

多媒体 CDMA 系统在功率约束条件下的业务容量分析¹

王 宇 李少谦 李乐民

(电子科技大学通信抗干扰技术国防重点实验室 成都 610054)

摘 要 码分多址接入 (CDMA) 技术可以灵活地支持无线多媒体业务传输。该文分析了多小区环境下 CDMA 系统上行链路的多媒体业务容量, 主要讨论了用户最大发射功率约束条件在不同用户激活因子情况下对系统容量的影响。分析和计算结果表明用户最大发射功率约束使系统的容量有所降低。

关键词 CDMA, 多媒体, 激活因子, 功率约束

中图分类号 TN914.4

1 引 言

码分多址 (CDMA) 接入是一种支持无线多媒体业务运用的有效方案, 并被第三代移动通信系统所采纳。在多媒体 CDMA 系统中, 不同业务有不同的业务质量 (QoS) 要求和不同的传输速率, 系统通过控制用户的扩频增益和发射功率来保证多媒体通信的正常进行。当用户的传输速率提高, 信道传播条件恶化或者受到的干扰增加时, 都需要快速的功率控制来增加用户的发射功率, 以保证其传输质量。然而, 移动用户的最大发射功率是受限的, 当最大发射功率不能满足所需发射功率时, 将使该用户的质量下降甚至无法得到保证, 同时增加了对系统内其他用户的干扰, 直接影响到系统的容量。

文献 [1, 2] 讨论了多媒体 CDMA 系统的容量问题, 但假设移动用户可以有无穷大的发射功率。文献 [3, 4] 虽然分析了用户最大发射功率限制对系统容量的影响, 但他们只考虑了系统中仅有单一业务的情况。文献 [5] 分析了多媒体 CDMA 系统在用户最大发射功率受限情况下的容量, 但没有考虑蜂窝小区之间的相互干扰, 并且忽略了用户激活因子的影响。本文将讨论多小区环境下, 在不同激活因子的情况下, 用户最大发射功率约束对多媒体 CDMA 系统上行链路容量的影响。

2 系统模型

我们考虑一个多小区 CDMA 系统的上行链路, 对每个基站而言, 它将接收到本小区内所有用户的信号功率 S_{ic} 以及其他小区所有干扰用户的信号功率 S_{oc} , 定义 $f = S_{oc}/S_{ic}$ 为来自本小区以外的其他小区的干扰因子, 在用户业务均匀分布以及传播损耗按距离的四次幂衰减的情况下, 文献 [6] 给出了干扰因子在不同阴影衰落下的取值: 当对数正态阴影衰落的标准偏差为 0dB 时, $f = 0.44$; 标准偏差为 8dB 时, $f = 0.55$ 。假设系统支持 M 类业务, 其中第 i 类业务有 N_i 个用户, 为方便起见, 我们称这 N_i 个用户为第 i 类用户。每个用户可以用一个两态的马氏链模型来表示。当一个 i 类用户处在激活状态时, 他以速率 r_i 传输数据, 对应扩频因子为 W/r_i , W 为信号的扩频带宽, 当该用户处在非激活状态时, 不传输数据。用户在激活和非激活状态的驻留时间分别服从参数为 τ_{i1} 和 τ_{i0} 的指数分布, 两种状态间的转移概率分别为 $1/\tau_{i1}$ 和 $1/\tau_{i0}$ 。该用户处在激活状态的相对驻留时间称为激活因子, 用 ρ_i 表示, $\rho_i = \tau_{i1}/\tau_{i0} + \tau_{i1}$ 。此外, 不同类用户有不同的最大发射功率约束, 和不同的 QoS 要求。通常可以用比特能量干扰

¹ 2000-09-01 收到, 2001-02-12 定稿

国家“863”资助课题 (863-317-03-01-01-04-20)

噪声比 (E_b/I_0) 来衡量 QoS 要求, 因为在传输技术确定的情况下, 由 E_b/I_0 可以推导得到其错误比特概率。

3 容量分析

当所有用户都处于激活状态时, 基站接收到第 i 类业务的第 j 个用户的比特能量干扰噪声比为

$$\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_{ij} = \frac{W}{r_i} \frac{h_{ij}p_{ij}}{\left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} h_{mn}p_{mn}\right)(1+f) - h_{ij}p_{ij} + nW} \quad (1)$$

式中 h_{ij} 和 p_{ij} 分别表示第 i 类第 j 个用户的信道增益和发射功率, n 为基站接收机处的热噪声功率谱密度。求解系统容量的问题可以归结为在满足下列 QoS 约束和最大发射功率约束的条件下, 系统最多可以容纳多少个不同类的用户:

$$\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_{ij} \geq \gamma_i \quad (2)$$

$$p_{i,\max} \geq p_{i,j} > 0 \quad (3)$$

以上两式中, $i \in (1, 2, \dots, M)$, $j \in (1, 2, \dots, N_i)$ 。 γ_i 是 QoS 约束, 即目标比特能量干扰噪声比, $p_{i,\max}$ 为最大发射功率约束。为提高系统容量, 应尽量降低每个用户对其他用户的干扰, 可以令 (2) 式取等号, 即每个用户以保证 QoS 最小所需的功率发射, 由此可知

$$\left(\frac{W}{r_i\gamma_i} + 1\right) h_{ij}p_{ij} - \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} h_{mn}p_{mn}\right)(1+f) = nW \quad (4)$$

由上式知道在恰好保证业务质量约束的前提下, 第 i 类用户到达基站的接收功率应当满足下列条件:

$$s_i = h_{i1}p_{i1} = \dots = h_{iN_i}p_{iN_i} = I_t \left(\frac{W}{r_i\gamma_i} + 1\right)^{-1} \quad (5)$$

$$I_t = \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} h_{mn}p_{mn}\right)(1+f) + nW \quad (6)$$

可见, 用户所需的接收功率与系统的扩频带宽、该用户的传输速率、QoS 要求以及当前的总干扰水平有关。进一步可推导出

$$\left(\frac{W}{r_i\gamma_i} + 1\right) s_i \left[1 - (1+f) \sum_{m=1}^M N_m \left(\frac{W}{r_m\gamma_m} + 1\right)^{-1}\right] = nW \quad (7)$$

由 s_i 的正定性可知

$$\sum_{m=1}^M N_m \left(\frac{W}{r_m\gamma_m} + 1\right)^{-1} < \frac{1}{1+f} \quad (8)$$

(8) 式表明即使没有最大发射功率约束, 因为用户间相互干扰使得系统容量也是有限的。若再考虑最大发射功率约束条件 (3) 式并结合 (5) 与 (7) 式, 可得出

$$p_{i,\max} \geq p_{ij} = nW \left\{ h_{ij} \left(\frac{W}{r_i\gamma_i} + 1\right) \left[1 - (1+f) \sum_{m=1}^M N_m \left(\frac{W}{r_m\gamma_m} + 1\right)^{-1}\right] \right\}^{-1} > 0 \quad (9)$$

进一步推导可得出

$$\sum_{m=1}^M N_m \left(\frac{W}{r_m \gamma_m} + 1 \right)^{-1} \leq \frac{1}{1+f} \left\{ 1 - nW \left[\min_i \left(p_{i \max} \min_j (h_{ij}) \left(\frac{W}{r_i \gamma_i} + 1 \right) \right) \right]^{-1} \right\} \quad (10)$$

与 (8) 式相比, 可知最大发射功率约束条件降低了系统的容量。同时, 由 (10) 式的右边我们看到传输速率高、QoS 要求高、功率约束条件苛刻的业务对系统容量影响大, 而其中信道传播条件恶劣的用户对最大发射功率约束条件最敏感。

以上针对所有用户都处于激活状态的分析没有考虑各类用户的激活因子的影响, 或者说认为所有用户的激活因子都为 1, 在这种情况下由 (10) 式可以清楚看到最大发射功率约束对系统容量的影响。如果我们进一步考虑各类用户的激活因子的影响, 并假定所有用户是相互独立的, 那么此时系统中各类业务的激活用户数 N_m 为一个两项分布的随机变量, 假设第 m 类用户总数为 K_m , 激活因子为 ρ_m , $0 < \rho_m < 1$, 那么 N_m 的概率密度函数为

$$p(N_m = n_m) = \binom{K_m}{n_m} \rho_m^{n_m} (1 - \rho_m)^{(K_m - n_m)} \quad (11)$$

此时 (10) 式将以一定概率成立, 也就是说用户的 QoS 将以某一概率得到保证, 于是, 我们定义系统的平均中断概率 \bar{p}_{out} 来描述系统容量与用户 QoS 间的关系:

$$\begin{aligned} \bar{p}_{\text{out}} = p \left(\sum_{m=1}^M N_m \left(\frac{W}{r_m \gamma_m} + 1 \right)^{-1} > \frac{1}{1+f} \right. \\ \left. \times \left(1 - nW \left[\min_i \left[p_{i \max} \min_j (h_{ij}) \left(\frac{W}{r_i \gamma_i} + 1 \right) \right] \right]^{-1} \right) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

我们可以确定该概率的一个上界, 比如 $\bar{p}_{\text{out}} \leq 0.01$, 表示在任意时刻, 有 99% 以上的用户的 QoS 可以得到保证。由此可以推断, 在允许用户的 QoS 有所下降的情况下系统应当获得更大的容量, 后面的数值计算结果验证了这一推断。我们令

$$a_m = \left(\frac{W}{r_m \gamma_m} + 1 \right)^{-1} \quad (13)$$

$$c = \frac{1}{1+f} \left(1 - nW \left[\min_i \left[p_{i \max} \min_j (h_{ij}) \left(\frac{W}{r_i \gamma_i} + 1 \right) \right] \right]^{-1} \right) \quad (14)$$

于是, 由 (12) 式可推导得到

$$\begin{aligned}
 \bar{p}_{\text{out}} &= p\left(\sum_{m=1}^M a_m N_m > c\right) = \sum_{n_M=0}^{K_M} p\left(\sum_{m=1}^{M-1} a_m N_m > c - a_M n_M\right) p(N_M = n_M) \\
 &= \sum_{n_M=0}^{K_M} \left\{ \sum_{n_{M-1}=0}^{K_{M-1}} p\left(\sum_{m=1}^{M-2} a_m N_m > c - a_M n_M - a_{M-1} n_{M-1}\right) p(N_{M-1} = n_{M-1}) \right\} \\
 &\quad \times p(N_M = n_M) \\
 &= \sum_{n_M=0}^{K_M} \left\{ \sum_{n_{M-1}=0}^{K_{M-1}} \cdots \left[\sum_{n_2=0}^{K_2} p\left(a_1 N_1 > c - \sum_{m=2}^M a_m n_m\right) p(N_2 = n_2) \right] \cdots p(N_{M-1} = n_{M-1}) \right\} \\
 &\quad \times p(N_M = n_M) \\
 &= \sum_{n_M=0}^{K_M} \left\{ \sum_{n_{M-1}=0}^{K_{M-1}} \cdots \left[\sum_{n_2=0}^{K_2} \left(\sum_{n_1=\lfloor f(n) \rfloor}^{K_1} \binom{K_1}{n_1} \rho_1^{n_1} (1 - \rho_1)^{(K_1 - n_1)} \right) \binom{K_2}{n_2} \right. \right. \\
 &\quad \times \rho_2^{n_2} (1 - \rho_2)^{(K_2 - n_2)} \left. \left. \right] \cdots \binom{K_{M-1}}{n_{M-1}} \rho_{M-1}^{n_{M-1}} (1 - \rho_{M-1})^{(K_{M-1} - n_{M-1})} \right\} \\
 &\quad \times \binom{K_M}{n_M} \rho_M^{n_M} (1 - \rho_M)^{(K_M - n_M)} \tag{15}
 \end{aligned}$$

式中 $f(n) = \frac{1}{a_1} \left(c - \sum_{m=2}^M a_m n_m \right)$, 函数 $\lfloor f(n) \rfloor$ 完成对 $f(n)$ 的取整运算, 当 $f(n) < 0$ 时, 取 $f(n) = 0$.

4 数值计算结果

在以下的计算中, 我们考虑系统中只有话音和数据两类业务的情况, 更多业务类型的分析计算方法是类似的. 系统扩频带宽 $W = 5\text{MHz}$, 背景噪声功率谱密度 $n = 10^{-16} \text{mW/Hz}$, 两类业务具有相同的最大发射功率约束: $p_{1\text{max}} = p_{2\text{max}} = 500 \text{mW}$ 和最小路径增益: $\min_j(h_{1j}) = \min_j(h_{2j}) = 10^{-12}$, 其他的相关参数如表 1 所示.

表 1 计算参数

	传输速率 $r_i(\text{kb/s})$	激活因子 ρ_i	目标信干比 $\gamma_i(\text{dB})$
话音业务 1	32	0.43	7
数据业务 2	64	0.09	9

由本文第 3 部分的分析和上述参数计算得到系统在单小区和多小区环境下的容量. 需要指出的是, 本文假设基站采用全向接收天线而非扇区定向天线, 因此这里计算得到的容量实际为一个扇区内的容量. 在不考虑激活因子影响的情况下 (认为所有用户的激活因子都为 1), 我们计算得到系统容量曲线如图 1 和图 2 所示, 图 1 是没有发射功率约束条件下的系统容量界, 其中 $f = 0$ 为单小区系统时的小区容量, 此时小区最多可以同时支持 10 个数据用户和 3 个话音用户通信; $f = 0.44$ 和 $f = 0.55$ 时, 由于小区外的干扰增加, 使小区容量分别下降约 30% 和 35%. 图 2 是在最大发射功率为 500mW 约束条件下的系统容量界, $f = 0$ 时, 每小区只能支持最多 9 个数据用户和 3 个话音用户同时通信, 与图 1 比较可见, 最大发射功率约束使系统容

量降低了约 10%。图 3 和图 4 是考虑激活因子影响条件下的系统容量曲线, 此时两类业务的激活因子分别为 0.43 和 0.09。图 3 是没有功率约束条件下的容量曲线, 在允许平均中断概率为 0.1% 时, 单小区系统可以同时支持 10 个数据用户和 33 个话音用户通信; 图 4 是有 500mW 功率约束条件下的容量曲线, 在允许平均中断概率为 0.1% 时, 单小区系统只能同时支持 10 个数据用户和 27 个话音用户通信, 与无功率约束的图 3 相比, 系统容量下降约 20%。图 3、图 4 分别比图 1、图 2 的容量有显著提高, 这是因为当激活因子小于 1 时, 用户间的干扰得以减小, 尤其是数据用户的激活因子远小于话音用户的激活因子, 极大地降低了用户间的干扰, 干扰的降低意味着容量的增加, 此外, 允许一定程度的用户 QoS 损失也换来了容量的增大。

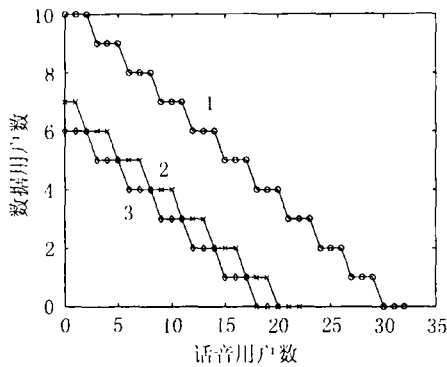


图 1 无最大功率约束情况下系统容量曲线
1: $f = 0$, 2: $f = 0.44$, 3: $f = 0.55$

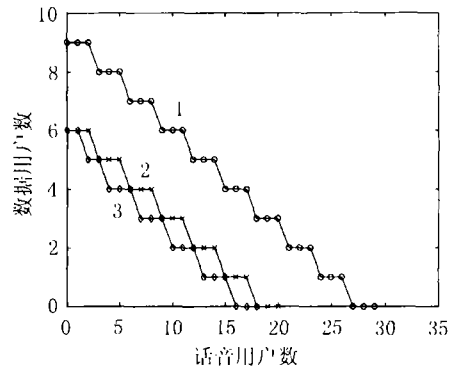


图 2 最大功率为 500mW 情况下系统容量曲线
1: $f = 0$, 2: $f = 0.44$, 3: $f = 0.55$

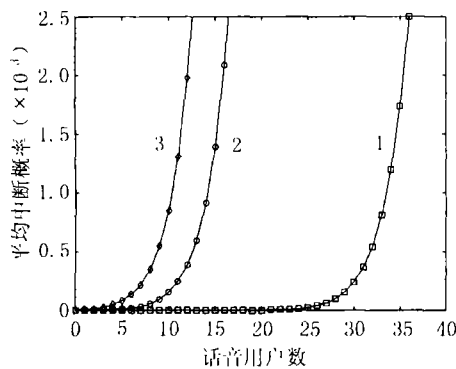


图 3 无最大功率约束, 数据用户数 = 10 情况下系统平均中断概率与容量关系曲线
1: $f = 0$, 2: $f = 0.44$, 3: $f = 0.55$

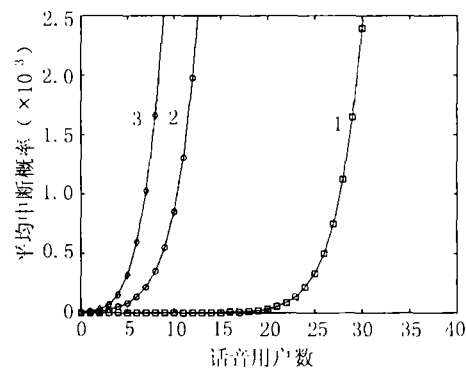


图 4 最大功率为 500mW, 数据用户数 = 10 情况下系统平均中断概率与容量关系曲线
1: $f = 0$, 2: $f = 0.44$, 3: $f = 0.55$

5 结 语

本文分析了单小区和多小区环境下, 在考虑或不考虑用户激活因子影响的情况下, 用户最大发射功率约束对多媒体 CDMA 系统容量的影响, 分析和计算结果表明用户最大发射功率约束使系统的容量有所降低。

参 考 文 献

- [1] T. H. Lee, J. T. Wang, Admission control for variable spreading gain CDMA wireless packet networks, *IEEE Trans. on V.T.*, 2000, 49(2), 565-575.
- [2] S. V. Hanly, Capacity and power control in spread spectrum macrodiversity radio networks, *IEEE Trans. on Commun.* 1996, COM-44(2), 247-256.
- [3] B. Hashem, E. S. Sousa, Reverse link capacity and interference statistics of a fixed-step power-controlled DS/CDMA system under slow multipath fading, *IEEE Trans. on Commun.* 1999, COM-47(2), 1905-1912.
- [4] S. A. Grandhi, J. Zander, Constrained power control in cellular radio systems, in *Proc. of IEEE VTC'94*, Stockholm, Sweden, 1994, 824-828.
- [5] A. Sampath, P. Sarath Kumar, J. M. Holtzman, Power control and resource management for a multimedia CDMA wireless system, *IEEE PIMRC*, Toronto, Canada, 1995, 21-25.
- [6] A. M. Viterbi, Andrew J. Viterbi, Erlang capacity of a power controlled CDMA system, *IEEE Journal on SAC*, 1993, 11(6), 892-899.

CAPACITY ANALYSIS FOR CDMA SYSTEMS WITH
MULTIMEDIA TRAFFIC UNDER POWER CONSTRAINTS

Wang Yu Li Shaoqian Li Lemin

(The Nat. Commun. Lab, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract Code Division Multiple Access (CDMA) is an effective technique to support radio multimedia service. This paper presents an analysis on the uplink capacity of a multimedia CDMA system under multicell environment. The effect of the users' maximum transmission power constraints on the system capacity is analyzed with and without considering the users' active factors. The derivations and computation results show that the users' maximum transmission power constraints decrease the system capacity.

Key words CDMA, Multimedia, Active factor, Power constraint

王 宇: 男, 1970 年生, 博士, 主要研究方向为 CDMA 移动通信系统中的无线资源管理.

李少谦: 男, 1957 年生, 教授, 通信抗干扰技术国防重点实验室副主任, 国家 863 个人通信技术专业专家组成员. 主要研究领域包括移动通信、个人通信、扩频通信、抗干扰通信等.

李乐民: 男, 1932 年生, 中国工程院院士, 教授、博士生导师, 研究领域为数字信息传输与通信网.