

一种动态利用码资源的 CDMA 系统性能研究¹

李晓坪 郑 露 吴诗其

(电子科技大学信息系统研究所 成都 610054)

摘 要 本文提出了一种基于随机预约 ALOHA 访问方式, 能支持语音和数据业务的动态使用码资源的码分多址访问协议。在该协议中, 语音终端采用预约请求排队访问方式, 数据终端采用时隙 ALOHA 方式传输数据分组。理论分析和计算机仿真结果表明, 该协议能有效地提高系统码资源的利用率。在系统处于重负载情况下该协议能优先保证语音业务服务质量, 而处于轻负载下系统码资源能为数据业务充分使用。

关键词 动态码分多址访问协议, 预约 ALOHA, 时隙 ALOHA, 业务服务质量

中图分类号 TN913.22, TN914

1 概 述

近年来, 国外一些文献相继提出适应于扩频无线分组网并支持语音 / 数据综合业务的协议。这些协议较好地解决了有限码资源的 CDMA 系统中业务综合问题。预约码分多址(RCMA) 协议^[1]充分利用语音业务的通话间的静默期来传递其它业务分组, 在系统码资源有限的情况下大大提高了系统容量和信道利用效率。同时也能较好地解决语音 / 数据的综合问题。但是由于终端采用时隙 ALOHA(Additive Links On-line HAWAI) 方式获得信道, 系统处于重负载情况时分组接入碰撞概率会增大, 系统性能急剧恶化。另外一种动态利用码的方案^[2]专门划分一个频段作为语音终端接入请求信道。语音终端先通过接入请求信道发请求分组, 基站根据当前系统码地址状态, 对其成功分配一个码地址后才能开始通信。数据分组的发送不经过请求信道, 基站在有空闲码地址时轮询每个数据终端。该协议能保证语音质量不受数据业务的影响, 但轮询过程的实现复杂, 并在支持不同业务负载时的灵活性方面显得不足。

为了克服以上协议的不足并进一步扩大系统容量, 本文提出了动态 CDMA 协议(DCDMA)。该协议采用随机预约 ALOHA 方式, 针对不同业务的特点动态利用码资源。在该协议中, 语音终端采用预约请求排队访问方式, 数据终端采用时隙 ALOHA 方式传输数据分组。这样, 既可以在重负载情况下优先保证语音业务的质量, 同时在处理数据业务的传输上又具有足够的灵活性。

2 协议描述

2.1 业务模型

语音终端处于下列三种状态之一: 静默、竞争或预约状态。语音终端采用慢语音激活检测器, 语音模型由马尔可夫两状态转移模型(图 1) 描述。这个模型需用四个参数描述, 分别为: t_1 语音处于有声期的平均持续时间, t_2 语音处于静默期的平均持续时间, δ 由静默期到有声期的转移概率, γ 由有声期到静默期的转移概率:

$$\gamma = 1 - \exp(-\tau/t_1), \quad \delta = 1 - \exp(-\tau/t_2). \quad (1)$$

¹ 1998-07-08 收到, 1998-12-25 定稿

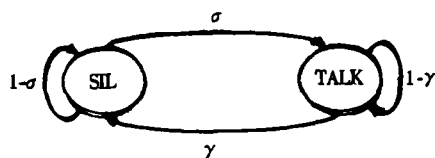


图 1 语音状态转移模型

其中 t_1 、 t_2 的典型值分别为 1、1.35s， τ 为传输一个 CDMA 分组所需时间。定义一个地址码传送一个分组的时间为一个时隙。语音终端每个时隙产生一个语音分组。

数据终端产生的业务有可能是不连续的。假设数据分组到达服从泊松分布，以 R_d 表示数据终端产生的数据业务的平均比特率， R_s 为语音信号速率，本文假设 $R_d < R_s$ 。数据终端产生的数据流经过编码器后被打包成与语音分组相同格式的分组输出。用 δ_d 表示在每个时隙产生一个分组的概率，又因为数据终端每个时隙产生一个分组，由此可得

$$R_d = R_s \times \delta_d + 0 \times (1 - \delta_d) = \delta_d R_s. \quad (2)$$

2.2 协议描述

由于语音对实时性要求很严格，而数据则能容忍较大的时延，但是它对误码率要求很高。因此在语音和数据同时申请信道资源时，应使得语音优先接入以保证语音分组的及时传输。并且，为了缓解业务负载过重时系统内语音和数据性能出现的急剧恶化，在 DCDMA 协议中语音和数据通过不同的方式接入基站。

语音业务采用预约请求排队访问方式。有待传分组的话音终端以 S-ALOHA 方式通过专门的接入请求信道发送请求分组。基站成功收到请求分组后，根据当前系统的码状态分两种情况处理。如果此时有空闲码或码不是全被话音终端占用，则基对话音终端分配一个码地址，从下一时隙开始该话音终端就用此信道进行通信。如果此时码地址已全被预约，则基站维持一 FCFS 排队队列，将新的请求分组推入此队列中进行等待直至有空闲码出现。同时基站通过下行链路通知该终端此时的状况。基站标记被成功预约的码地址，以避免其它类型的终端选择该码地址而发生碰撞。话音终端状态由有声期转移到无声期时，该码地址重新标记为空闲。

对于数据业务来说，采用 ALOHA 方式更能体现其特点和提高信道的利用率。基站在每个时隙的末端向所有的终端广播码地址状态，数据终端从所有空闲码地址中随机选择一个进行分组传输。如果该数据分组传输成功，则基站在该时隙末尾即时广播一确认分组。但是数据终端并不预约该码地址，而是在下一个时隙重新竞争信道以传输分组。如果该信息分组传输不成功（数据终端未收到确认信息），则在下一时隙进行重传。

话音终端所发的接入请求分组比信息分组短许多。系统可先选定若干伪随机码序列作为固定接入信道用，然后在此基础上，每个伪随机码通过子码生成器生成多个相互正交的子码来构成多个接入请求子信道，它们与作为信息信道的码序列之间保持正交^[3]。

3 协议模型

假设系统中有 N 个地址码，同时支持的话音终端数和数据终端数分别为 M_v 、 M_d 个。一个码地址传输一个分组的时间 τ 与话音终端处于有声期和静默期的时间 t_1 、 t_2 相比较是很小的，故可认为话音终端在一个时隙内最多发生一次状态转移。DCDMA 系统中语音状态转移过程可由排队论有限源理论的 $M/M/N/M_v - N$ 马尔可夫排队模型来描述。其中 $M_v - N$ 表示基站允许最多 $M_v - N$ 个终端排队。每个终端由静默期到有声期的平均转移速率为 $\lambda = 1/t_2$ ，由有声期到静默期的平均转移速率为 $\mu = 1/t_1$ 。由于语音和数据按不同的方式去占用信道，协议保证语音业务的优先接入，并且数据业务状态不会影响语音业务的性

能, 因此分析语音分组丢失可以不用考虑数据终端的影响。于是第 i 个终端的转移速率为

$$\begin{aligned}\lambda_i &= (M_v - i)\lambda, \quad i = 0, 1, 2, \dots, M_v - 1; \\ \mu_i &= \begin{cases} i\mu, & i = 1, 2, \dots, N - 1, \\ n\mu, & i = N, \dots, M_v. \end{cases}\end{aligned}\quad (3)$$

由排队论理论可求得其状态概率

$$P_i = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{i-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_i} P_0, \quad (4)$$

$$\begin{aligned}\text{其中 } \sum_{i=0}^{M_v} P_i &= 1; P_0 = \left[1 + \sum_{i=1}^{M_v} \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{i-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_i} \right]^{-1} \\ &= \left[1 + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{(M_v-1)(M_v-2)\cdots(M_v-i)\lambda^i}{\mu^i i!} + \sum_{i=N}^{M_v} \frac{(M_v-1)\cdots(M_v-N+1)\cdots(M_v-i)\lambda^i}{N! N^{i-N} \mu^i} \right]^{-1}.\end{aligned}$$

定义 Q_k 为当一个语音终端其请求分组被基站成功接收时刻在系统中已有的语音终端个数 (包括正在接受服务的语音终端和基站排队的语音终端之和, 但不包括该刚进入的终端) 为 k 的概率:

$$Q_k = \phi(M_v - k)P_k, \quad k = 0, 1, \dots, M_v - 1; \quad (5)$$

其中 ϕ 为系数。又因为 $\sum_{k=0}^{M_v-1} Q_k = 1$, $\phi = \frac{1}{M_v - L_q}$, 其中 $L_q = \sum_{i=0}^{M_v} iP_i$ 为正在接受服务的和处于等待状态的终端的平均个数。

设基站排队的终端按先到先服务, 则刚到达的终端必须等到前面先到达的终端服务完毕 (即都分配到信道后) 才能接受服务, 但是, 在刚到达的语音终端等待服务的过程中, 排在其前面的语音终端有可能转入静默期, 其转移概率为 γ , 每个语音终端状态转移相互独立。因总共在排队的终端数为 $k - N$ 个, 则有 a 个转移到静默期而 $k - N - a$ 个仍处于有声期的概率为: $p_{(a)} = C_{k-N}^a (1 - \exp(-D/t_1))^a (\exp(-D/t_1))^{k-N-a}$, 而同时所考虑的语音终端处于有声期的概率为 $\exp(-D/t_1)$, t_1 为语音终端处于有声期的平均时间。由此很容易求得所考虑终端在基站排队时间的概率分布 $F_d(D)$:

$$F_d(D) = P_r(d < D) = 1 - \sum_{a=0}^{k-N} \sum_{k=N}^{M_v-1} Q_k p_{(a)} \sum_{i=0}^{k-N-a} \frac{(N\mu D)^i}{i!} e^{-N\mu D}, \quad (6)$$

其等待时间的概率密度函数 $f_d(D) = F_d(D)$ 。

设语音分组允许最大时延为 $D_{\max}$, 当分组时延超过 $D_{\max}$ 时该分组将被丢失。语音分组丢失率为:

$$P_{\text{drop}} = E \left[\frac{D - D_{\max}}{t_1} \right] = \int_{\tau}^{\infty} \int_{D_{\max}+\tau}^{D_{\max}+t_1} f_t(t) f_d(D) \frac{D - D_{\max}}{t_1} dD dt, \quad (7)$$

其中 $f_t(t)$ 为语音终端处于有声期的时间分布密度函数, $f_t(t) = \exp(-t/t_1)$ 。分组丢失将影响语音质量, 通常允许的最大分组丢失率不超过 1%。

在分析数据分组时延时, 先假设数据终端缓存为无限大。取任一数据终端为研究对象, 用 buf_i 表示该终端缓存中的分组个数。每个数据终端在一个时隙内最多只到达一个分组, 其到达过程为马氏过程。假定 λ_i^d 为由状态 buf_{i-1} 到状态 buf_i 的状态转移概率。 μ_{di} 为由状态 buf_i 到状态 buf_{i-1} 的转移概率, h 为在该时隙未发生状态转移的概率。用 w 表示一个数据终端在一个时隙成功发送一个分组的概率。数据终端的分组发送采取 S-ALOHA 方式, 在

每个时隙开始从基站广播的可用信道中随机选取一个, 故其成功与否依赖于此时处于预约状态和排队状态的话音终端个数。下面的分析只针对感兴趣的平衡状态来进行。用 N_a 表示此时可用码或信道的个数, 则

$$N_a = \sum_{k=0}^N (N-k)P_k + \sum_{k=N+1}^{M_v} (N-N)P_k = \sum_{k=0}^{N-1} (N-k)P_k; \quad (8)$$

其中 P_k 为系统中处于预约状态和排队状态的话音终端的个数之和为 k 的概率。设系统中总的的数据终端个数为 M_d , 处于有分组发送的数据终端个数为 M'_d , 则

$$M'_d = (1 - P_{\text{buf}_0})M_d, \quad (9)$$

P_{buf_i} 为该终端缓存中有 i 个待发分组的概率。数据终端发送成功的条件是没有其它的数据终端与它竞争同一信道。因此有

$$w = \left(\frac{N_a - 1}{N_a} \right)^{(M'_d - 1)P_d} \frac{1}{N_a} C_{N_a}^1 = \left(\frac{N_a - 1}{N_a} \right)^{(M'_d - 1)P_d}. \quad (10)$$

w 为数据分组在一个时隙中成功发送的概率。 P_d 为数据终端的发送许可概率。到此, 可以获得数据状态转移图中参数如下:

$$\begin{aligned} \lambda_i^d &= \delta_d(1 - w), \\ \mu_i^d &= w(1 - \delta_d), \end{aligned} \quad (11)$$

其中 δ_d 为每个时隙产生一个数据分组的概率。

数据终端稳态时的状态概率为

$$P_{\text{buf}_i} = \frac{\lambda_0^d \lambda_1^d \cdots \lambda_{i-1}^d}{\mu_1^d \mu_2^d \cdots \mu_i^d} P_{\text{buf}_0}, \quad (12)$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} P_{\text{buf}_i} = 1. \quad (13)$$

可对上式进行数值求解以求得各状态概率。

设数据缓存中第一个分组所经历的时延为 i 个时隙, 则其概率分布 $P_{(i)}$ 为

$$P_{(i)} = (1 - w)^i w. \quad (14)$$

设在任一数据终端中某一分组到达时其缓存中已有 j 个分组, 则直到它发送成功共经历的时延 D_{delay} 为

$$D_{\text{delay}} = \sum_{j=0}^{\infty} (j+1)P_{\text{buf}_j} \sum_{i=0}^{\infty} iP_{(i)}. \quad (15)$$

4 数值及仿真结果

在这一节, 将给出性能分析的仿真结果, 在仿真过程中, 使用了如下参数: $R_s = 8\text{kb/s}$, $R_d = 1.2\text{kb/s}$, 扩频码个数 (或信道数) $N = 40$, 分组长度为 224bit 外加 64bit 的分组头。信道传

送一个分组所需时间(即一个时隙长度)为 $\tau = 20\text{ms}$, 语音分组最大允许时延 $D_{\max} = 40\text{ms}$, 语音分组允许的丢失率 $P_{\text{drop}} \leq 0.01$ 。

仿真过程中, 地址码数(或信道数) $N = 40$, 选择其中 39 个为信息分组传输信道, 另外 1 个用做接入信道, 假定它可以产生 4 个子信道。

图 2 表明了系统的支持语音业务的情况下, 语音分组丢失率随语音终端数而变化的情况, 从中可以看到, 尽管在业务量低时, 和 RCMA 比较起来 DCDMA 的分组丢失率稍高, 但仍满足 $P_{\text{drop}} \leq 0.001$ 的要求, 而在重业务负载下 DCDMA 协议能有效地避免终端接入时的碰撞, 降低分组丢失率, 性能优于 RCMA, 或者说在同样的语音分组丢失率要求下, 与 RCMA 比较起来, 能增大系统容量。

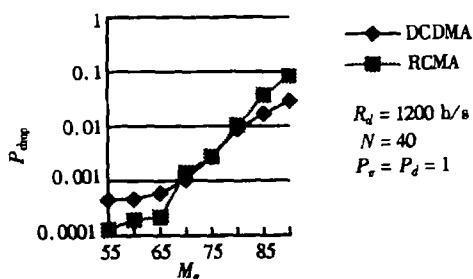


图 2 数据终端数 $M_d = 0$ 时语音分组丢失率 P_{drop} 与语音终端数 M_v 的关系

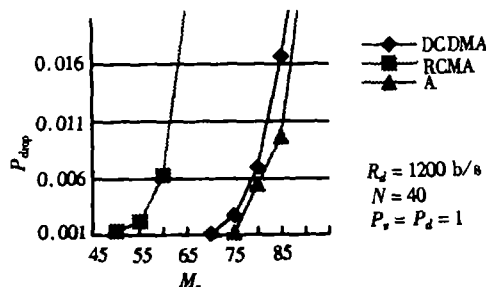


图 3 数据终端数 $M_d = 20$ 时语音分组丢失率 P_{drop} 与语音终端数 M_v 的关系

图 3 示出了数据终端数为 20 时, 在 RCMA 和 DCDMA 系统中语音分组丢失率和数据分组时延随语音终端数的变化而变化的情况。其中曲线 A 为理论分析结果。在 RCMA 中, 语音分组和数据分组以同样的方式竞争信道, 它们之间相互影响, 使得数据分组的时延和语音分组丢失率性能几乎同时恶化; 在 DCDMA 中, 由于语音和数据采取了不同的方式接入系统, 避免了数据业务对语音业务的影响, 同时由于基站对语音终端进行了排队处理, 进一步减小了语音之间的相互碰撞, 因此, 在同样的条件下, 能支持的语音终端数较 RCMA 多 20 个以上。这说明了 DCDMA 能大大提高系统资源利用效率。

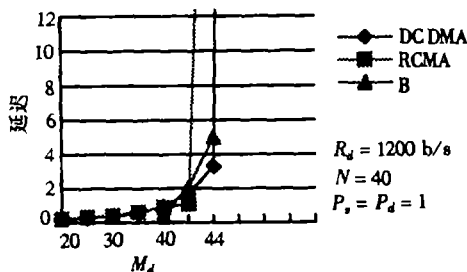


图 4 数据终端数 $M_v = 40$ 时数据分组平均时延与语音终端数 M_d 的关系

图 4 示出了在 $M_v = 40$ 的情况下语音分组的丢失率及数据分组的时延随数据终端数而变化的情况, 结果表明 DCDMA 中语音业务可以影响数据业务, 但数据业务不会反过来影响语音业务。曲线 B 是 DCDMA 时的理论分析结果。

5 结 论

本文提出的 DCDMA 协议对不同业务进行不同的处理。话音业务通过专门信道接入并对暂时未能分配到信道的话音请求分组在基站进行排队,从而大大减少了发生碰撞的概率并且避免了在重业务情况下对数据分组的影响。通过对 DCDMA 系统进行数学分析和数值仿真,结果表明话音分组丢失率和数据分组时延都较 RCMA 协议得到明显改善。

总结如下几点: (1) 重业务负载时 DCDMA 系统能优先保证高优先级业务服务质量,即数据业务的加入不会影响话音业务。(2) 话音业务负载较轻时其占用的码资源较少,余下的码资源能方便地被数据业务使用。(3) 通过系统仿真,注意到基站维持一个话音请求分组排队队列对提高系统性能具有重要的意义,特别是在重话音业务负载下,能大大减少接入时的碰撞。另外由于基站对各话音终端进行统一的码地址分配,话音业务最大可能的及时接入,从而极大地减少了系统中同时处于竞争状态的话音终端数,这反过来又进一步减少接入碰撞概率。在满足一定的服务质量下只需更少的接入信道个数。

参 考 文 献

- [1] Tan Lijun, Zhang Qi Tu. A reservation random-access protocol for voice/data integrated spread-spectrum multiple-access systems. IEEE J. on Select. Areas Commun., 1996, SAC-14(9): 1717-1727.
- [2] Fantacci R, Zoppi L. A CDMA wireless packet network for voice-data transmissions. IEEE Trans. on Veh. Technol., 1997, VT-45(10): 1162-1165.
- [3] Chih Lin I, Gitlin R D. Multi-code CDMA wireless personal communication network. Proc. ICC'95, Washington: 1995, 1060-1064.

PERFORMANCE EVALUATION FOR DYNAMIC CODE ALLOCATION CDMA SYSTEM

Li Xiaoping Zheng Lou Wu Shiqi

(Institute of Communication and Information Eng., UESTC of China, Chengdu 610054)

Abstract A new dynamic code allocation CDMA (DCDMA) protocol, which can support voice and data services simultaneously, is investigated in this paper. In DCDMA protocol, a voice terminal will reserve a spreading code only in talkspurt. The base station assigns a code after successfully receiving a request packet through a special request channel at the beginning of each talkspurt. Unlike a voice terminal, a data terminal must contend a spreading code for each packet transmission. So the code utilization can be significantly improved in DCDMA system. An analytical model and computer simulation is performed for evaluating the performance of the DCDMA protocol. The results show that the DCDMA protocol is very effective in utilizing code resource, and the QOS requirement on voice calls is still satisfied while the number of data terminal is increased.

Key words DCDMA, Reservation ALOHA, Slotted-ALOHA, Service QOS

李晓坪: 男, 1973 年生, 硕士生, 主要研究方向为多媒体通信和宽带 CDMA 多用户检测及功率控制技术。

郑 露: 女, 1975 年生, 硕士生, IEEE 学生会会员, 主要从事移动通信网络 MAC 层协议的研究。

吴诗其: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 中国通信学会理事。主要从事卫星移动通信、个人通信的研究, 发表论文近百篇, 著作两部。六次获部、省级科技进步奖。