

## 无线光CDMA接入网的网络吞吐量研究

付志明, 么周石, 谭庆贵, 胡 渝

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

**【摘要】**根据无线光通信和无线接入技术的特点,给出了无线光CDMA接入网的分槽ALOHA-CDMA协议,并分析了无线光CDMA接入网的吞吐量性能。在考虑多用户干扰、背景光噪声、接收机噪声等多种干扰噪声的条件下,给出了无线光CDMA接入网的网络吞吐量数学模型,并采用光正交码OOC作为地址码,分析了基于此MAC协议的无线光CDMA接入网的网络吞吐量。数值计算结果表明,分槽ALOHA-CDMA协议可以具有较高的网络吞吐量。此外,通过减小分组长度或增大光地址码的码长,可进一步提高网络的吞吐能力。

**关键词** 接入网; 媒质接入控制; 吞吐量; 控制无线光码分多址  
**中图分类号** TN 918; O332 **文献标识码** A

## Research on Throughput of Wireless Optical Code-Division Multiple-Access in Access Network

FU Zhi-ming, YAO Zhou-shi, TAN Qing-gui, HU Yu

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** Based on wireless optical communication characteristics and wireless access techniques, the Media Access Control (MAC) protocol in wireless optical code division multiple access network is presented and studied. In the analysis, background noise, multi-access interference, Avalanche Photo Diode (APD) noise, and thermal noise are taken into account. With Optical Orthogonal Code (OOC), the mathematic model of network throughput is derived and evaluated according to numerical results. Simulation results indicate this MAC protocol can obtain high network throughput. Furthermore, with shorter packet length or longer code length, a better network throughput is obtained.

**Key words** access network; MAC; throughput; wireless optical CDMA

近年来,随着光通信器件逐步成熟以及大量关键技术被突破,无线光通信技术已成为当前热点,并逐渐进入了商用化发展阶段。无线光通信具有的设备体积小、重量轻、宽带性、无电磁干扰性、无需申请政府批准、安装快捷及组网灵活等优点,特别是市政建设基本定形,新设光纤的施工需要繁琐的市政批准以及地理位置限制,以及施工难度大,施工周期长,使无线光通信成为解决最后一公里宽带接入和实现全球个人通信的最佳方案之一。

在无线光接入网中,可采用的多址接入方式有:波分多址(Wavelength Division Multiple Access, WDMA)、时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)、码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)、空分多址(Space Division Multiple Access,

SDMA)。与其他几种多址方式相比,CDMA具有抗干扰能力强、频率利用率高、保密性好、网络协议简单、支持随机接入等优点,将其应用到无线光接入网中,不仅具有CDMA技术的优点,又保持了无线光通信的优点,实现了二者的优势互补。<sup>[1-5]</sup>

目前,人们对无线光CDMA接入网的研究主要集中在物理层,即各种地址码的构造和编解码器的设计以及对系统的误码率性能进行分析<sup>[1-3]</sup>,而对数据链路层的媒质接入控制(Media Access Control, MAC)协议以及网络性能研究还未见公开报道。本文在分析了接入控制协议纯ALOHA和分槽ALOHA特点的基础上,论述了分槽ALOHA-CDMA接入协议的思想,根据该协议推导出网络吞吐量的数学模型,并给出仿真结果,分析了网络吞吐量性能。

收稿日期: 2005-07-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60272006)

作者简介: 付志明(1980-),男,硕士,主要从事无线光CDMA网络方面的研究。

## 1 媒质接入控制(MAC)协议

在接入网中, MAC协议至关重要, 它直接影响到网络的性能(吞吐量、时延)、带宽利用效率、终端设备的复杂度和成本。ALOHA协议是一种典型的用于无线接入的随机多址协议。它具有简单、时延短的优点, 但信道利用率不够理想。纯ALOHA的最大信道吞吐率只有18%, 分槽ALOHA的最大信道吞吐率也只有36%。如果将分槽ALOHA协议和光CDMA技术结合起来, 利用地址码的正交特性来获得多个用户同时接入信道, 可大大提高信道的吞吐率。分槽ALOHA-CDMA协议的思想是把信道划分成多个时隙, 用户在每个时隙的开始时刻发送分组, 待发送的分组经过光编码器进行扩频编码再发送出去。网络中每个用户拥有一个独特的光正交码(Optical Orthogonal Code, OOC)<sup>[7-10]</sup>, 每个用户采用可调谐发射固定接收(Tunable Transmitter Fixed Receiver, TTFR)工作模式。当网络中用户想给某个用户发送数据时, 把发射机编码器调谐到目的用户地址码即可, 接收端成功收到数据后发送确认信息。分槽ALOHA-CDMA协议通过给用户分配不同的光正交码OOC, 允许多个用户同时使用信道而不产生冲突, 与ALOHA协议相比, 分槽ALOHA-CDMA接入协议具有信道利用率高和时延小的优点。

## 2 网络吞吐量理论分析

根据上述的MAC协议, 对无线光CDMA接入网的吞吐量进行理论分析, 为了便于推导出网络吞吐量数学模型, 作以下假设: (1) 系统中共有  $N$  个用户, 每个用户有空闲态和阻塞态两种状态, 在空闲状态下, 用户以概率  $p_0$  发送新数据包, 数据包发送失败后进入阻塞状态, 用户以概率  $p_r$  发送旧数据包。(2) 数据包等长, 由  $K$  个比特组成, 且  $T_{\text{packet}} = T_{\text{slot}} = KLT_c$ , 其中  $L$  为码长;  $T_c$  为地址码的码片间隔。(3) 不考虑多个用户同时用相同的地址码发数据。

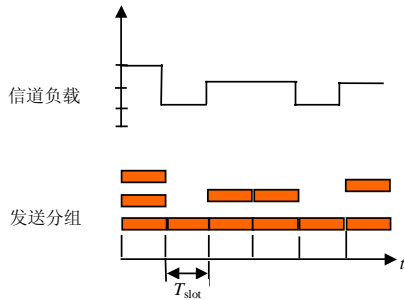


图1 分槽ALOHA-CDMA系统信道负载模型

分槽ALOHA-CDMA系统信道负载模型如图1所示, 在第  $j$  个时隙处, 到达的数据包为  $M_j$  个, 它由新产生的数据包和重传的数据包组成。假设在某一给定时隙中, 阻塞的用户数为  $n$ , 则提供负载  $G(n)$  和网络吞吐量  $\beta(n)$  分别为<sup>[6]</sup>:

$$G(n) = (N - n)p_0 + np_r \quad (1)$$

$$\beta(n) = \sum_{j=0}^{N-n} \sum_{i=0}^n (i + j)P_s(i + j)P_1(i|n)P_2(j|n) \quad (2)$$

式中  $P_s(m)$  为在同时发送  $m$  个分组条件下, 分组成功发送概率;  $P_1(i|n)$  为在  $n$  个阻塞用户的条件下, 有  $i$  个用户重发数据包的概率;  $P_2(j|n)$  为在  $n$  个阻塞用户的条件下,  $N - n$  个空闲用户中有  $j$  个用户发送新数据包, 且:

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

$$P_2(j|n) = \binom{N-n}{j} p_0^j (1 - p_0)^{N-n-j} \quad (4)$$

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

式中  $P_b(m)$  是发送  $m$  个数据包时系统的误码率。

本文只考虑多用户干扰、背景光噪声、APD噪声和热噪声对误码率的影响, APD的输出可近似看成高斯分布<sup>[5]</sup>。  $P_b(m)$  表达式为:

$$P_b(m) = \frac{1}{2} \sum_{I_1=0}^{m-1} \binom{m-1}{I_1} \left( \frac{W^2}{2L} \right)^{I_1} \left( 1 - \frac{W^2}{2L} \right)^{m-1-I_1} \times \left\{ Q \left( \frac{\text{th} - \mu_0}{\sigma_0} \right) + Q \left( \frac{\mu_1 - \text{th}}{\sigma_1} \right) \right\} \quad (6)$$

式中  $\sigma_1^2$ 、 $\sigma_0^2$  分别是“1”和“0”码时APD输出的方差;  $\mu_0$ 、 $\mu_1$  分别是“0”和“1”码时APD输出的均值;  $I_1$  为干扰用户数;  $\text{th}$  为接收机的判决门限;  $W$  为OOC的码重, 且:

$$\mu_0 = GT_c(I_1\lambda_s + (WN - I_1)\lambda_s / M_e + L(\lambda_b + I_b / e)) + LT_c I_s / e \quad (7)$$

$$\sigma_0 = G^2 F_e T_c (I_1\lambda_s + (WN - I_1)\lambda_s / M_e + L(\lambda_b + I_b / e)) + L(T_c I_s / e + \sigma_{\text{th}}^2) \quad (8)$$

$$\mu_1 = GT_c((W + I_1)\lambda_s + (WN - (W + I_1)\lambda_s / M_e + L(\lambda_b + I_b / e)) + LT_c I_s / e \quad (9)$$

$$\sigma_1 = G^2 F_e T_c ((W + I_1)\lambda_s + (WN - (W + I_1)\lambda_s / M_e + L(\lambda_b + I_b / e)) + L(T_c I_s / e + \sigma_{\text{th}}^2) \quad (10)$$

式中  $\lambda_s$  为地址码序列中发送光脉冲时的光子吸收率;  $\lambda_s = \eta P / hf$  ( $P$  为接收光功率,  $h$  为普朗克常数,

$f$  工作光频率);  $F_e$  为剩余噪声因子,  $F_e = k_{\text{eff}}G + (2 - 1/G)(1 - k_{\text{eff}})$ ;  $k_{\text{eff}}$  为 APD 的有效电离子率;  $\sigma_{\text{th}}^2$  为热噪声方差,  $\sigma_{\text{th}}^2 = 2k_B T_r T_c / e^2 R_L$ , 其他参数如表1所示。

表1 系统参数及取值

系统参数	取值
波长 $\lambda/\text{nm}$	1 550
APD 量子效率 $\eta$	0.60
APD 增益 $G$	100
有效电离子率 $k_{\text{eff}}$	0.02
APD 体漏电流 $I_b/\text{nA}$	0.10
APD 面漏电流 $I_s/\text{nA}$	10
背景噪声 $P_b/\text{dBm}$	-45
消光比 $M_c$	100
数据速率 $P_b/\text{Mb}\cdot\text{s}^{-1}$	155
接收机的噪声温度 $T_r/\text{K}$	1 100
接收机的负载电阻 $R_L/\Omega$	1 020

为获得网络的稳态吞吐量, 采用离散时间马尔可夫链描述分槽ALOHA-CDMA系统, 根据阻塞用户数  $n \in \{0, 1, \dots, N\}$ , 系统共有  $N + 1$  个状态,  $P_{nm}$  为从状态  $n$  转移到状态  $m$  的状态转移概率。当系统处于状态  $n$  时, 有  $k$  个空闲用户和  $l$  个阻塞用户激活, 则系统中有  $n - l$  个用户仍处于阻塞态。因此, 当系统从状态  $n$  转移到状态  $m$  时,  $k + l$  个发送数据的用户中有  $m - (n - l) = l + m - n$  个用户发送失败, 剩下  $k + l - (l + m - n) = k - m + n$  个用户发送成功, 得到  $P_{nm}$  的表达式为:

$$P_{nm} = \sum_{l=0 \vee (n-m)}^n \sum_{k=0 \vee (m-n)}^{N-n} P_1(l|n)P_2(k|N-n) \times \binom{k+l}{k-m+n} P_S^{k-m+n} (k+l)(1-P_S)^{l+m-n} \quad (11)$$

式中  $x \vee y$  定义为  $x$  和  $y$  二者中的最大者。定义  $\pi_n$  为马尔可夫链中的稳态概率, 可以由式(12)、(13)联立解出:

$$\sum_{n=0}^N \pi_n = 1 \quad (12)$$

$$\sum_{n=0}^N \pi_n P_{nm} = \pi_m \quad m \in \{0, 1, \dots, N\} \quad (13)$$

稳态吞吐量  $\beta$  的表达式为:

$$\beta = \sum_{n=0}^N \beta(n)\pi_n \quad (14)$$

$$G = \sum_{n=0}^N [(N-n)p_0 + np_r] \pi_n \quad (15)$$

### 3 数值结果和分析

在仿真中取  $p_0 = p_r$ 。根据式(14)和式(15), 本文给出了网络吞吐量随提供负载变化的曲线图, 如图2、图3、图4所示, 其部分参数的取值如表1所示。为了方便比较, 也给出了ALOHA协议的仿真曲线图。从图2可看出与ALOHA协议相比, 分槽ALOHA-CDMA接入协议的网络吞吐性能大幅度提高; 但当网络负载较重时, 网络的吞吐性能也迅速下降。这是因为负载较重的时候, 多用户干扰更严重, 导致分组发送成功的概率大大降低, 网络吞吐性能下降。

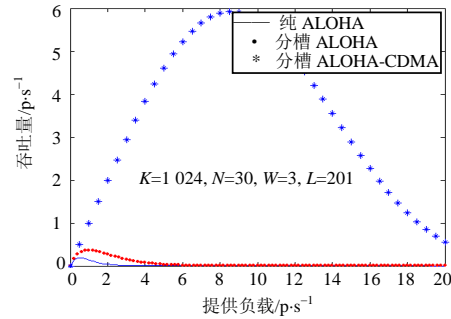


图2 在不同接入协议条件下, 网络吞吐量性能曲线图

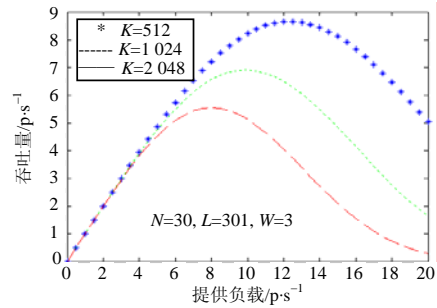


图3 在不同分组长度条件下, 网络吞吐量性能曲线图

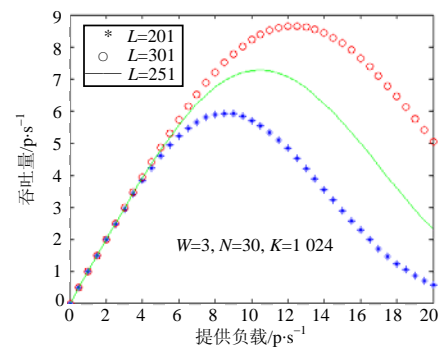


图4 在不同码长条件下, 网络吞吐量性能曲线图

图3所示为用户数 $N=30$ , 码长 $L=301$ , 码重 $W=3$ , 分组长度 $K=512$ 、 $1\ 024$ 、 $2\ 048$ 时网络吞吐量随提供负载变化的曲线图。当网络提供负载较小时, 网络吞吐量受分组长度的影响很小; 当提供负载较大时, 分组长度越小, 网络的吞吐性能越好。因为当负载低时, 分组间的多用户干扰很小, 分组长度对吞吐性能影响很小; 当负载高时, 分组间多用户干扰严重, 分组长度越小, 分组发送成功的概率就越大, 网络吞吐性能就越好。

图4是 $N=30$ ,  $W=3$ ,  $K=1\ 024$ ,  $L=201$ 、 $251$ 、 $301$ 时, 网络吞吐量与提供负载之间的曲线图。当网络提供负载较小时, 网络吞吐性能几乎一样; 当网络提供负载较大时, 网络吞吐性能随着码长的增大而提高。因为码长越大, 地址码间相互碰撞的概率就越小, 因而分组发送成功的概率就越大, 网络吞吐性能就越好。同时增大码长可增加网络用户数, 但由于器件原因, 码长太长会使得有效发送数据的速率下降, 因此二者需综合考虑。

#### 4 结束语

本文研究了一种适合无线光接入网的分槽ALOHA-CDMA协议, 在考虑多用户干扰, 背景光噪声和接收机噪声的情况下, 推导出网络吞吐量数学模型, 并进行仿真。结果表明该MAC协议可以取得较高的网络吞吐量, 减小分组长度或增加光地址

码的码长可进一步提高网络的吞吐性能。

#### 参考文献

- [1] TOMOAKI O. Performance analysis of atmospheric optical PPM CDMA systems[J]. J. Lightwave Technology, 2003, 21(2): 406-411.
- [2] 谭庆贵, 胡渝. 空间光CDMA系统研究[J]. 光通信技术, 2004, 28(117): 4-6.
- [3] SAYANO K, NGUYEN I, CHA J K. Demonstration of multi-channel optical CDMA for free space communication[J]. Proc. SPIE, 2001, 4272: 39-49.
- [4] CHUNG F R K, SALHALE J A, WEI V K. Optical orthogonal codes: Design, analysis, and applications[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1989, 35(3): 595-604.
- [5] KWON H M. Optical orthogonal code-division multiple-access system I APD noise and thermal noise[J]. IEEE Transactions on Communications, 1994, 42(7): 2470-2479.
- [6] 李在铭, 张全芬, 李晓峰. 随机信号分析及工程应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1990.
- [7] 张宝富, 万谦. 光码分多址(OCDMA)系统误码性能研究[J]. 通信学报, 2003, 24(5): 79-84.
- [8] 刘忠英, 万谦, 张宝富. 光纤CDMA系统中光编解码器的优化设计方法[J]. 通信学报, 2002, 23(2): 66-71.
- [9] 谭庆贵, 胡渝, 万生鹏. 一种二维光CDMA地址码的构造及实现方法[J]. 应用光学, 2005, 26(1): 16-19.
- [10] XIN Y, YU Chong-xiu, WU Qiang, et al. Quadratic congruence-based codes in frequency domain for optical CDMA system[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(11): 1352-1354.

编辑 张俊