

# 时隙 ALOHA DS/CDMA 系统与 多载波时隙 ALOHA 系统吞吐性能的比较研究<sup>1</sup>

焦文华 梁庆林

(北京大学电子学系 北京 100871)

**摘要** 该文对同样带宽下时隙 ALOHA DS/CDMA 系统和多载波时隙 ALOHA 系统的吞吐量进行了理论计算、比较和仿真。结果表明,在总负载较大时,采用高纠错能力的时隙 ALOHA DS/CDMA 系统可以在吞吐量上有更好的性能,但若网络负载过重,时隙 ALOHA DS/CDMA 系统的吞吐性能较多载波时隙 ALOHA 的系统下降快;码字总数受限会带来码字选择的冲突,从而降低系统的吞吐性能。

**关键词** 时隙 ALOHA DS/CDMA, 多载波时隙 ALOHA, 吞吐性能

**中图分类号** TN914.4

## 1 引言

在通信系统的媒质访问控制协议中,带宽一定,通常有两种时隙 ALOHA 方案可供选择。一种方案是在特定的时隙中,各个用户随机选择扩频码,在码分信道间竞争接入,这就是时隙 ALOHA DS/CDMA(以下简称 S-ALOHA-DS/CDMA)接入方案。另一种方案是把信道在频域上分为多个窄带子信道,这些子信道既可以采用传统的频分复用方法(整个频带划分为互不重叠的子信道),也可以采用正交频分复用(各子载波有重叠,但保持正交);对于后者,在特定的时隙中,各个用户在子信道间竞争传输分组,这就是多载波时隙 ALOHA(以下简称 MC-S-ALOHA)方案。计算并比较这两种方案的性能是具有实用意义的课题。

在 S-ALOHA-DS/CDMA 中,若每个发送用户有唯一的扩频码字,不同的发送方使用不同的扩频码来以时隙 ALOHA 方式发送信息,则称为基于发送方的扩频传输协议(T-SSA),它的特点是没有码字选择的冲突;若系统中的码字总数受限于接收方的解调器总数  $K_{total}$ ,各个发送方在码集中竞争码字传送分组,则称为基于接收方的扩频传输协议(R-SSA),它的特点是可以节省码字数,减少码字的同步时间,但有可能出现码字竞争冲突。在 MC-S-ALOHA 中,假设有  $N$  个窄带时隙 ALOHA 并行正交子信道,这些子信道的带宽之和等于 CDMA 系统的带宽。忽略热噪声的影响及载波间的干扰,则可以在时隙 ALOHA 方案中不采用纠错编码。

在本文中,第 2 节分析和计算了 S-ALOHA-DS/CDMA 系统的吞吐量;第 3 节分析和计算了 MC-S-ALOHA 网络的吞吐量。第 4 节对这两种系统的性能进行比较和总结,第 5 节为结论。

## 2 S-ALOHA-DS/CDMA 系统吞吐量计算

### 2.1 系统模型及分组成功传输概率的计算

设第  $k$  个用户的扩频调制信号的表达式为<sup>[1]</sup>:

$$s_k(t - \tau_k) = \sqrt{2P}b_k(t - \tau_k)a_k(t - \tau_k)\cos(\omega_c t + \phi_k) \quad (1)$$

其中,  $b_k(t)$  和  $a_k(t)$  分别为数据和扩频码,  $P$  为接收信号功率,  $\phi_k$  为相移,  $\tau_k$  为时移。

<sup>1</sup> 2000-05-10 收到, 2000-09-18 定稿

若  $K$  为每时隙同时传输的用户数, 对于信号  $S_1$ , 其归一化的判决变量为<sup>[1]</sup>:

$$Z_1 = N + \sum_{k=2}^K W_k \cos \phi_k \quad (2)$$

式中第一项为热噪声, 第二项为多址接入干扰 (MAI) 的影响。引言中我们假设功率控制理想, 忽略热噪声的影响, 在计算 CDMA 系统的误比特率时, 所有不成功的传输分组都是由于多址接入干扰 (MAI) 引起的。

若用户数很多, 可以假设 MAI 服从正态分布, 采用 BPSK 调制, 则比特错误概率为<sup>[2]</sup>:

$$P_e = Q \left[ \sqrt{\frac{3N}{K-1}} \right] \quad (3)$$

其中  $N$  为扩频因子,  $Q[x] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2/2} du$ 。

若采用 Holtzman 的改进高斯近似算法<sup>[3]</sup>, 可以得到更加准确的结果, 这时平均误码率为:

$$P_e(K) \approx \frac{2}{3} Q \left[ \sqrt{\frac{3N}{(K-1)}} \right] + \frac{1}{6} Q \left[ \frac{N}{((K-1)N/3 + \sqrt{3}\sigma)^{0.5}} \right] + \frac{1}{6} Q \left[ \frac{N}{((K-1)N/3 - \sqrt{3}\sigma)^{0.5}} \right] \quad (4)$$

其中  $\sigma^2 = (K-1) \left[ N^2 \frac{23}{360} + N \left( \frac{1}{20} + \frac{K-2}{36} \right) - \frac{1}{20} - \frac{K-2}{36} \right]$ 。

在当用户数很小时, Holtzman 方法可能无法给出结果 (如  $K=2$ , 或  $K=3$ ,  $N=63$ , 此时须用式 (3) 估计)。

我们在文献 [3] 所得结论的基础上继续讨论。假设在 CDMA 系统中采用可以纠  $t$  位错误的编码, 若分组长度为  $L$  bit, 已经求得分组的误比特率为  $P_e$ , 则分组成功发送概率为:

$$P_c(K) = \sum_{j=0}^t \binom{L}{j} P_e^j (K) [1 - P_e(K)]^{L-j} \quad (5)$$

这里  $P_e(K)$  为同时有  $K$  个分组传输时的误比特率。

应用上述算法, 我们对不同扩频比下采用不同纠错码的分组成功传输概率进行了比较。图 1 是扩频比为 32, 分组长度为 1000bit 时, 采用纠错编码的纠错能力为  $t=50$ ,  $t=10$ , 和  $t=0$  时所得的分组成功传送概率; 图 2 为扩频比为 64, 分组长度为 1000bit 时, 采用纠错编码的纠错能力为  $t=50$ ,  $t=10$ , 和  $t=0$  时所得的分组成功传送概率。可以看出, 在 CDMA 系统中采用有效的纠错编码, 有利于提高分组成功传送概率, 可以提高同时传输的用户数; 高的扩频比同样有利于提高分组成功传送概率和同时传输的用户数。在图 1 和图 2 中, 扩频比提高一倍, 可以增加一倍的用户数。

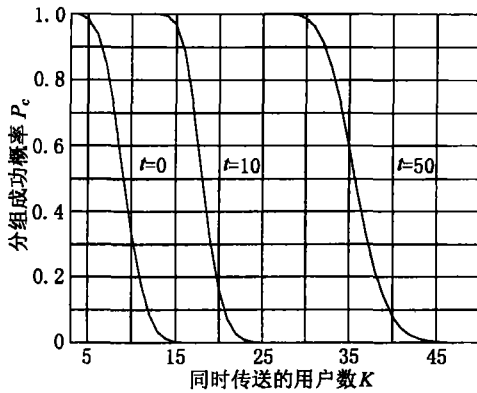


图 1 采用不同纠错码的分组成功传输概率  
扩频比 = 32

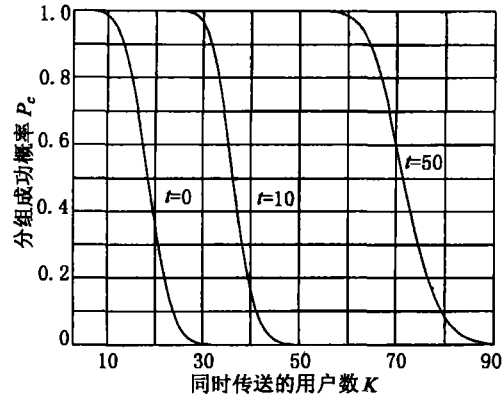


图 2 采用不同纠错码的分组成功传输概率  
扩频比 = 64

## 2.2 S-ALOHA-DS/CDMA 系统性能的计算

设系统中使用编码效率为  $R_c$  的可纠  $t$  个错误的的分组码, 若该码的分组长度为  $L$ , 则信息码长为  $LR_c$  bit, 其余的用来做校验和纠错. 这样, CDMA 系统的有效吞吐量  $S_{\text{eff}}$  为  $R_c$  乘以实际吞吐量. 由文献 [4], 时隙 ALOHA DS/CDMA 系统的吞吐量表达式为

$$S = \sum_{m=1}^{\infty} m P_c(m) f_M(m) \quad (6)$$

其中,  $m$  为到达的分组数,  $f_M(m)$  为总业务量到达的分布函数,  $P_c(m)$  为分组成功发送概率. 依照前面的假设, 总的业务流服从 Poisson 分布, 即

$$f_M(m) = \frac{G^m}{m!} e^{-G} \quad (7)$$

定义实际吞吐量为系统中每时隙实际通过的数据分组数. 将 (7) 式代入 (6) 式整理得到 S-ALOHA-DS/CDMA 的实际吞吐量表达式为

$$S = G e^{-G} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{G^m}{m!} P_c(m+1) \quad (8)$$

定义 S-ALOHA-DS/CDMA 系统的实际吞吐效率为  $\eta$ , 则  $\eta$  可表示为

$$\eta = S/G \quad (9)$$

定义有效吞吐量为扣除纠错编码所占的冗余信息后, 系统中通过的分组数. 设编码效率为  $R_c$ , 则可以求得有效吞吐量为

$$S_{\text{eff}} = R_c S = R_c G e^{-G} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{G^m}{m!} P_c(m+1) \quad (10)$$

定义时隙 ALOHA DS/CDMA 系统的有效吞吐效率为  $\eta_{\text{eff}}$ , 则  $\eta_{\text{eff}}$  可表示为

$$\eta_{\text{eff}} = S_{\text{eff}}/G \quad (11)$$

本节假设每个用户都独立地使用自己的扩频码字, 即研究基于发送方的扩频传输协议 (T-SSA), 对于基于接收方的扩频传输协议 (R-SSA) 的理论分析本文并未给出, 仅对这种情况进行了仿真。

### 3 MC-S-ALOHA 系统的性能计算

在 MC-S-ALOHA 网络的系统模型中, 有  $N$  个并行的窄带时隙 ALOHA 信道,  $N$  在数值上等于 CDMA 系统的扩频比, 以保证两个系统占用同样的带宽。

假设  $G$  为 MC-S-ALOHA 系统的总负载, 它服从 Poission 分布,  $N$  为并行的信道数。定义  $P_t(G)$  为一个分组成功地接入系统的概率, 按照排队论中 M/M/K 模型的分析<sup>[5]</sup>, 可得

$$\begin{aligned} P_t(G) &= P(k=0) + \sum_{n=1}^{\infty} P(k=n)N(1/N)(1-1/N)^n \\ &= (G^0/0!)e^{-\lambda} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G^n}{n!}N(1/N)(1-1/N)^n \\ &= e^{-G/N} \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $p(k=n)$  表示在某时隙已有  $n$  个分组到达系统的概率。成功接入的分组数即为该系统的实际吞吐量和有效吞吐量, 即

$$S = GP_t(G) = Ge^{-(G/N)} \quad (13)$$

系统的吞吐效率为

$$\eta = e^{-(G/N)} \quad (14)$$

### 4 S-ALOHA-DS/CDMA 系统和 MC-S-ALOHA 系统的吞吐量比较

首先从理论上对两种系统的吞吐性能进行分析。先分析 MC-S-ALOHA 系统。对式 (14) 对  $G$  求微分并令其为零, 可以求得在吞吐量  $S$  最大值为  $\text{Max}[S] = S(G=N) = Ne^{-1}$ 。即随着多载波信道数的增加, 吞吐量的最大值线性增加。由 (14) 式可知, 该系统吞吐量最大时的吞吐效率始终为  $e^{-1} = 37\%$ 。

对于 S-ALOHA-DS/CDMA 有效吞吐量做分析。在该系统中, 若扩频比为 1, 也就是只有一个码分信道, 则 MAI 为零, 对式 (10) 可以把时隙 ALOHA 系统看作 CDMA 系统的极限特例, 此时式 (10) 退化为  $S_{\text{eff}} = R_cGe^{-G}$ 。考虑另一种极端的情况, 若使用可以纠正任意多错误的编码, 则所有 MAI 造成的误码都可以纠正, 此时对于所有的  $m$  都有  $P_c(m) = 1$ 。此时 (10) 式退化为  $S_{\text{eff}} = R_cG$ 。所以真实情况应该是  $R_cGe^{-G} \leq S_{\text{eff}} \leq R_cG$ 。若输入负载较小, MAI 较小, MAI 造成的误码可以在纠错编码的纠正范围之内, 则有效吞吐量与总负载成线性关系, 此时吞吐效率为常数, 在数值上等于编码效率。

下面针对具体的例子, 比较两种系统的吞吐性能。

按照前面的分析, 首先对 S-ALOHA DS/CDMA 系统 (T-SSA 方式) 使用不同纠错能力的分组码所对应的有效吞吐量和实际吞吐量与 MC-S-ALOHA 系统进行了理论比较。比较结果见图 3 和图 4。图 3 为扩频比为 64, 分组长度为 1000bit, 采用纠错能力为  $t=50$ ,  $t=10$ , 和  $t=0$  的编码时 S-ALOHA-DS/CDMA 与 MC-S-ALOHA 系统有效吞吐量的比较; 图 4 为与图 3 同样条件下的 S-ALOHA-DS/CDMA 与 MC-S-ALOHA 系统实际吞吐量的比较, 与图 3 差别在于实际吞吐量没有考虑纠错码的编码效率。

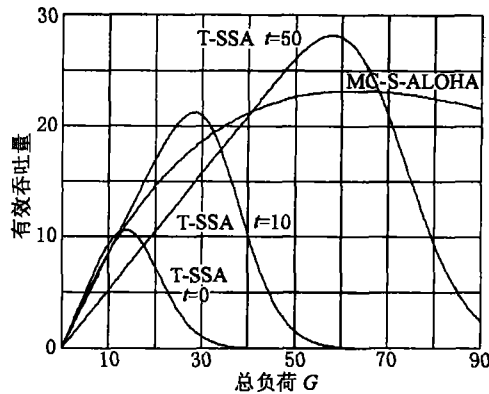


图3 S-ALOHA-DS/CDMA 和 MC-S-ALOHA 系统有效吞吐量比较 (扩频比 =64)

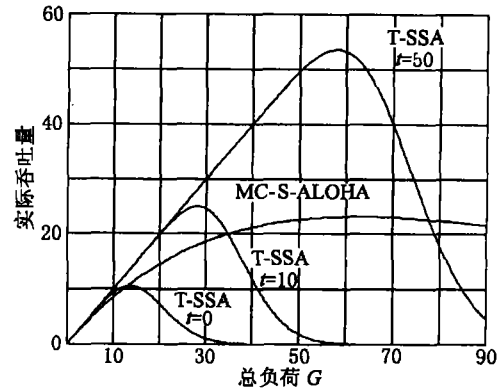


图4 S-ALOHA-DS/CDMA 和 MC-S-ALOHA 系统实际吞吐量比较 (扩频比 =64)

在图3当 $t=0$ 时,在 $G=13$ 时,T-SSA方式的S-ALOHA DS/CDMA最大有效吞吐效率为85%;当 $t=50$ 时,T-SSA方式的S-ALOHA DS/CDMA在 $G=59$ 时,吞吐量达到最大,此时的有效吞吐效率为47%;而对于MC-S-ALOHA系统 $G=61$ 时,吞吐量才达到最大,此时的吞吐效率为37%。所以 $t=50$ 时的T-SSA方式的最大有效吞吐量大约为多载波时隙ALOHA系统的1.2倍。图4中,在业务量不是特别大时,MAI较小,采用高纠错能力编码的T-SSA方式的S-ALOHA-DS/CDMA所对应的实际吞吐量更高些。在输入总业务量为61时,T-SSA方式CDMA系统的平均分组成功概率为85%,是MC-S-ALOHA系统的2.1倍。

下面仅对 $t=50$ 的结果进行分析。纠错编码采用由(1023,523) BCH码截短而得的(1000,500)截短BCH码,纠错能力为 $t=50$ ,显然此码的编码效率为 $R_c=1/2$ 。在负载较低时,有效吞吐量呈线性增长,斜率为编码效率 $R_c=50%$ ;在总负载接近吞吐量最大时的 $G$ 时,由于MAI增大,误码增加,重传的分组增加,有效吞吐量增长变慢,编码效率也降低,所以在有效吞吐效率为47%时吞吐量达到最大,略低于编码效率50%;而随着总负载的增大,MAI恶性增大,导致有效吞吐量和吞吐效率急剧下降,下降的斜率远高于多载波时隙ALOHA系统,这也反映出,CDMA系统是一个干扰受限的系统。

可以看出,若不采用纠错编码或采用纠错能力较低的纠错编码,在总负荷较低时,S-ALOHA-DS/CDMA系统的有效吞吐效率远高于MC-S-ALOHA系统;但是在总负荷达到一定程度时,由于MAI的增大和纠错能力差,该系统的性能迅速恶化,而此时MC-S-ALOHA系统的吞吐量还没有达到最大,吞吐效率仍有继续增长的空间。采用纠错能力较强的纠错编码时,S-ALOHA-DS/CDMA系统可以在高负荷下工作,并保持比较高的吞吐效率。但当系统负荷过大,此种S-ALOHA-DS/CDMA系统性能下降也很快。

图5表示了S-ALOHA-DS/CDMA系统中T-SSA与R-SSA两种方式使用不同纠错能力的分组码所对应的实际吞吐量与MC-S-ALOHA的实际吞吐量的仿真比较曲线。仿真采用matlab5.3软件,采用时间轴均匀采样逐步逼近的方法进行仿真,仿真时隙数为10000。首先产生泊松流,在每个分组选择各个码分信道或多载波信道时,以均匀分布随机选择。分组冲突后,在下一个时隙内以概率1进行重传。其中实线部分为T-SSA方式与MC-S-ALOHA的实际吞吐量仿真比较结果,这与图4的理论分析结果是一致的。虚线部分对应于R-SSA方式S-ALOHA-DS/CDMA的仿真结果,仿真中假设系统中共有70个接收机,每个接收机对应于一个扩频码字,由于码字数受限,在总负荷增大时,选择码字的冲突逐渐增加,造成系统性能较T-SSA性

能下降。在总负荷很低时(小于 10),采用不同编码及不同扩频传输协议的性能差别不大,这主要是因为业务量很低时,由于码字数受限造成的冲突不多,由于 MAI 造成的误码也较少。

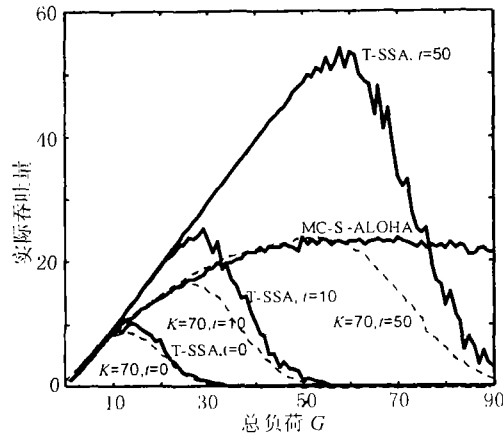


图 5 S-ALOHA-DS/CDMA 和 MC-S-ALOHA 系统实际吞吐量比较 (扩频比 =64)

## 5 结 论

本文对 S-ALOHA-DS/CDMA 在不同纠错能力下的吞吐量和吞吐效率与 MC-S-ALOHA 进行了理论比较和仿真,结果表明,在网络负载较低的情况下, S-ALOHA-DS/CDMA 系统中,采用低纠错能力的编码可以获得很大的吞吐效率,但吞吐量不高;在网络负载较高的情况下, S-ALOHA-DS/CDMA 系统中,采用高纠错能力的编码可以既在吞吐量上,又在吞吐效率上同时获得比 MC-S-ALOHA 好的性能;但若网络负载过重, S-ALOHA-DS/CDMA 的吞吐性能较 MC-S-ALOHA 下降快。

## 参 考 文 献

- [1] J. G. Proakis, Digital Communications(3<sup>rd</sup> edition), 北京, 电子工业出版社, 1998, 第 13 章.
- [2] M. B. Pursley, Performance evaluation for phase-coded spread-spectrum multiple-access communication Part I: System analysis, IEEE Trans. on Comm., 1977, 25(8), 795-799.
- [3] J. M. Holzman, A simple, accurate method to calculate spread-spectrum multiple-access error probabilities, IEEE Trans. on Comm., 1992, 40(3), 461-464.
- [4] D. Raychaudhuri, Performance analysis of random access packet-switched code division multiple access systems, IEEE Trans. on Comm., 1981, 29(6), 895-901.
- [5] 孟玉珂, 排队论基础及应用, 上海, 同济大学出版社, 1989, 第三章.

COMPARISON STUDY OF THROUGHPUT PERFORMANCE IN  
SLOTTED ALOHA DS/CDMA AND  
MULTICARRIER SLOTTED ALOHA SYSTEMS

Jiao Wenhua    Liang Qinglin

*(Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)*

**Abstract** Throughput performance for Slotted ALOHA DS/CDMA (S-ALOHA-DS/CDMA) and Multicarrier Slotted ALOHA (MC-S-ALOHA) systems is performed and compared in this paper. Theory analysis and computer simulation results of throughput of S-ALOHA-DS/CDMA are obtained using different error correcting code. And comparison results with MC-S-ALOHA system are also obtained. It is proved that with the traffic increasing, the S-ALOHA-DS/CDMA with high error-correct code being used has better throughput performance. In the case of the too heavy traffic, the MC-S-ALOHA system has better throughput performance. If the total codes of the system are limited, the code contention collision will occur so that throughput will drop.

**Key words** Slotted ALOHA DS/CDMA, Multicarrier Slotted ALOHA, Throughput performance

焦文华: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为 CDMA 系统 MAC 协议, 多用户检测等.

梁庆林: 男, 1941 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 中国通信学会无线通信委员会成员, 研究领域为扩展频谱技术和数字通信技术.