

数字集群移动通信系统随机多址预约信道分析*

王亚宁, 赵东风, 孙 权, 李 剑
(云南大学 通信工程系, 云南 昆明 650091)

摘要: 针对数字集群移动通信系统, 提出一种新的随机预约控制方式, 减小了预约分组信号冲突发生, 提高了系统的吞吐量. 采用随机多址分析方法对该预约多址协议(SFCR- PRMA)进行了分析, 实验结果表明系统性能有较大提高.

关键词: 数字集群通信系统; 随机多址; 预约分组信号; 吞吐量

中图分类号: TN 923 文献标识码: A 文章编号: 0258- 7971(2002) 04- 0269- 05

数字集群移动通信系统是一种专用的移动通信系统, 该数字集群系统具有频谱利用率高、用户容量大、联网功能强、保密性好、能提供分组数据业务等优点, 便于组建公用网. 2001 年国家信息产业部颁布了我国数字集群移动通信系统体制行业标准(SJ/T 11228- 2000), 内容包括基于欧洲 TE-TRA(陆地集群无线通信)体制和基于摩托罗拉公司的 iDEN(集成数字增强型网络)体制的两种数字集群标准, 从而为我国的集群移动通信系统由模拟化向数字化过渡确定了国家标准, 这极大地促进了我国数字集群移动通信系统的研制开发和推广应用.

在数字集群移动通信系统中, 为了充分利用无线电频率资源, 系统采用了时分多址(TDMA)信道接入技术, 并在信号帧结构中设置专用的呼叫预约信道, 用户终端通过预约信道随机提出申请, 以获得帧信息中的数据时隙通道. 由于预约信道中的预

约时隙数一定, 用户终端在预约申请过程中会出现与基本随机多址系统相类似的情况, 即预约申请信号以概率发送成功和发送失败(碰撞). 采用何种技术控制, 使预约申请的成功概率提高, 减小碰撞信号发生的概率, 就成为数字集群通信系统性能好坏的关键. 国内外对这一关键技术进行了较广泛深入的研究, 提出了一些有创新的研究方法与实现技术^[1- 4]. 为了使数字集群移动通信系统接入控制信道的性能得到进一步地改善, 更好地解决控制信道的瓶颈效应, 本文在 S- ALOHA 协议基础上, 结合预约微时隙技术对数字集群移动通信系统进行了研究.

1 新型控制信道随机接续协议工作原理

图 1 给出了控制信道的信令, TSC 发送同步消息(由 PALH 表示), 以建立时隙定时, 并且向各移动台发出了预约申请邀请. 其中 PALH 消息包

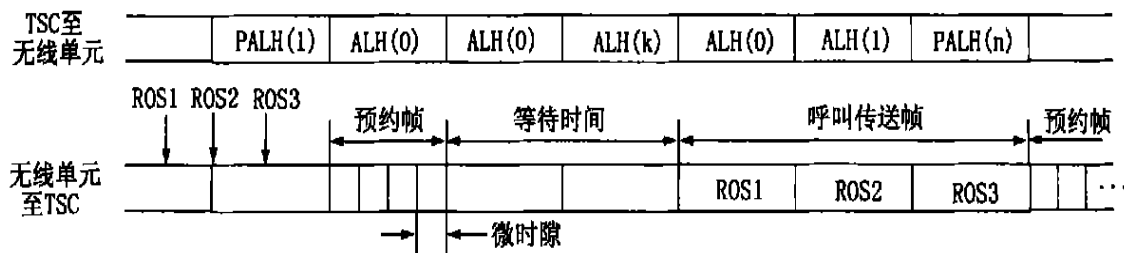


图 1 随机接入帧

Fig. 1 Random access frames

含参数(N), N 表示随后的预约时隙数, 构成一帧用于预约接续. 由于预约申请比呼叫申请的信息分组短, 所以我们将每个时隙划分为 n 个微时隙, 这样一个预约帧中就有 $L \times n$ 个微时隙, 显然预约成功的概率必然得到提高. 预约帧结束后, TSC 判断出收到了 k 个成功的预约信号后, 紧接着发出 ALH(k) 消息, 邀请获准申请的移动台发送申请信号(按秩序先预约先发送), 这个过程正好需要 k 个时隙. 呼叫申请信号发送完成后, TSC 又重新发送新的预约邀请信号, 新一轮循环开始. 这里要特别指出的是, 预约帧的长度取决于上一个预约帧中失败的预约申请数, 即预约帧的帧长 L 是动态可调的. 若上一预约帧预约失败的申请较多, TSC 将自动增加新预约帧的帧长长度, 反之若上一预约帧预约失败的申请数较少, 新帧帧长将被减短, 如果出现预约失败数为零的特殊情况, 新帧帧长将被置 1. 至于预约成功的移动台发送申请信号或短信息的帧长由预约成功的数目而定.

综上所述, 这种改进的控制信道随机接入协议, 我们称之为迭加帧结构冲突削弱分组预约多址协议(superimposed frame CR-PRMA), 简称 SFCR-PRMA 算法. 其主要特点有以下几个方面:

(1) 先预约, 再发送.

(2) 预约帧帧长动态可调, 发送帧帧长由预约成功申请数决定.

(3) 每个预约时隙又被划分为 n 个微时隙, 用于竞争预约, 增加了预约对象. 预约申请信号使用各微时隙的概率相等.

2 协议性能分析

2.1 分析方法描述 假定时隙式随机多址系统的时间轴是按单位时间进行划分, 呼叫申请信号的单元长度刚好为一个时隙的定宽度, 预约申请信号的长度刚好为一个微时隙的宽度. 在系统用户数不限的情况下, 规定任何一个移动台要发送预约申请信号时必须等待基站在某一时隙下发的 ALOHA 新预约帧标记和预约帧长度, 并在新预约帧内进行第一次随机接入尝试, 为防止移动台在接入帧中进行随机预约请求, 基站将标记新帧时隙(不包括这个时隙)后的所有接入帧标记为正进行的帧, 这些时隙内发生的预约申请不允许立即接入. 在等待时间之后, 如果移动台没有收到基站下发的应答信号, 移动台判定其第一次预约请求失败, 这时移动

台将会再等待基站下发的新预约帧标记, 进行再一次的预约尝试.

为便于分析, 现假定: 移动台的数量为无限; 移动台预约信号的到达过程为一 Poisson 分布, 每个预约信号分组刚好占用一个微时隙宽度, 预约接入帧长为 L , 用户新产生预约的业务量强度为每单位时隙 S 个, 并服从 Poisson 分布; 用户总的业务量强度(即吞吐率)为每单位时隙 G 个, 并服从 Poisson 分布; 每个时隙的长度为 T .

2.2 算法分析和推导 设随机变量 X 为移动台预约申请接入时的总的预约请求(包括新产生的和重试的呼叫请求), 其分布为参数为 G 的泊松分布, 当在每一个预约帧的结束点考察 X 时, 它构成了一个马尔可夫过程. 再设随机变量 $X_0, X_1, X_2, \dots, X_k, \dots$ 分别表示某一预约帧内新产生的呼叫请求、碰撞 1 次的呼叫请求、碰撞 2 次的呼叫请求、...、碰撞 k 次的呼叫请求、...、它们之间相互独立, 而且当前预约帧的成功和碰撞情况与前一个预约帧的呼叫有关, 且满足下式

$$X = \sum_{k=0}^{\infty} X_k. \quad (1)$$

由上述假设和定义, 可知 X 服从参数为 G 的泊松分布, X_0 服从参数为 S 的泊松分布. 考虑到平衡状态的情况, 这时系统处于稳态. 为了求出参数 G 和 S 之间的关系, 设有以下规则: 新产生的预约呼叫接入不成功进行第 1 次预约尝试, 第 1 次尝试不成功进行第 2 次预约尝试, 等等.

另取当前预约帧的某一时隙进行观察, 在平衡状态下, 能够在当前预约帧内接入成功的个数取决于变量 X 和 X_0 . 为了分析方便, 对每一个微时隙观察它的呼叫个数. 因为每一个接入微时隙内的呼叫数是相互独立的, 故设每一个微时隙的呼叫个数为随机变量 $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_{nL}$. 对于 $Z_i, i = 1, 2, \dots, nL$; 在预约帧结束时观察, 有

$$P[Z_i = m] = \frac{(G/n)^m}{m!} \cdot e^{-G/n};$$

$$m = 0, 1, \dots; i = 1, 2, \dots, nL; n = 2, 3, 4, \dots \quad (2)$$

同理, 对于随机变量 X_0 , 有

$$P[X_0 = m] = \frac{(LS)^m \cdot e^{-LS}}{m!},$$

$$m = 0, 1, 2, 3, \dots; n = 2, 3, 4, \dots \quad (3)$$

现取某一微时隙观察它的当前帧接入的成功数, 在此设成功接入某一微时隙的条件是: 新产生

的预约呼叫中仅仅有一个接入这个微时隙, 同时前一预约帧中的碰撞呼叫重新申请时没有接入到该微时隙以及新产生的预约申请信号没有一个接入到这个微时隙, 而前一预约帧内的碰撞预约呼叫重新申请时只有一个接入到该微时隙, 所以成功接入某一微时隙的概率 P_U 为

$$P_U = \left\{ \sum_{r=1}^{\infty} \left[P(X_0 = r) \cdot \left(C_r^1 \cdot \frac{1}{nL} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{nL} \right)^{r-1} \right] \right\} \cdot \left\{ \prod_{i=1}^{nL} [P(Z_i = 0) + P(Z_i = 1) + \sum_{k_i=2}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{nL} \right)^{k_i} \cdot P(Z_i = k_i)] \right\} + \left\{ \sum_{r=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{nL} \right)^r \cdot P(X_0 = r) \right\} \cdot \left\{ \sum_{i=0}^{nL} \frac{1}{nL} \cdot \left[\sum_{k_i=2}^{\infty} C_{k_i}^1 \cdot \frac{1}{nL} \cdot \left(1 - \frac{1}{nL} \right)^{k_i-1} \cdot P(Z_i = k_i) \right] \right\} \cdot \left\{ \prod_{i=1}^{nL-1} [P(Z_i = 0) + P(Z_i = 1) + \sum_{k_i=2}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{nL} \right)^{k_i} \cdot P(Z_i = k_i)] \right\}. \quad (4)$$

将(2)式和(3)式代入(4)式可将 P_U 化简如下

$$P_U = \frac{S}{n} e^{-\frac{S}{n}} \cdot \left(e^{\frac{-G}{n^2L}} + \frac{G}{n^2L} e^{-\frac{G}{n}} \right)^{nL} + e^{-\frac{S}{n}} \cdot \left(e^{\frac{-G}{n^2L}} + \frac{G}{n^2L} e^{-\frac{G}{n}} \right)^{nL-1} \cdot \left[\frac{G}{n^2L} e^{\frac{-G}{n^2L}} + \frac{G}{n^2L} e^{-\frac{G}{n}} \cdot \left(\frac{G}{n^2L} - \frac{G}{n} \right) \right]. \quad (5)$$

预约申请信号的重发次数 R 在系统平稳状态下应满足下式

$$R = \frac{G}{S} - 1. \quad (6)$$

呼叫申请信号的总时延应包括预约信号的延迟加上预约成功后发送呼叫信号时的延迟

$$W \approx \frac{L}{2n} \tau + R \cdot \left[\frac{L-1}{2n} \cdot \tau \right] + \frac{L}{2} \tau, \quad (7)$$

τ 为每个时隙的时宽, 下面计算 R 与 S, G 的关系.

设 q_n 为成功传输 1 个新产生的预约申请信号的概率, q_t 为成功传输冲突重发的预约申请信号的概率, 那么 1 个预约信号经 i 次重发成功的概率可由下式表示

$$P_i = \begin{cases} q_n; & i = 0 \\ (1 - q_n) \cdot (1 - q_t)^{i-1} \cdot q_t; & i \geq 1 \end{cases}$$

所以平均重接次数

$$R = \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot P_i = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot (1 - q_n) \cdot (1 - q_t)^{i-1} \cdot q_t = \frac{1 - q_n}{q_t}. \quad (8)$$

先计算 q_n :

$$q_n = \left\{ \sum_{r=0}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{nL} \right)^r \cdot P(X_0 = r) \right\} \cdot \left\{ \prod_{i=1}^{nL} [P(Z_i = 0) + P(Z_i = 1) + \sum_{k_i=2}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{nL} \right)^{k_i} \cdot P(Z_i = k_i)] \right\} = e^{-\frac{S}{n}} \left[e^{\frac{-G}{n^2L}} + \frac{G}{n^2L} e^{-\frac{G}{n}} \right]^{nL}. \quad (9)$$

再算 q_t :

$$q_t = \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{G}{n} \right)^k \cdot e^{-\frac{G}{n}}}{k!} \cdot \left(1 - \frac{1}{nL} \right)^k \cdot \frac{1}{1 - e^{-\frac{G}{n}}} \right\} \cdot \left\{ \sum_{r=0}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{nL} \right)^r \cdot P(X_0 = r) \right\} \cdot \left\{ \prod_{i=1}^{2L-1} [P(Z_i = 0) + P(Z_i = 1) + \sum_{k_i=2}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{nL} \right)^{k_i} \cdot P(Z_i = k_i)] \right\} = \left[e^{\frac{-G}{n^2L}} + \frac{G}{n^2L} e^{-\frac{G}{n}} \right]^{2L-1} \cdot e^{-\frac{S}{n}} \cdot \frac{e^{\frac{-G}{n^2L}} - e^{-\frac{G}{n}}}{1 - e^{-\frac{G}{n}}}. \quad (10)$$

将(9)和(10)式代入(8)可得 R 的化简结果如下

$$R = \frac{1 - q_n}{q_t} = \frac{\left(1 - e^{-\frac{G}{n}} \right) \left[1 - e^{-\frac{S}{n}} \left(e^{\frac{-G}{n^2L}} + \frac{G}{n^2L} e^{-\frac{G}{n}} \right)^{nL} \right]}{e^{-\frac{S}{n}} \left(e^{\frac{-G}{n^2L}} - e^{-\frac{G}{n}} \right) \left(e^{\frac{-G}{n^2L}} + \frac{G}{n^2L} e^{-\frac{G}{n}} \right)^{2L-1}}. \quad (11)$$

3 实验数据分析和性能评价

在以上理论分析的基础上我们对这种新型随机接续协议进行了计算机模拟实验. 在仿真过程中, 利用了文献[5]的二叉树冲突分解算法研究结果对预约帧长进行了控制. 另外实验仍然假定呼叫到达过程为泊松分布. 结果如图 2~ 图 6 所示.

4 结果讨论

(1) 上面我们通过对系统模型的分析, 给出了

新型控制信道随机接续协议算法在划分不同微时隙数的情况下控制信道吞吐率与预约呼叫信号的平均重发次数, 每时隙接入呼叫数和平均延迟时间等参数的解析式. 通过对模型的仿真实验, 由图 2a、图 2b 可见呼叫信号的平均重发次数仿真值与理论值很吻合, 呼叫信号的平均延迟时间在吞吐率低时也能很好地吻合, 但 G 较大时误差较大, 并且仿真值要好于理论值. 分析原因: 一是我们所给的平均时延的解析式是假设系统处于平衡状态下的近似解, 二是仿真实验利用了文献[5]关于二叉树冲突分解算法的结果, 使得系统在重载情况下性能有所改善. 不过总体来看, 理论分析结果与计算机仿真值是相符合的.

(2) 图 3~ 图 6 给出了在不同微时隙数划分情况下系统各性能参数与吞吐率 G 的关系曲线. 从以上图中分析可知, 微时隙数 n 取 2 时也比 n 取 1 (即不划分微时隙) 时的各项性能好. 显然当 n 取值越大各参数性能也会越好, 但从图 5 和图 6 曲线走势来看, 当 n 取大于等于 6 以后, 每时隙接入呼叫数和呼叫重发次数已很接近; 而由图 3 可见当 n 取 8 以后有效吞吐率曲线已几乎重叠, 由图 4 可知呼叫平均延迟时间(包括成功预约后发送呼叫信号所需要的延迟时间)在 n 取 2 以后就已非常接近. 因此考虑到划分微时隙对系统的额外开销等因素, 微时隙数取 6~ 8 较好.

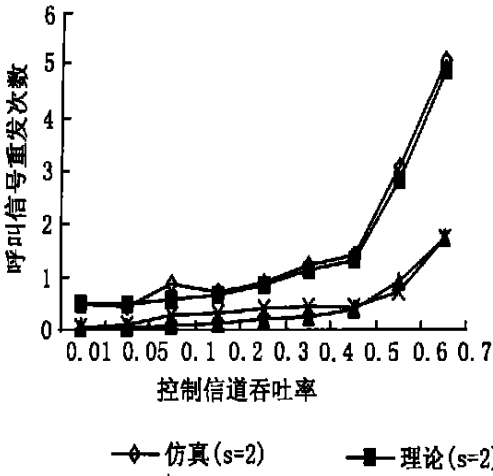


图 2a 取不同微时隙数情况下呼叫信号重发次数仿真值和理论值比较

Fig. 2a Comparison on recalls between the result of stimulation and analysis

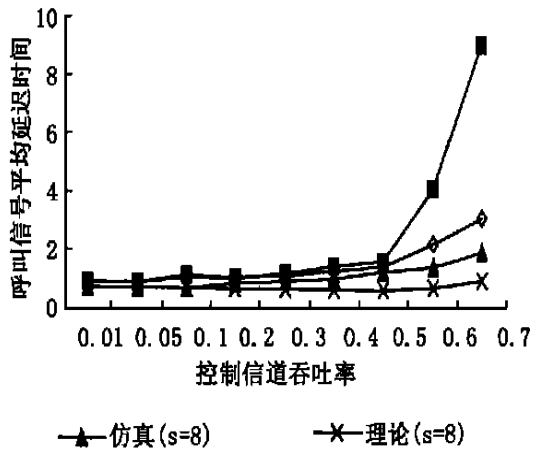


图 2b 取不同微时隙数情况下呼叫信号平均延迟时间仿真值和理论值比较

Fig. 2b Comparison on delay between the result of stimulation and analysis

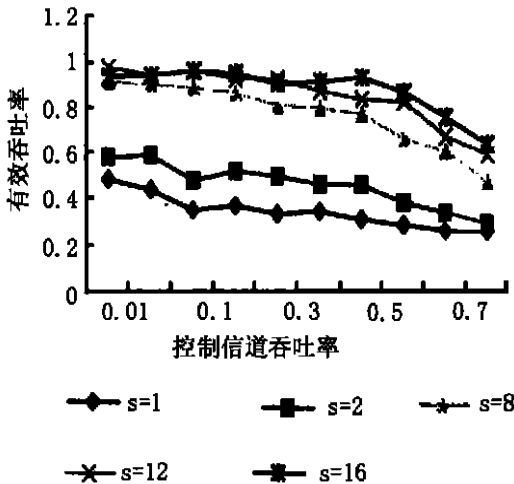


图 3 吞吐率与有效吞吐率之间关系
Fig. 3 Relation between arrival rate and throughput rate

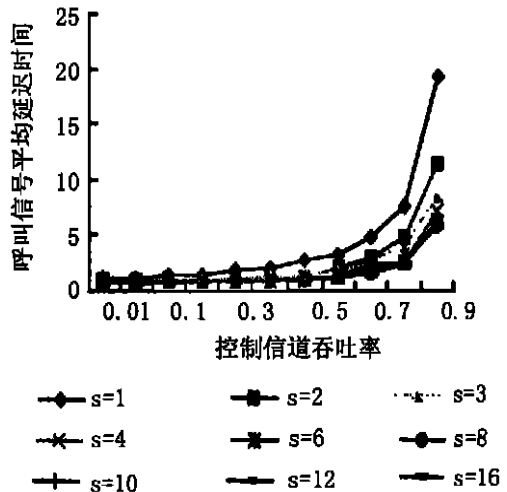


图 4 吞吐率与平均时延之间关系
Fig. 4 Relation between arrival rate and average delay

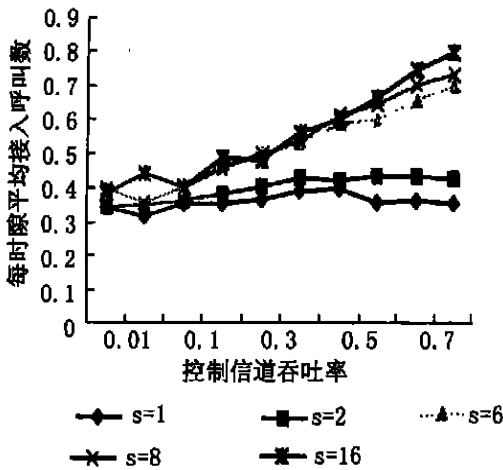


图 5 吞吐量与平均接入呼叫数之间关系
Fig. 5 Relation between arrival rate and average access amounts

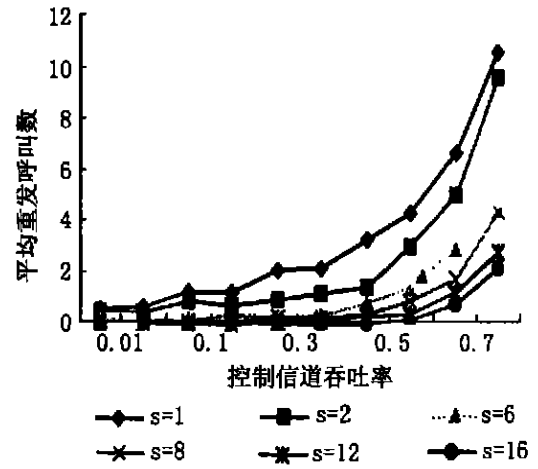


图 6 吞吐量与呼叫平均重发次数之间关系
Fig. 6 Relation between arrival rate and average recalls

5 结 论

SFCR- PRMA 协议是一种利用微时隙预约, 预约帧长动态可调的改进型数字集群系统离散接入控制信道的随机接入协议. 我们利用随机概率理论对该协议进行了理论分析, 得到了该协议下每时隙成功接入预约申请数、平均重发预约申请数以及呼叫信号的平均总时延等参数的解析式. 经证明实验结果和理论值是相符的, 另由上面分析可知该协议对系统各项性能参数均有较大的改善, 当微时隙数取 6 后控制信道的有效吞吐量达到原协议的 2 倍左右, 即控制信道的通信容量有了极大的提高, 所得结论对于数字集群系统的开发具有实际意义, 同时该协议算法也可推广应用于其它的系统

中.

参考文献:

- [1] GOODMAN D J. Packet reservation multiple access for local wireless communications[J]. IEEE Trans On Commun, 1989, 37(8) : 885—890.
- [2] NANDA S. Performance of PRMA: a packet voice protocol for cellular systems[J]. IEEE Trans VT, 1991, 40(3) : 584—598.
- [3] 赵东风. 一种新的时隙式随机多址系统分析方法研究 [J]. 电子科学学刊, 1997, 19(6) : 814—819.
- [4] 张宗军, 张乃通, 谭学治. 数字集群系统离散接入主控信道的性能分析和评价 [J]. 高技术通讯, 2001, 6: 52—55.
- [5] 赵东风, 李必海, 郑苏民. 二叉树形冲突分解算法研究 [J]. 电子科技大学学报, 1996, 25(增刊 2) : 260—264.

A packet reservation random access protocol for digital trunking systems

WANG Ya ning, ZHAO Dong-feng, Sun Quan, LI Jian

(Department of Communication Engineering, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: A kind of modified packet reservation random access protocol for digital trunking systems is studied, which could reduce collisions among packet reservations and increase the system's throughput. Multiple access theory is used to analysis this simulation shows that the performance of this system can be improved markedly protocol. Simulation shows that this system can be improved markedly.

Key words: digital trunking system; multiple access; packet reservation; throughput