

异步 OCDMA 系统信道容量研究

周秀丽^① 杨华军^① 马君显^②

^①(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

^②(深圳大学信息工程学院 深圳 518060)

摘要: 为研究异步光码分多址(OCDMA)系统的信道容量,模拟系统为离散无记忆信道信息传输模型,计算了系统的信息容量。在理论信息容量限为1 bit/chip 条件下,计算得到理想无噪信道单用户检测OCDMA系统的总容量随着用户数的增加有所下降,但在用户数较多时基本保持在0.75 bit/chip的水平;高斯白噪声(AWGN)信道条件下,用户数较多时,系统总的吞吐容量限下降不大,基本保持在0.71bit/chip-0.75 bit/chip的水平。在用户数较少时,理想信道的信号输入概率偏离0.50越大,系统容量限越低;AWGN信道在低噪声方差下,用户数小的系统能达到较高的容量限。由此推证了异步OCDMA 系统在单用户检测下的理论信息容量限。

关键词: 光码分多址 (OCDMA); 信息容量; 加性高斯白噪声(AWGN)信道; 多用户干扰

中图分类号: TN914.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)11-2606-03

Capacity Research of Asynchronous OCDMA System

Zhou Xiu-li^① Yang Hua-jun^① Ma Jun-xian^②

^①(School of Physical Electronics, UEST of China, Chengdu 610054, China)

^②(College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: To research the information capacity of the Asynchronous Optical Code Division Multiple Access (OCDMA) system, the system model and its implementation under ideal channel and AWGN channel optical communications are presented. We modeled a discrete memoryless channel OCDMA system and evaluated the aggregate capacity from the probability of the output signal at the chip level. On the condition that the information capacity limited by 1 bit per chip, the results show that the interference caused by asynchronism reduces the capacity limit as the number of users increases, but for a sufficiently large number of users, both the ideal and the AWGN channel throughput limit varies slowly and the limit is around 0.71-0.75 bit/chip. With less number of users of the ideal channel, the more the input probability is lower than 0.50, the lower the largest capacity limit will be. With low noise variance of the AWGN channel, the system with smaller users can attain higher capacity limit. So the information capacity of the asynchronous OCDMA is gotten.

Key words: Optical Code Division Multiple Access (OCDMA); Information capacity; Additive White Gaussian Noise (AWGN) Channel; Multiple Access Interference (MAI)

1 引言

近年来,光通信技术得到快速的发展,随着各种宽带的新型信息业务大量涌现,需要更充分利用光的宽频带资源。为此提出采用复用技术,其中光码分多址(Optical Code Division Multiple Access, OCDMA)技术通过给用户分配相互正交的地址码实现多址接入,以其所有用户可以同时享用相同的带宽资源等特点而成为光通信中很有发展潜力的一种多址技术。

对 OCDMA 技术的研究^[1-5]表明:OCDMA 系统是干扰受限的系统,系统容量不但与编码方案提供的码序列数有

关,还与干扰直接相关,因此对系统容量的研究是对 OCDMA 技术进行研究的问题之一。本文针对该技术,结合理想无噪声信道和加性高斯白噪声(AWGN)信道特点,对异步 OCDMA 系统进行分析,研究 OCDMA 系统在单用户检测下的理论信息容量限。

2 OCDMA 系统模型

OCDMA 系统结构包括发射模块和接收模块,分别如图 1 和图 2 所示。在发送端,来自光源的光信号由 OCDMA 编码器进行编码, n 路信号经编码后耦合到光纤,在光纤进行放大,最后,放大后的光信号通过光纤传输。在接收端,信号经过放大,然后进入解耦合器,分离信号到各解码器;最后,信号被送到检波器,经信号处理,用户获得需要的信号。该发射模块,接收模块和信道构成了 OCDMA 系统。

2006-08-09 收到,2007-03-19 改回

国家自然科学基金(60372088)和电子科技大学青年基金(JX05021)资助课题

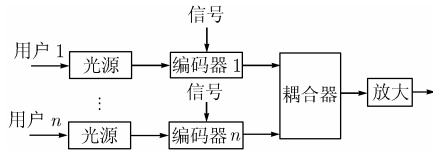


图 1 OCDMA 发送模块

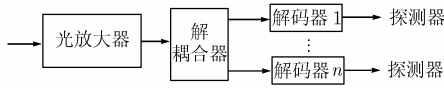


图 2 OCDMA 接收模块

3 单用户检测下 OCDMA 系统信道容量分析

3.1 理想无噪声信道 OCDMA 系统信道容量分析

在以上的OCDMA系统中,所有用户在信道中各自以概率 q 和 $1-q$ 传送数据信号 1 和 0,模拟该传输过程为离散无记忆信道(Discrete Memoryless Channel, DMC)模型。在接收端,采用直接探测接收系统,在此忽略接收机中的量子噪声和热噪声等的影响,等功率传输下只考虑多用户之间的干扰(Multiple Access Interference, MAI),对有 N 个用户的情况,异步OCDMA系统采用互相关为1的地址码,DMC有两个输入 $X \in (0,1)$, $N+1$ 个输出,信道可以用一个条件概率矩阵表示为^[6]

$$P_{Y|X} = \begin{bmatrix} \beta_0 & \beta_1 & \dots & \beta_{N-1} & 0 \\ 0 & \beta_0 & \beta_1 & \dots & \beta_{N-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\beta_i = \binom{N-1}{i} q^i (1-q)^{N-1-i} \quad (2)$$

基于该模型,计算DMC的Shannon容量,输出信号的概率密度为

$$P_Y(y) = \binom{N}{y} q^y (1-q)^{N-y} \quad (3)$$

因此理想无噪声信道情况下,DMC信道的互信息量可表示为^[6]

$$I_{\text{noiseless}}(X:Y) = -\sum_{i=0}^N \binom{N}{i} q^i (1-q)^{N-i} \cdot \log_2 \left[\binom{N}{i} q^i (1-q)^{N-i} \right] + \sum_{i=0}^{N-1} \binom{N-1}{i} q^i (1-q)^{N-1-i} \cdot \log_2 \left[\binom{N-1}{i} q^i (1-q)^{N-1-i} \right] \quad (4)$$

该计算基于单用户传输,且假定独立于其他用户情况下工作用户采用单用户检测, N 个用户的总信息量为

$$C = N \sup_{q \in (0,1)} I(X,Y) \text{ bit per chip} \quad (5)$$

式(5)表示异步OCDMA系统的总互信息量和用户数及概率 q 之间的关系,当系统中只有一个用户时,该OCDMA信道缩减为二进制对称信道,和时分复用系统一样,信道容量为每码片1比特。

图3示出一个50个用户的OCDMA系统,信道的总互信息量为传输概率 q 和用户数 N 的函数关系,图中表明用户数,信号发送1的概率 q 和系统吞吐量之间的关系。由图可见,随着用户数的增加,异步干扰使得理论容量降低,当用户数增加到30以后,容量随用户数增加变化缓慢,基本保持在每码片0.75bit左右。在 $q = 0.5$ 时,图中未出现最大容量值,但在用户数较少时,出现一个不稳定的峰值,之后随着用户数的增加,系统效率基本保持的在一个相对平衡的水平。

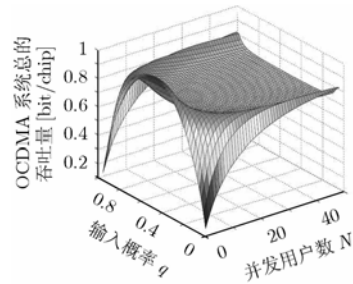


图3 异步OCDMA系统容量和输入概率 q 及用户数 N 的关系

3.2 AWGN 信道 OCDMA 系统信道容量分析

考虑 OCDMA 系统信道为加性高斯白噪声信道,离散输入 X , 离散输出 Y , 来研究系统性能。则互信息量由式(4)调整为

$$I_{\text{AWGN}}(X:Y) = -\int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{i=0}^N \binom{N}{i} q^i (1-q)^{N-i} N(y,i,\sigma^2) \right] \cdot \log_2 \left[\sum_{i=0}^N \binom{N}{i} q^i (1-q)^{N-i} N(y,i,\sigma^2) \right] dy + \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{j=0}^{N-1} \binom{N-1}{j} q^j (1-q)^{N-1-j} N(y,j,\sigma^2) \right] \cdot \log_2 \left[\sum_{j=0}^{N-1} \binom{N-1}{j} q^j (1-q)^{N-1-j} N(y,j,\sigma^2) \right] dy \quad (6)$$

其中高斯概率密度函数均值 μ 和方差 σ^2 由式(7)给出:

$$N(y,\mu,\sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

图 4 示出在 $q = 0.5$ 时, OCDMA 系统 AWGN 信道,用户数为 1, 5, 10 下的最大信道容量和噪声方差的关系。

由图 4 曲线变化趋势可见,低噪声方差下,用户数小的系统能达到较高的容量限,即具有更高的信道容量。随着噪声方差的增大,多用户以及较少用户的系统,信道容量都有所下降,这时系统从多址干扰系统转为噪声系统模型。在用

户数较少时,多址干扰微弱,噪声的影响更为明显。随着网络系统中用户数的增加,噪声的影响相对较弱。

对异步接入 OCDMA 系统来说,该系统属于突发系统,当系统中只有一个用户时,其信号功率和噪声功率相比,噪声效应就比较突出。而随着用户数的增加,整个系统中传输数据的总功率也在增加,同时,多址效应也明显起来,此时的噪声效应不再是主要矛盾。

对无噪声的理想信道模型,在不同的数据输入概率 q 下,信道中的互信息量取决于系统中的用户数。这里对 AWGN 信道的研究表明其互信息量和噪声方差、用户数均有关。

图 5 示出在 20 个用户的 OCDMA 系统中,噪声方差为 0.2 和 0.05 条件下,系统总的吞吐容量限和输入概率分布的关系。由分布曲线变化趋势可见,随着噪声方差的增加,输入概率远离于 $q = 0.5$ 时,系统总的吞吐能力急剧下降。这表明等概输入 OCDMA 信道的突发性。

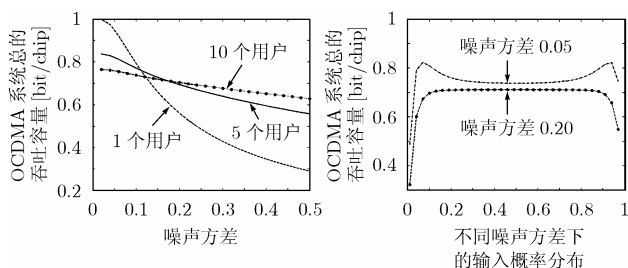


图 4 数据等概输入,不同用户数下系统容量限和噪声方差的关系

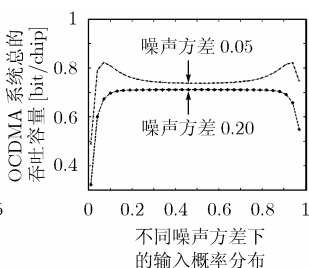


图 5 20 个用户下, OCDMA 系统吞吐容量和不同的噪声方差及不同输入概率分布的关系

基于以上的分析可见,噪声因素对 OCDMA 系统的信道容量产生了一定程度的影响。但从分布曲线可见,和考虑噪声的信道条件比较,系统总的吞吐容量限下降不大,由此可以得到这样的结论:在有较大用户数的系统中,理想信道模型和 AWGN 信道模型得到的结果相似,因此对有大量并发用户数的 OCDMA 系统,其信道容量可由理想模型代替。

4 结束语

本文针对异步 OCDMA 系统,模拟离散无记忆信道信息传输,对理想无噪声信道和 AWGN 信道条件,单用户检测下考虑多用户之间的干扰,对系统容量进行了分析。计算了在以不同输入概率 q 进行数据信号传输下系统的信息量,得到了理想无噪声信道条件下用户数和不同 q 下 OCDMA 系统的总吞吐容量;计算了数据等概输入,不同用户数下系统容量限和噪声方差的关系,及在一定用户数下, OCDMA 系统吞吐容量和不同的噪声方差及不同输入概率分布的关系。计算结果表明单用户检测异步 OCDMA 系统的容量限随着用户数的增加有所下降,但在用户数较多时, AWGN 信道容量较理想无噪声信道容量下降不大,理想信道和 AWGN 信道的信道容量基本保持在每码片 0.71-0.75

bit/chip 的水平。该结论为对 OCDMA 技术在大容量全光网络中的进一步研究奠定了基础。

在保证一定误码率(如 $P_e = 10E - 09$)条件下,各种不同的编码方案支持的并发用户数不同,现有的一维光正交码^[7],素数码(Prime Code, PC)^[8],以及在一维基础上构造的时域扩频/频域跳频二维地址码 PC/PC^[8], Prime/OOC^[9]等,在综合考虑了误码率,噪声等因素后都不能达到以上计算的 OCDMA 的理论容量限。因此构造大容量的地址码仍然是 OCDMA 系统充分发挥其优势需要进一步研究的关键问题,需要进而建立系统中存在干扰噪声的噪声分布模型,考虑不同的编码方案进行分析研究。

参考文献

- [1] 周秀丽, 胡渝. 基于 MQC 的谱幅编码 OCDMA 系统研究[J]. 光电子·激光, 2005, 6(6): 702-705.
 - [2] 周秀丽, 谭庆贵, 胡渝. 基于 R-S 码的二维 OCDMA 系统研究[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(1): 31-34.
Zhou Xiu-li, Tan Qing-gui and Hu Yu. Investigation of 2-D OCDMA system based on R-S code, *Journal of the University of Electronic Science and Technology of China*, 2004, 33(1): 31-34
 - [3] Salehi J A and Brackett C A. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks. II. Systems performance analysis. *IEEE Transactions on Communications*, 1989, 137 (8): 834-842.
 - [4] Fathallah H, Rusch L A, and LaRochelle S. Passive optical fast frequency-hop CDMA communications system, *Lightwave Technology*, 1999, 17(3): 397-405.
 - [5] Prucnal P R, Santoro M A, and Sehgal S K. Ultrafast all-optical synchronous multiple access fiber network. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1986, 4(9): 1484-1493.
 - [6] Zhou Xiu-li, Hu Yu, and Tan Qing-gui, et al. Capacity research of OCDMA system in intersatellite communication. 2004 International Conference on Communications, Circuits and Systems, Chengdu, China, Jun 27-29 2004, 1: 209-213.
 - [7] Chung F R K, Salehi J A, and Wei V K. Optical orthogonal code design, analysis, and applications. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1989, 35(3): 595-604.
 - [8] Wen J H, Lin J Y, and Liu C Y. Modified prime-hop codes for optical CDMA systems. *IEE Proceedings-Communications*, 2003, 150(5): 404-408.
 - [9] Wan S P and Hu Y. Two-dimensional optical CDMA differential system with prime/OOC codes. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(12): 1373-1375.
- 周秀丽: 女, 1971年生, 博士, 副教授, 目前研究方向为光通信技术、微纳光学材料等。
杨华军: 男, 1966年生, 教授, 目前研究方向为光通信技术、光信息处理等。
马君显: 男, 1961年生, 博士, 教授, 目前研究方向为光通信技术、微纳传感等。