

扩频ALOHA多址系统吞吐量和时延性能分析

孙诗东^{①②} 聂景楠^{①②}

^①(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

^②(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘要 该文深入地研究了扩频ALOHA多址(SAMA)系统的信道接入性能,推导了通用的扩频ALOHA多址系统平均误比特率公式,给出了扩频ALOHA系统吞吐量和时延性能表达式,同时还分析了信道编码对系统性能的改进,给出了相应的仿真和数值结果。结论表明,扩频ALOHA多址系统可以显著提高传统ALOHA系统的吞吐量和时延性能,提高程度随扩频增益增加而增加,引入信道编码可以进一步提高网络性能。

关键词 扩频, ALOHA, 吞吐量, 传输时延

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)07-1251-04

Performance Analysis of Throughput and Delay for Spread Spectrum ALOHA Multiple Access Systems

Sun Shi-dong^{①②} Nie Jing-nan^{①②}

^{①②}(Institute of Communications Engineering PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China)

^{①②}(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast Univ., Nanjing 210096, China)

Abstract In this paper, the performance of Spread spectrum ALOHA Multiple Access (SAMA) system is deeply studied. The general formula of average bit-error-rate for SAMA system is derived, and the expression for calculating throughput and delay of transmission in SAMA system is also presented, and moreover, the performance improvement in throughput and delay when using forward-error-control technique is analyzed. Numerical results show that a significant performance improvement can be gained by using spread spectrum ALOHA other than conventional ALOHA system, and the improvement will be increased with the increasing of processing gain. Consequently, SAMA is very suitable for applications in distributed packet radio networks.

Key words Spread Spectrum, ALOHA, Throughput, Transmission delay

1 引言

SAMA(Spread spectrum ALOHA Multiple Access)系统具有低复杂度和高吞吐量的特点,在无线分组网络、卫星通信网络以及军用通信网络中有很好的应用前景^[1-3]。SAMA系统不同于一般的扩频CDMA系统,无需为不同的用户分配不同的扩频码。事实上,每个用户都利用共同的一个伪随机码对数据进行扩频调制,是一种单码扩频系统。当任一用户需要发送数据时,就利用公共伪码对数据进行扩频调制,然后直接发送,不需要监听信道^[4,6]。文献[3]讨论了SAMA系统的基本概念,并对SAMA在功率和带宽受限的VSAT网络中的性能进行了定性分析。文献[4]给出了SAMA系统吞吐和时延特性的一种分析方法,并对SAMA系统的分组碰撞情况进行了初步分析。在上述工作的基础上,本文对SAMA系统的数据分组碰撞情况作了进一步深入研究,分析了不同碰撞程度下,分组中比特的不同错误情况,从而推导出了系统平均

误比特率的计算公式,进而分析了SAMA系统的吞吐和时延性能,以及在采用纠错编码技术条件下的系统性能改进,根据分析结果进行了计算机仿真和数值计算,并对结果进行了分析和讨论。

2 SAMA 系统吞吐性能分析

为了便于分析,作如下假设:假定系统中数据分组的到达过程可以看成是泊松过程,出现分组冲突后的重传过程仍然是泊松过程^[5];扩频多址信道为理想的离散无记忆二进制信道,数据分组冲突和多址干扰是影响SAMA系统分组正确传输的主要因素。

设SAMA系统中,每个分组时间长度为定长 T_0 ,由 L bit组成,设系统扩频处理增益为 N ,每chip的时间长度为 $T_c = T_0 / (LN)$ 。根据扩频码的自相关特性,设分组中每比特的冲突区间为 δ chip(一般取 $\delta = 2$)。在传统的ALOHA系统中,任何时间上的重叠都将造成相应分组之间的冲突,而在SAMA系统中则不一定,时间上重叠的分组只有落入冲突窗口内时才会发生碰撞。如图1所示, L bit长度的SAMA系统分组有 L 个离散的碰撞窗口 δT_c 。这样,总的冲突窗口为

2004-11-10 收到, 2005-04-18 改回
国家自然科学基金(60503049)和东南大学移动通信国家重点实验室
开放课题基金(N200602)资助项目

$L\delta T_c$ 即 $\delta T_0/N$ 。

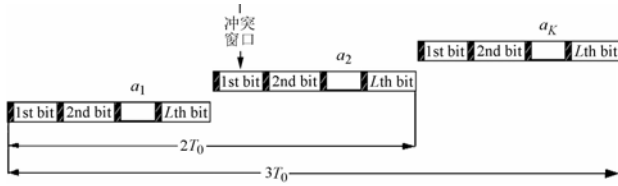


图1 扩频ALOHA多址系统分组碰撞示意图

Fig.1. A sketch map of packets collision for SAMA system

由于每个分组长度为 T_0 ，分组之间出现冲突的时间范围为 $2T_0$ ，假设数据分组的平均到达速率(包括新产生的数据分组和重传的数据分组)为 λ ，那么在时间间隔 $2T_0$ 内有 K 个数据分组到达信道上的概率为

$$f(K) = (2\lambda T_0)^K e^{-2\lambda T_0} / K! \quad (1)$$

K 个数据分组中每个数据分组成功传输的概率是相同的，考虑 K 个分组中任意一个数据分组 a_2 的成功传输概率，实际上其它 $K-1$ 个分组落入分组 a_2 的 L 个不同碰撞窗口内时，对分组 a_2 造成的错误影响情况是不同的。其它 $K-1$ 个分组中任意一个分组落入 a_2 的冲突窗口内的概率均为 $L\delta/(LN)$ 即 δ/N ，这时将导致数据分组 a_2 中至少有 1bit 错误。当其它 $K-1$ 个分组没有一个分组落入 a_2 的冲突窗口内时，数据分组 a_2 将可以成功传输，这种情况发生的概率为 $(1-\delta/N)^{K-1}$ ，所以只考虑数据分组冲突因素影响情况下，令 $Q_E(K)$ 为 K 个数据分组中每个数据分组成功传输的概率， P_{Ce} 为由于分组发生冲突所造成的平均比特传输错误概率，则

$$Q_E(K) = (1-\delta/N)^{K-1} = (1-P_{Ce})^L \quad (2)$$

所以，数据分组冲突原因引起的平均比特传输错误概率 $P_{Ce} = 1 - (1-\delta/N)^{L/(K-1)}$ 。设 P_{Me} 为扩频系统中多址干扰造成的系统平均误比特率，采用标准的高斯近似算法，则 $P_{Me} = Q(\sqrt{3N/(K-1)})$ [7]。

设 P_e 为实际情况下，SAMA 系统的平均误比特率，则有

$$P_e = 1 - (1-P_{Me}) \cdot (1-P_{Ce}) \\ = 1 - \left(1 - Q\left(\sqrt{3N/(K-1)}\right)\right) (1-\delta/N)^{L/(K-1)} \quad (3)$$

其中 $K \geq 2$ ；当 $K=1$ 时， $P_e = 0$ 。

由上面的分析可知，实际环境中，SAMA 系统中每个数据分组被正确接收的概率 $Q_E(K)$ 为

$$Q_E(K) = (1-P_e)^L = \left(1 - Q\left(\sqrt{3N/(K-1)}\right)\right)^L (1-\delta/N)^{K-1} \quad (4)$$

其中 $K \geq 2$ ；当 $K=1$ 时， $Q_E(K)=1$ 。

SAMA系统的吞吐性能可以定义为^[8]

$$S = E(KQ_E(K)) = \sum_{K=1}^{\infty} KQ_E(K)f(K) \quad (5)$$

其中 S 为吞吐量， $E(KQ_E(K))$ 表示 $KQ_E(K)$ 的数学期望， $f(K)$ 为数据分组的到达分布概率。将上述分析结果代入到式(5)，可以得到 SAMA 系统的吞吐量和负载的关系为

$$S = \sum_{K=1}^{\infty} KQ_E(K) \cdot (2\lambda T_0)^K e^{-2\lambda T_0} / K! \\ = Ge^{-G} + Ge^{-G} \sum_{K=1}^{\infty} G^K / K! \cdot Q_E(K+1) \quad (6)$$

其中 $G = 2\lambda T_0$ 为 SAMA 系统的网络负载(在 $2T_0$ 内总共试图发送的数据分组数目)。上式中第 1 项 Ge^{-G} 正是传统时隙 ALOHA 系统的吞吐量，而第 2 项可以认为是扩频多址技术对网络吞吐量提高所做出的贡献。将式(4)代入式(6)，得到

$$S = Ge^{-G} + Ge^{-G} \sum_{K=1}^{\infty} G^K / K! \\ \cdot \left[1 - Q\left(\sqrt{3N/K}\right)\right]^L \cdot (1-\delta/N)^K \quad (7)$$

由 G 和 S 的定义知，可以用 $P = S/G$ 表示网络负载为 G 的情况下数据分组成功传输的概率。对吞吐性能进行仿真和数值计算，可以得到扩频增益对吞吐量和负载关系的影响，以及对分组成功传输概率的影响。选取的系统参数为：分组长度 $L = 200\text{bit}$ ，扩频冲突区间 $\delta = 2\text{chip}$ ，系统用户站点数为 100。图 2，图 3 给出了不同扩频处理增益 N 情况下，系统吞吐量和分组成功传输概率与负载关系曲线。从图中可以看出随 N 的增大，系统最大吞吐量和稳定工作区域增大，在相同负载 G 的情况下，分组成功传输概率增大，系统的最大吞吐量在负载 G 接近于 $N/2$ 时获得。

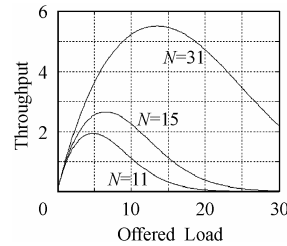


图2 N 对吞吐量和负载关系的影响
Fig.2 Throughput S vs. G for different N

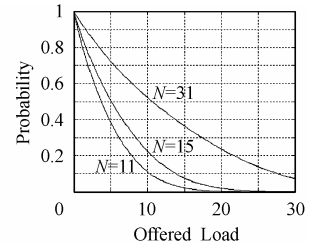


图3 N 对分组成功传输概率和负载关系
Fig.3 Probability P vs. G for different N

3 SAMA 系统时延性能分析

下面对系统的时延特性进行分析。系统链路层采用 ARQ 机制，分组传播延时与发送时间 T_0 相比可以忽略不记。设分组传输失败后，系统重传分组所需要的时间为 nT_0 ， n 是 $[1, m]$ 之间随机选择的一个数，服从均匀分布，每次重传都随机地选择一次。若一个数据分组平均重传 N_R 次才能传输成功，则发送一个数据分组所需要的平均时间为^[5]

$$D = T_0 + [(m+1)/2]N_R T_0 \quad (8)$$

由 G 和 S 的含义可知，一个分组的平均传输次数为 G/S ，则

$$N_R = G/S - 1 \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可以得到：

$$D = T_0 + \frac{m+1}{2}(G/S - 1)T_0 \quad (10)$$

由式(7)和式(10)可以得到，SAMA 系统分组的归一化平均时

延和网络负载的关系为

$$\frac{D}{T_0} = 1 + \frac{m+1}{2} \left[\frac{e^G}{1 + \sum_{K=1}^{\infty} G^K / K! \cdot [1 - Q(\sqrt{3N/K})]^L \cdot (1 - \delta/N)^K} - 1 \right] \quad (11)$$

m 的大小对数据分组的时延有很大的影响, m 太大会使平均时延增大, m 太小会使重传时的冲突机会增大, 增加重传次数, 一般可以取 $m = 5$ [5]。图 4 给出了不同扩频增益 N 时, 分组归一化传输时延与负载关系曲线, 由仿真结果可知, SAMA 系统也存在不稳定工作区域, 当系统负载超过一定范围时, 分组时延迅速上升, 在网络负载 G 一定的情况下, 分组时延随 N 的增大而减小。

4 采用差错控制技术对系统性能的提高

4.1 差错控制技术对吞吐性能的提高

考虑在每个数据分组中加入冗余比特以实现前向纠错, 设总的分组长度仍为 L bit, 使用纠错编码后每个分组具有最多能纠正 t 个错误的纠错能力, 即如果每个分组中出现的错误比特数大于 t 时, 接收端无法进行纠错。因此, 可以得到数据分组能够正确接收的概率为

$$Q_E(K) = \sum_{i=0}^t C_L^i P_e^i (1 - P_e)^{L-i} \quad (12)$$

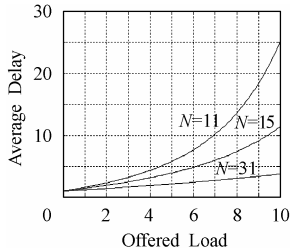


图 4 N 对分组传输时延与负载关系的影响
Fig.4 Average delay D/T_0 vs. G for different N

其中 C_L^i 表示 L 中取 i ($i \leq L$) 时可能的组合方案数目, 式中 P_e 由式(3)决定。将式(3), 式(11)代入式(6)可以得到采用前向纠错技术的情况下, 系统吞吐量与网络负载的关系为

$$S = Ge^{-G} + Ge^{-G} \sum_{K=1}^{\infty} G^K / K! \sum_{i=0}^t C_L^i \cdot \left\{ 1 - \left[1 - Q\left(\sqrt{3N/K}\right) \right] \cdot (1 - \delta/N)^{K/L} \right\}^i \cdot \left\{ \left[1 - Q\left(\sqrt{3N/K}\right) \right] \cdot (1 - \delta/N)^{K/L} \right\}^{L-i} \quad (13)$$

图 5, 图 6 分别给出了在扩频增益 $N = 11$, 不同纠错能力 t 的情况下, 系统吞吐量和分组成功传输概率与负载关系曲线。从图中可以看出随纠错能力的提高, 系统最大吞吐量和稳定工作区域增大。在相同负载 G 的情况下, 分组成功传输概率增大, 但是纠错能力的提高必然导致分组中冗余比特

的增加, 因此在实际应用中应根据具体情况采用合适的纠错技术。

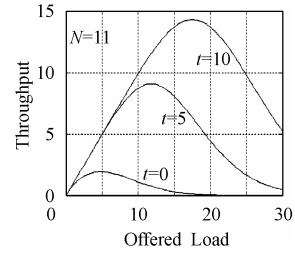


图 5 t 对吞吐量与负载关系的影响
Fig.5 Throughput S vs. G for different t

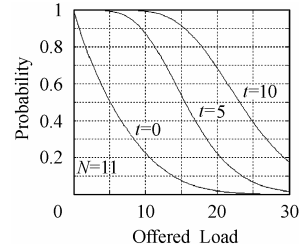


图 6 t 对分组成功传输概率和负载关系的影响
Fig.6 Probability P vs. G for different t

4.2 差错控制技术对时延性能的提高

将式(13)代入式(10)可以得到采用前向纠错技术的情况下, 分组归一化时延和网络负载的关系表达式。图 7 给出了纠错能力 $t = 5$, 扩频增益 $N = 11$ 和 $N = 15$ 时, 分组归一化传输时延和负载关系曲线。比较图 4 和图 7 可以看出采用纠错技术, 分组传输时延性能可以得到很大程度的改善, 在相同网络负载和扩频增益的条件下, 随纠错能力的提高分组传输时延迅速下降, 这是因为采用纠错技术, 在网络负载一定的情况下, 分组成功传输的概率增大, 分组平均重传次数减小的缘故。

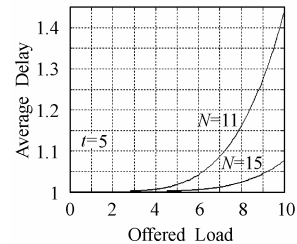


图 7 $t = 5$ 时分组传输时延和负载关系曲线
Fig.7. Average delay D/T_0 vs. G for different N

5 结束语

本文深入分析了扩频 ALOHA 多址系统的分组传输性能, 以及网络吞吐量和延时性能, 并进行了仿真和数值计算, 推导了系统平均误比特率的计算公式, 讨论了引入纠错编码技术对系统性能的提高。结果表明, 扩频方式的 ALOHA 系统由于减小了数据分组冲突的窗口, 可以有效地提高传统 ALOHA 系统的吞吐和时延性能, 随扩频增益 N 的增大系统性能提高程度也将增大, 而引入前向纠错编码技术可以进一步提高系统性能。仿真和数值结果证实了分析的结论。本文

的工作对于低复杂度和高信道利用率的无线分组网络尤其是分布式网络系统的设计具有重要的理论和实际意义。

参 考 文 献

- [1] Norman A. The throughput of packet broadcasting channels [J]. *IEEE Trans. on Commu.*, 1977, 25(1): 117 – 128.
- [2] 孙飞燕, 张朝阳, 陈又正. 基于 HFC 网络上行信道 CDMA-预约 ALOHA 多址接入方式吞吐量分析[J]. 电子学报, 2001, 29(11): 1552 – 1554.
- [3] Norman A. Fundamentals of packets multiple access for satellite networks [J]. *IEEE J. on Select. Areas Commun.*, 1992, 10(2): 309 – 316.
- [4] 李建新. 基于 ALOHA 的宽带接入技术研究[J]. 电子学报, 2000, 28(10): 86 – 88.
- [5] 谢希仁. 计算机网络(第三版)[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2000: 68 – 75.
- [6] 郭宏, 郭英, 段弢. 扩谱 ALOHA 多址访问系统中数据包长度的最优化研究[J]. 电子学报, 2000, 28(4): 10 – 13.
- [7] Robert M, James L. Packet throughput in slotted ALOHA DS/SSMA radio systems with random signature sequences [J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1992, 40(7): 1223 – 1230.
- [8] Dipankar K. Performance analysis of random access packet-switched code division multiple access system [J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1981, COM-29(5): 895 – 901.
- 孙诗东: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为无线宽带网络. E-mail: shd_sun@sina.com.cn
- 聂景楠: 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员. 主要从事移动通信、宽带通信网络等方面的研究工作.