

一种新的光码分多址网络地址码分配策略及其性能分析

孙淑蓉¹, 殷洪奎¹, 王子宇¹, 徐安士¹, 杨淑雯²

(1. 北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871; 2. 深圳大学新技术研究中心, 广东深圳 518060)

摘要: 本文提出了一种新的适用于 OCDMA 网络的地址码分配策略, 并采用新的数学模型——处理器共享系统, 对 OCDMA 网络的稳态吞吐率和平均时延进行了仿真计算, 结果表明, 本文提出的分配策略的性能优于目前文献中已报道的策略; 采用处理器共享系统模型的仿真结果与实际情况非常吻合, 它比传统的马尔可夫链模型简单, 适合于对 OCDMA 接入网进行建模。

关键词: 光码分多址; 码字分配策略

中图分类号: TN913.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2006)11-1970-04

A New Codeword Assignment Strategy for Optical CDMA Networks and Its Performance Analysis

SUN Shu rong¹, YIN Hong-xi¹, WANG Zi-yu¹, XU An-shi¹, YANG Shu-wen²

(1. National Lab. on Local Fiber-Optic Communication Networks & Advanced Optical Communication Systems, Peking University, Beijing, 100871, China; 2. Advanced Technology Research Center, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: A new codeword assignment strategy for OCDMA networks is proposed in this paper. Employing a new mathematical model, namely processor sharing system, static state throughput ratio and average delay of OCDMA networks are calculated. The results reveal that our strategy performs better than existing strategies. Meanwhile, analysis process is simplified compared with conventional Markov chain model, and corresponding results are indeed consistent with practical situation, thus processor sharing system is truly applicable to model the OCDMA networks.

Key words: optical code division multiple access(OCDMA); codeword assignment strategy

1 引言

光码分多址(OCDMA, Optical Code Division Multiple Access)技术与传统的多址技术,如时分多址(TDMA, Time division Multiple Access)、波分多址(WDMA, Wavelength Division Multiple Access)等相比,能够充分利用光纤中的巨大带宽,同时具有支持用户随机接入、提高传输信息的保密性和安全性、支持多速率业务和突发业务、对协议透明等突出优点,有望成为超高速信号传输、交换和接入网的多址方案, OCDMA 是通过给每个用户分配一个码字,让用户对要发送的数据进行编/解码而实现通信的,码字分配策略的好坏会直接影响网络的性能,而目前对 OCDMA 码字分配策略的研究报道尚少。

本文在分析了已有的 OCDMA 地址码分配策略^[1~4]的基础上,提出了一种新的码字分配策略,同时采用新的数学模型对它进行了性能分析和仿真,结果表明所提出的分配策略与已有的策略相比,在相同的网络载荷下,具有更高的吞吐率和更低的时延。同时,分析了多址接入的用户数和地址码参数的变化对网络性能的影响,仿真结果与实际情况非常吻合,且分析过程简化。因此,所提出的数学模型非常适合用于为 OCD-

MA 随机接入方案进行建模,其仿真结果可以指导 OCDMA 网络的设计及性能优化。

2 OCDMA 网络中用户地址码字的分配策略

2.1 网络描述

在一个用户可以随机接入的 OCDMA 网络中,假定发射机和接收机都是可调的,当用户有业务需要发送时,系统为该用户分配一个地址码字,并调节发射机发送采用该码字进行编码的编码信号,而在接收端调节接收机使用该码字进行解码。同时假定 OCDMA 网络是一个分组同步、随机接入、广播式的网络。每一用户的业务到达时间是随机的,但均处于某一分组的起始点。用户的业务量也是随机的,即用户待传送的分组数目是一个随机数。系统具有自动重传请求(ARQ, Automatic Retransmission Request)功能,即当用户传送的分组出现错误时,接收端向发送端发出 ARQ,如果经过次传送后,数据分组仍未成功到达接收端,则该分组将被丢弃,系统开始下一个分组的传送。为了应用 ARQ 机制,接收端应该具备分组检错功能,可由循环冗余校验(CRC, Cyclic Redundancy Correction)来实现。

2.2 码字分配策略

假设 OCDMA 系统中的用户数上限为 U_m , 所使用的光正交码(OOC, Optical Orthogonal Code)的容量为 C . 文献[1]提出了两种码字分配策略(实际上提出了三种策略, 因策略 2 和策略 3 无本质区别, 所以, 我们把它归为一种): (1) 假定用户数小于 C , 即 $U_m \leq C$, 如果某用户要传送业务, 则系统分配给该用户一个码字, 同时将该码字从可用码字池中移去; 当用户数大于 C 时, 没有码字可以分配给该用户, 用户须排队等候; (2) 假定 $U_m < \infty$, 此时, 如果某用户有业务要传送, 系统分配给该用户一个码字, 同时将该码字从可用码字池中移去, 并将该码字进行随机移位后放入可用码字池中, 这种情况, 可以认为码字是随机分配的. 由于采用策略 1 时, 网络中允许的接入用户数受到 OOC 容量的限制, 而采用策略 2 时, 码字的随机分配将导致网络中多址干扰的随机性, 即使是用户数较小时, 网络中的干扰可能已经较大.

鉴于上述码字分配策略存在的不足, 本文提出了下面的码字分配策略, 为了叙述方便, 我们把它称为策略 3. 假设 $U_m < \infty$, 当某用户有业务需要传送时, 系统在码字池中选择已使用次数(包含将其循环移位后使用的次数)最少的码字分配给该用户. 如果码字池中有多个码字的使用次数相等, 且均为最小值, 则随机选择其中一个码字分配给用户. 此时认为码字是均匀分配的. 显然, 策略 1 是策略 3 在 $U_m < \infty$ 时的特例.

为了便于分析, 这里仅采用一维 OOC 作为用户的地址码, 但所述分析方法和数学模型也可以用来分析采用二维 OOC 作为地址码的 OCDMA 网络的性能. 现选用码长为 n 、码重为 w 、自相关旁瓣峰值和互相关峰值均为 1 的一维 $(n, w, 1, 1)$ OOC 作为地址码, 其容量^[5]为:

$$C = \lfloor (n-1) / [w(w-1)] \rfloor \quad (1)$$

当网络中有 k 个用户时, 设目标用户的误比特率为 $P_b(k)$ (这里忽略背景噪声和接收机的热噪声, 仅考虑多址干扰), 同时令判决门限 Th 等于码重 w , 采用策略 3, 得到的 $P_b(k)$ 为:

$$P_b(k) = \begin{cases} 0 & 0 < k \leq w + 1 \\ \frac{1}{2} \sum_{i=w}^{k-1} \binom{k-1}{i} P_{hit}^i (1 - P_{hit})^{k-1-i} & k > w + 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $P_{hit} = 1 - \left(\frac{n-1}{n}\right)^{A-1} + \left(\frac{n-1}{n}\right)^{A-1} \cdot \sum_{i=w}^{k-1} \binom{k-1}{i} \left(\frac{w}{2n}\right)^i \left(1 - \frac{w}{2n}\right)^{k-1-i}$, $A = \lfloor (U_m) / C \rfloor$.

3 数学模型

为了便于分析随机接入的情况, 我们先对固定接入的情况, 即接入用户数不变的情况进行建模.

3.1 固定接入

设单个用户的状态集为 $\{s_1, s_2, \dots, s_{N+1}\}$, 其中状态 S_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 表示该用户正在进行某个分组的第 i 次传送; 状态 S_{N+1} 表示该用户的当前分组在经过 N 次传送后仍未成功传送, 该分组将被丢弃. 采用马尔可夫链对固定接入情况进

行建模, 该马尔可夫链含 $N+1$ 个状态, 其转移矩阵为:

$$P = \begin{bmatrix} 1 - P_F^{(1)} & P_F^{(1)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 - P_F^{(2)} & 0 & P_F^{(2)} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 - P_F^{(N)} & 0 & \dots & \dots & 0 & P_F^{(N)} \\ 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 $P_F^{(i)}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 表示第 $i+1$ 次之前的 i 次传送均失败的概率. 设分组长度为 L 比特, 当系统中有 k 个用户时, $P_F^{(i)}$ 为:

$$\begin{aligned} P_F^{(i)} &= P(\text{第 } i+1 \text{ 次传送成功/前 } i \text{ 次传送均失败}) \\ &= P(\text{第 } i+1 \text{ 次传送成功}) \\ &= 1 - (1 - P_b(k))^L \end{aligned} \quad (4)$$

该马尔可夫链存在稳态, 设其稳态分布为 $\pi \triangleq [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{N+1}]$, 由 $\pi = \pi P$ 可得到 π .

设 Y_i 为传送第 i 个分组所需要的时间(以分组长度为单位), 变量 Z_i 在第 i 个分组得到成功传送时为 1, 传送失败时为 0, 则得到固定接入时的状态转移如图 1 所示.

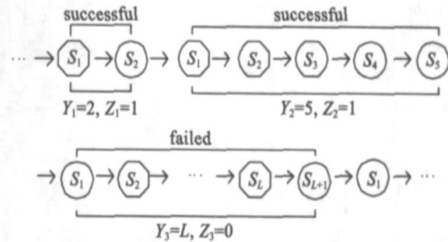


图 1 固定接入状态转移图 ($L \geq 5$)

显然对于任意的 i , Y_i 取正值, 且服从独立同分布, Z_i 也为独立同分布. 若将 S_1 的出现视作一次更新到达, 将 Y_i 视作两次更新之间的时间间隔, Z_i 视作在更新点得到的酬劳, 则上述马尔可夫链是一个离散时间更新酬劳随机过程.

对于离散时间更新酬劳随机过程^[6], 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n Z_n}{\sum_{i=1}^n Y_n} = \frac{E[Z_1]}{E[Y_1]} \quad (5)$$

对每一用户, 其吞吐量为:

$$\bar{T} \triangleq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n Z_n}{\sum_{i=1}^n Y_n} = \frac{E[Z_1]}{E[Y_1]} \quad (6)$$

令 $P_F = P_F^{(i)} = 1 - (1 - P_b(k))^L$, 则有:

$$\begin{aligned} E[Z_1] &= (1 - P_F^1 \cdot P_F^2 \cdot \dots \cdot P_F^N) \cdot 1 + P_F^1 \cdot P_F^2 \cdot \dots \cdot P_F^N \cdot 0 \\ &= 1 - P_F^1 \cdot P_F^2 \cdot \dots \cdot P_F^N \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} E[Y_1] &= 1 \cdot (1 - P_F) + 2 \cdot (1 - P_F) P_F + 3 \cdot (1 - P_F) P_F^2 + \dots + \\ &\quad (N-1) \cdot (1 - P_F) P_F^{N-2} + N \cdot [P_F^N + (1 - P_F) P_F^{N-1}] \\ &= \frac{1 - P_F^N}{1 - P_F} \end{aligned} \quad (8)$$

当有 k 个用户时, OCDMA 网络的吞吐量为:

$$T(k) = k\bar{T} \quad (9)$$

3.2 随机接入

假设整个网络的业务按 Poisson 律到达, 平均到达数为 λ ; 单个用户所申请的服务数(服务时间)为 S , S 是一个参数为 (α, β) 的重尾分布, 且:

$$P(S > s) = (\beta/s)^\alpha \quad (10)$$

其中 $s \geq \beta, 1 < \alpha < 2$.

该随机过程具有有限均值和无限方差, 是一个渐近自相似随机过程, 其均值为:

$$E[S] = \alpha\beta/(\alpha - 1) \quad (11)$$

排队论理论中的处理器共享系统模型可以很好地为多址接入问题建模. 在处理器共享系统中, 工作(Job)通过竞争得到处理器的服务时间, 显然, 工作量越大, 每一用户申请到的服务时间越少. 具体到 OCDMA 网络, 所有解码器组成的整体充当处理器的角色, 各不同用户的业务充当工作的角色. 设 $\Phi(k)$ 为网络中有 k 个用户时, 处理器在单位时间内可以向所有用户提供的服务数(以分组为单位), 处理器将这 $\Phi(k)$ 个服务平均分配给 k 个用户, 如果用户已经得到了它所请求的服务数, 则离开本系统.

根据处理器共享系统理论, 系统中的用户数 k 具有如下稳态分布^[6-8]:

$$p_k \triangleq P(k \text{ active users}) = p_0 \cdot \frac{(\lambda E[S])^k}{\prod_{u=1}^k \Phi(u)}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (12)$$

其中 $p_0 = \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\lambda E[S])^k}{\prod_{u=1}^k T(u)} \right]^{-1}$.

将处理器共享模型应用到 OCDMA 接入网, 可以看出, $\Phi(k) = T(k) (N$ 较小时, 可认为短时间内用户数无变化, 因此, 固定接入的结果可以应用到随机接入中), 而用户数上限为 U_m , 同时, 令 $\lambda' = \lambda E[S]$, 则:

$$p_k = P(k \text{ active users}) = p_0 \cdot \frac{(\lambda')^k}{\prod_{u=1}^k \Phi(u)}, \quad k = 1, 2, \dots, U_m \quad (13)$$

其中 $p_0 = \left[1 + \sum_{k=1}^{U_m} \frac{(\lambda')^k}{\prod_{u=1}^k T(u)} \right]^{-1}$.

所以, OCDMA 网络的稳态吞吐量为:

$$T_{av} \triangleq E[T(k)] = \sum_{k=1}^{U_m} T(k) \cdot p_k \quad (14)$$

用户的平均时延为:

$$D_{av} \triangleq \frac{E[k]}{T_{av}} \quad (15)$$

网络平均载荷为:

$$L_{av} = E[k] \quad (16)$$

定义系统的平均吞吐率 TR_{av} 为稳态吞吐量与平均载荷的比值, 即:

$$TR_{av} = \frac{T_{av}}{L_{av}} \quad (17)$$

在分析通信网业务时, 人们习惯假定业务的到达是一 Poisson 过程, 到达的时间间隔服从指数分布. 然而, 各国研究者对世界上的一些网络业务进行了测量分析后, 均发现实际网络业务具有统计上的自相似性^[9], 业务具有长时相关性, 而 Poisson 模型是短时相关的, 故自相似过程更能反映网络的真

实特性. 因此, 尽管这里着重于分析 OCDMA 网络的码字分配策略, 但所述的数学模型还可以用来分析 OCDMA 网络业务的自相似性对网络传输性能的影响.

4 结果分析和讨论

对采用文献[1]中提出的码字分配策略 2 和本文提出的码字分配策略 3 时, 网络在不同载荷下的吞吐率和时延进行了比较(分配策略 1 看作分配策略 3 在 $U_m \ll C$ 时的特例), 并分析了采用分配策略 3 时最大接入用户数 U_m 对网络性能的影响.

图 2 为 $N = 5, L = 1024, n = 137, w = 5$ 及 U_m 分别取 6, 12, 18 时两种策略的吞吐率关于网络载荷的曲线. 从图中可以看出: 当 U_m 为 6 时, 策略 2 和策略 3 的吞吐率基本相同, 此时各用户之间的干扰很小, 吞吐率接近 1; 当 U_m 取值为 12 和 18 时, 策略 3 (均匀分配策略) 的吞吐率均高于策略 2 (随机分配策略), 因此策略 3 比策略 2 更适合作为 OCDMA 网络的接入策略. 同时还可以看出, 对于这两种码字分配策略, 在载荷较小、 U_m 较大时吞吐率较低, 而载荷较大、 U_m 较小时吞吐率较低. 因此, 网络载荷小时 U_m 应较小, 网络载荷大时 U_m 应较大.

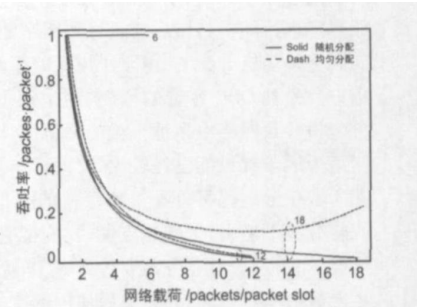


图 2 网络吞吐率关于载荷的曲线 $N=5, L=1024, n=137, w=5, U_m=6, 12, 18$

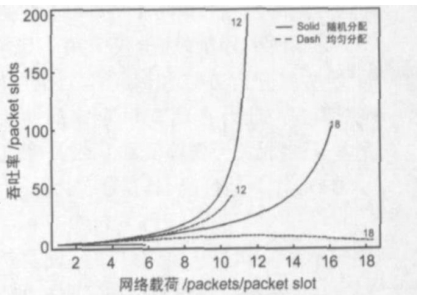


图 3 网络时延关于载荷的曲线 $N=5, L=1024, n=137, w=5, U_m=6, 12, 18$

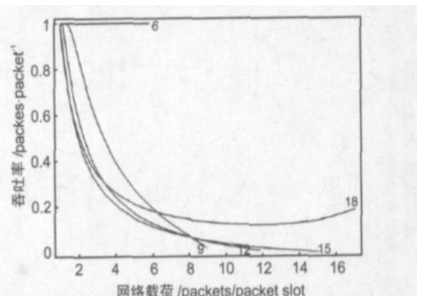


图 4 网络吞吐率关于载荷的曲线 $N=5, L=1024, n=137, w=5$ (最大用户数变化已标于图中)

图 3 为 $N = 5, L = 1024, n = 137, w = 5$ 时, 两种策略的时延关于网络载荷的曲线. 从图中可以看出, 使用策略 3 比策略 2 的时延要小, 这也证实了吞吐率较大则时延较小, 吞吐率较小时延较大的结论.

图 4 为 $L = 5, M = 1024, n = 137, w = 5$ 时, 吞吐率关于载荷随最大用户数变化的曲线. 由图可见, 当 U_m 不同时, 系统的吞吐率在相同载荷之下也在变化. 因此网络载荷不同时, 应该选取适当的 U_m , 使网络的吞吐率性能达到最优. 总的趋势是: 当载荷较大

时, U_m 应该较大; 当载荷较小时 U_m 应该较小

5 结束语

由于 OCDMA 技术具有异步接入、动态分配带宽、对业务和协议透明、良好的传输安全性、低成本、组网灵活等优点, 在光网络, 特别是接入网中具有广阔的应用前景. 对 OCDMA 用户地址码字的分配策略会直接影响网络中的用户数和同时用户数及网络性能.

本文提出了一种新的 OCDMA 用户地址码的分配策略, 并采用新的数学模型——处理器共享系统, 对网络的稳态吞吐率和平均时延进行了仿真计算, 结果表明, 所提出的码字分配策略在性能上优于文献中已提出的两种策略. 同时, 采用处理器共享系统模型, 分析了接入用户数对网络性能的影响, 该模型比已采用的分析模型相对简单, 且仿真结果与实际情况十分吻合. 处理器共享模型可以用来为 OCDMA 网络建模, 对于 OCDMA 网络的分析与设计具有重要的参考意义.

参考文献:

- [1] Hossam M H Shalaby. Optical CDMA random access protocols [A]. IEEE 8th International Symposium on Computers and Communication Proceedings [C]. Antalya: IEEE Computer Society, 2003, 2: 907–912.
- [2] Hossam M H Shalaby. Optical CDMA random access protocols with and without pretransmission coordination [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(11): 2455–2462.
- [3] Hossam M H Shalaby. Performance analysis of an optical CDMA random access protocol [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(5): 1233–1241.
- [4] Hossam M H Shalaby. A proposal of an optical CDMA random access protocol [A]. IEEE 2004 International Conference on Communications [C]. Paris: IEEE Communications Society, 2004, 3: 1709–1713.

- [5] F R K Chung, J A Salehi, V K Wei. Optical orthogonal codes: Design, analysis, and applications [J]. IEEE Trans Inform Theory, 1989, 35(3): 595–604.
- [6] R G. Gallager. Discrete Stochastic Processes [M]. New York, Klumer Academic Publishers, 1996: 69–75.
- [7] I E Telatar, R G. Gallager. Combining queuing theory with information theory for multi access [J]. IEEE J. Select. Areas Commun, 1995, 13(6): 963–969.
- [8] F P Kelly. Reversibility and Stochastic Networks [M]. New York, John Wiley and Sons, 1979: 72–80.
- [9] Walter Willinger, Murad S. Taqqu, Robert Sheman, and Daniel V. Wilson. Self similarity through high variability: Statistical analysis of internet LAN traffic at the source level [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1997, 5(1): 71–86.

作者简介:



孙淑蓉 女, 1981 年 6 月出生于湖北省天门市. 2003 年毕业于南京邮电大学信息工程系, 现为北京大学信息科学技术学院硕士研究生, 研究方向为光网络与光码分多址技术.



殷洪玺 男, 1959 年 9 月出生于山东省临沂市. 博士后, 北京大学信息科学技术学院副教授, 主要从事光纤通信、WDM 光网络、光分组交换网、自动交换光网络和光码分多址等方面的教学与科研工作. 在国内外重要学术期刊和学术会议发表论文 50 余篇. 通信作者.
E-mail: yhx@ele.pku.edu.cn