电阻。表 1 为 APD 的性能参数。

表 1 APD 性能参数

Table 1 Typical APD parameters

| APD Parameters                       |                               | Value                  |
|--------------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| Optical frequency                    | $F/\text{Hz}$                 | $3.634 \times 10^{14}$ |
| Quantum efficiency                   | $\eta$                        | 0.6                    |
| Gain                                 | $G$                           | 100                    |
| Effective ionization ratio           | $K_{eff}$                     | 0.02                   |
| Bulk leakage current                 | $I_b/\text{nA}$               | 0.1                    |
| Surface leakage current              | $I_s/\text{nA}$               | 10                     |
| Background light photon arrival rate | $\lambda_b/(\text{counts/s})$ | $10^9$                 |
| Modulation extinction ratio          | $M_c$                         | 100                    |
| Receiver noise temperature           | $T_r/\text{K}$                | 1100                   |
| Receiver load resistor               | $R_L/\Omega$                  | 1030                   |

为了得到稳态吞吐量,用离散时间马尔可夫链描述上述系统。此马尔可夫链具有  $N+1$  个状态。每个时隙所处的状态取决于系统中积压用户的数量  $n, n \in \{0, 1, \dots, N\}$ 。随着一个时隙进入下一个时隙,系统从一个状态转移到另一个状态。定义  $P_{mn}$  为从状态  $n$  转移到状态  $m$  的状态转移概率,其中  $n, m \in \{0, 1, \dots, N\}$ 。假设在状态  $n$  时,有个  $i$  个积压用户和  $j$  个空闲用户被激活,发送了分组数据。当系统转移到  $m$  个状态时,  $i+j$  个用户中,将有  $i+m-n$  个用户发送失败,而另外的  $j-m+n$  个用户成功发送分组数据,可得

$$P_{mn} = \sum_{i=0 \vee (n-m)}^n \sum_{j=0 \vee (m-n)}^{(N-n) \wedge (M+m-n)} P_1(i|n)P_2(j|n) \times \left[ \begin{matrix} (i+j) \wedge M \\ j-m+n \end{matrix} \right] \times P_s^{j-m+n} [(i+j) \wedge M] \times (1 - P_s [(i+j) \wedge M])^{(i+j) \wedge M - j + m - n} \quad (9)$$

式中  $a \vee b$  表示  $a$  和  $b$  两者中的最大者。在上述马尔可夫链中存在稳态分布概率  $\pi_n, n \in \{0, 1, \dots, N\}$ , 可以通过以下两式联合求解得出

$$\sum_{n=0}^N \pi_n = 1, \quad (10)$$

$$\sum_{n=0}^N \pi_n P_{mn} = \pi_m \quad m \in \{0, 1, \dots, N\}. \quad (11)$$

稳态吞吐量  $\beta$  和平均提供的负载  $G$  的表达式分别为

$$\beta = \sum_{n=0}^N \beta(n) \pi_n, \quad (12)$$

$$G = \sum_{n=0}^N G(n) \pi_n. \quad (13)$$

### 4 数值结果与分析

在不考虑系统中其他噪声以及传输损耗、色散等的情况下,使用并行干扰抑制的方法可以消除多用户干扰的影响。因此,可以研究单个用户接收功率对网络吞吐量的影响。设数据传输速率为  $R_b$ ,接收功率为  $P, P_o = P_r$ 。图 3 为  $R_b = 30 \text{ Mb/s}, K = 16, M$  为无限大时,不同的接收功率下,网络的吞吐量关于负载的曲线。可以看出当负载较小时,不同的接收功率情况下,网络的吞吐量性能相当。但随着负载的增大,单个用户接收功率越小网络的吞吐量越低。这是因为接收功率的下降导致单个用户的误码率的上升,从而使得网络的吞吐量下降。这也验证了单个用户的低误码率传输是网络整体性能优良的基础。

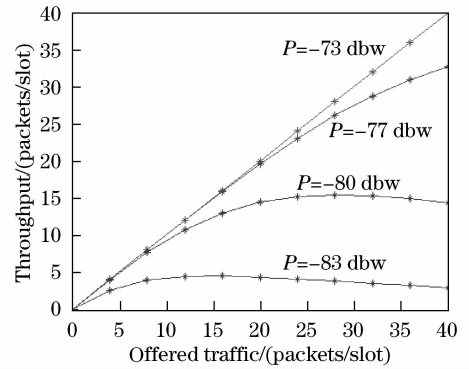


图 3 不同的接收功率下,网络的吞吐量关于负载的曲线  
Fig.3 Throughput versus the offered traffic with different  $P$

在实际系统中,当考虑到多用户干扰,各类噪声,不同的码字以及不同的应用环境时,系统不能无限制的增加用户数量,必须设定系统的最大容量限制的网络用户数。不妨设  $M = 16$ ,其他参数取  $P = -80 \text{ dbw}, R_b = 30 \text{ Mb/s}, K = 16$ 。图 4 为不同用户数的情况下,网络的吞吐量关于负载的曲线。可以看出当负载小于容量  $M$  时,用户数量对网络的吞吐量性能影响不大。但是当负载大于  $M$  时,如果网络中的用户数超过容量  $M$ ,则网络的吞吐性能恶化。超过容量的用户数越多网络吞吐量下降得越快。显然,为了获得最佳的网络吞吐量性能,需要控制系统对用户的码字分发,从而控制系统中的用户数量。

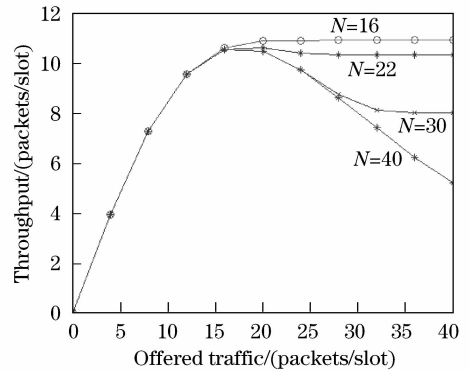


图 4 不同用户数的情况下,网络的吞吐量关于负载的曲线  
Fig.4 Throughput versus the offered traffic with different amount of user  $N$

图 5 为不同分组长度的情况下,网络的吞吐量关于负载的曲线。在负载较小时,分组长度对吞吐量的影响非常小。但在负载较大时,分组长度越小,系统的吞吐性能越好。这是因为在负载小时,各用户分组的碰撞概率比较小,传输的误码率也比较低,所以影响就比较小。而在负载大时,各用户分组的

的碰撞概率变大,分组长度越小则传输的误码率越低,使得网络性能更好。通过适当的减小分组长度,可以提高网络的吞吐能力。

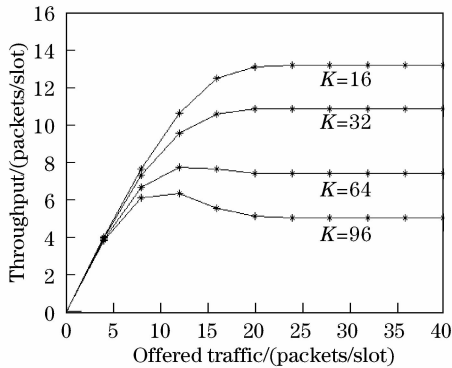


图5 不同分组长度下,网络的吞吐量关于负载的曲线

Fig.5 Throughput versus the offered traffic with different  $K$

## 5 结 论

提出了一种基于时隙分组 OCDMA 技术的无源光接入网模型,同时给出了一种时隙分组 OCDMA 的随机接入协议。该系统采用比特填充单极性  $m$  序列为地址码,比特 0 和比特 1 时均进行编码传输,在接收机中使用并行干扰抑制方案,最大限度地减少多用户干扰,提高网络的吞吐量。推导出了此种随机接入协议下的网络吞吐量数学模型,分析了该网络的吞吐量性能。理论分析和仿真结果表明,分组时隙 OCDMA 接入网具有较高的网络吞吐量,单个用户接收功率的降低或多用户干扰的增加,会降低系统网络的吞吐量。通过减小分组长度可以提高网络的吞吐能力。

## 参 考 文 献

- 1 K. Kitayama, Xu Wang, Naoya Wada *et al.*. OCDMA over WDM PON-solution path to gigabit-symmetric FTTH[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(4): 1654~1662
- 2 Xu Wang, Naoya Wada, T. Miyazaki *et al.*. Hybrid WDM/OCDMA for next generation access network[C]. *SPIE*, 2007, **6783**: 678328
- 3 P. Kamath, J. D. Touch, J. A. Bannister. The need for media access control in optical CDMA networks[C]. *IEEE Infocom*, 2004, **4**(11): 2208~2219
- 4 Zhang Chongfu, Qiu Kun, Xu Bo. Passive optical networks based on optical CDMA: design and system analysis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(1): 118~126
- 5 Fei Xue, Zhi Ding, S. J. Ben Yoo. Performance analysis for optical CDMA networks with random access schemes[J]. *IEEE Communications Society*, 2004: 1883~1887
- 6 H. M. H. Shalaby. Optical CDMA random access protocols with and without pretransmission coordination[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(11): 2455~2462
- 7 Sun Shurong, Yin Hongxi, Wang Ziyu. Performance analysis of a new random access protocol for OCDMA networks[J]. *Photon Netw Commun.*, 2007, **14**: 89~95
- 8 Sun Shurong, Yin Hongxi, Wang Ziyu *et al.*. A new codeword assignment strategy for optical CDMA networks and its performance analysis [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, **34**(11): 1970~1973
- 9 H. M. H. Shalaby. Optical CDMA random access protocols with and without pretransmission coordination[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(11): 2455 ~ 2462
- 10 Fu Zhiming, Yao Zhoushi, Tan Qinggui *et al.*. Research on throughput of wireless optical code-division multiple-access in access network [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2007, **36**(4): 681~684
- 付志明, 么周石, 谭庆贵 等. 无线光 CDMA 接入网的网络吞吐量研究[J]. *电子科技大学学报*, 2007, **36**(4): 681~684
- 11 Maw-Yang Liu, Eugene Lai, Yang-Hang Lee *et al.*. Suppression of interuser interference for fiber-optic synchronous code division multiple access networks[J]. *J. Opt. Commun.*, 1998, **19**(4): 126~132
- 12 Li Chuanqi, Zhu Yingchun, Zhou Xu. Tunable encoder/decoder for optical code division multiple access networks[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1901~1905
- 李传起, 朱迎春, 周 谔. 光码分多址系统可调谐编/解码器研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1901~1905