

多区蜂窝 CDMA 系统上行链路的 区内 C/I 平衡技术*

谭立军 李乐民

(电子科技大学信息所 成都 610054)

摘要 本文采用两种区内 C/I 平衡技术来控制多区蜂窝 CDMA 系统上行链路中移动台的发射功率,用以补偿阴影和路径损失的影响;采用与传统不同的小区平均中断概率 (Outage probability) 来评价它们的性能.

关键词 码分多址,扩频通信,功率控制,移动通信

1 引 言

扩频码分多址 (CDMA) 技术应用到数字蜂窝移动无线电系统,将进一步提高频谱利用的有效性,大大增加系统容量.然而,扩频 CDMA 系统与受频带限制的频分多址 (FDMA) 和时分多址 (TDMA) 系统不同只受到干扰的限制,任何减少干扰的措施都将提高蜂窝 CDMA 系统的性能.本文通过控制移动台的发射功率来减少多址用户的干扰.近年来,学术界在这方面已做了大量工作: Lee^[1] 在调查蜂窝 DS-SS-CDMA 综述一文中提出采用与距离幂次方成正比的功率控制算法,但分析性能时只考虑路径损失的影响,且在上行链路的分析中忽略了邻区用户干扰的影响;许多文献(如[2-7])提出采用开环和闭环方式来实现功率控制; Simpson^[2] 的研究结果表明,将上行链路闭环功率控制与编码和交织技术相结合可有效抵抗多谱勒频移的影响; Gilhousen^[3] 考虑移动台的发射功率只由本区基台控制,使基台接收功率相同; Ariyavistul 等考虑多径衰落用模拟方法研究了上行链路中采用基于绝对信号强度^[4]和基于信号干扰比 (SIR)^[5] 的反馈功率控制的接收信号干扰比的统计,但为了理论分析方便 Milstein 等^[6]却采用高斯分布统计; Soliman 等^[7]研究了上行链路采用开环功率控制的条件.早在 80 年代初期 Nettelon 和 Alavi^[8,9] 就将“C/I 平衡^[10]”的概念推广到扩频 CDMA 系统中,用以控制发射功率,用模拟方法比较了区内 C/I 平衡和区间 C/I 平衡的中心小区中断概率,研究当中只考虑路径损失的影响; Stuber 等考虑多径衰落的影响从理论上分析了单区制^[11]和多区制^[12]蜂窝 CDMA 系统的区域平均比特错误率.实际上各种功率控制算法很难补偿衰落引起

1993-09-28 收到, 1994-04-04 定稿

* 国家教委博士点基金资助项目

谭立军 男, 1966 年生, 博士, 从事移动通信与个人通信的研究.

李乐民 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 通信与电子系统专业.

的功率变化,但有必要考虑慢衰落的影响,移动无线电的慢衰落特性主要表现为呈对数正态分布的阴影。所以本文的工作包括:用区内 C/I 技术来补偿不可忽视的路径损失和对数阴影的影响,提出两种实现方案,采用不同于传统的评价指标——小区平均中断概率——来分析和比较了它们的性能。

2 上行链路的区内 C/I 平衡算法

定性地说,上行链路的区内 C/I 平衡算法是:基站控制本区各移动台的发射功率,使得在中心基站处所有上行链路的接收信号干扰比相等。设系统中有 N 个小区,分别为 C_1, C_2, \dots, C_N (\sqrt{N} 为整数),如图 1 所示。基站 B_i 位于小区 C_i 的中心,区 C_i 内有 L_i 个移动台 $M_{i1}, M_{i2}, \dots, M_{iL_i}$ 在同基站通信。设基站 B_i 接收到移动台 M_{ik} 的期望功率为 R_{ik} , 再设路径衰减因子为 A_{ikj} , 其中下标 “ ikj ” 表示第 i 区第 k 个移动台到基站 B_j 的链路,若 $i = j$ 则表示第 i 区的第 k 条上行链路,那么 i 区第 k 条上行链路的接收信号干扰比 $(C/I)_{ik}$ 为

$$(C/I)_{ik} = R_{ik} / \left\{ \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^{L_j} R_{jl} \frac{A_{jli}}{A_{jli}} - R_{ik} \right\}, \quad (1)$$

亦即干扰信号比 $(I/C)_{ik}$ 为

$$(I/C)_{ik} = \frac{1}{R_{ik}} \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^{L_j} R_{jl} \frac{A_{jli}}{A_{jli}} - 1. \quad (2)$$

区内 C/I 平衡的目的是使(1)或(2)式的右边与 k 无关,即 $(I/C)_{ik} = (I/C)_i$ 。由 $(I/C)_i$ 容易推出 i 区第 k 个移动台的发射功率 T_{ik} 为

$$T_{ik} = \frac{1}{1 + (I/C)_i} \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^{L_j} R_{jl} A_{jli} / A_{jli}. \quad (3)$$

下面采用两种方法得到 $(I/C)_i$ 电平,它们是 ERP (Equal Received Power) 和 ERTTP (Equal Received Total Power)

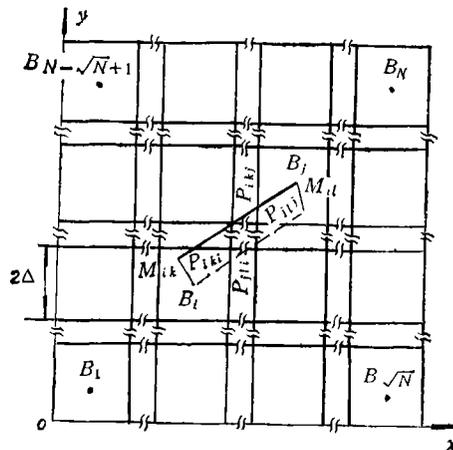


图 1 多区蜂窝 CDMA 系统的蜂窝结构

(1) ERP 保证系统中所有上行链路的接收功率相等,即 $R_{11} = \dots = R_{1L_1} = \dots = R_{N1} = \dots = R_{NL_N}$, 由此, (2) 式可简化为

$$(I/C)_i = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^{L_j} \frac{A_{jli}}{A_{jli}} - 1. \quad (4)$$

(2) ERTTP 保证各小区的总接收功率相等, 且保证同一区内所有上行链路的接收功率相等。设区 i 的总接收功率 R_{ii} , 那么该方案的条件数学上可表示为 $R_{i1} = R_{i2} = \dots = R_{iN} = R_i$, $R_{i1} = R_{i2} = \dots = R_{iL_i} = R_i (i = 1, 2, \dots, N)$, 显然 $R_i = L_i R_i$, $R_i = R_i / L_i$, 代入(2)式得

$$(I/C)_i = L_i \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^{L_j} \frac{1}{L_j} \frac{A_{jli}}{A_{jli}} - 1. \quad (5)$$

理论上这两种方法控制移动台发射功率的过程是相同的, 即根据衰减因子和各小区的用户数计算 $(I/C)_i$ 电平, 连同 R_i 或 R_i 代入(3)式, 计算出各移动台的发射功率, 以命令方式通知移动台将发射功率调整到该值上。

3 性能分析

3.1 系统和信道模型

直接序列扩频蜂窝 CDMA 系统由交换中心、基站和移动台三部分组成, 每个基站都有自己的特征序列, 它位于小区中心, 负责接续该区移动台的呼叫, 系统中包括多个面积相等的正方形小区, 如图 1 示。各移动台都有自己的扩频码序列, 交换中心也存有所有的码序列。基站还附加发出导频音, 它的一个作用是方便移动台测量各链路的衰减因子。本文分析不考虑具体的编码调制技术。为满足性能要求, 每个基站接收各移动台的载扰比必须不小于 -20dB 。为分析方便, 进一步有以下几点假设:

(1) 移动台在服务区内均匀分布。移动台 M_i 一旦落入 C_i 小区则不管其衰减状况如何, 总由该区基站 B_i 提供服务。

(2) 考虑固定型业务分布, 即总的在呼移动台 (active mobiles) 数固定, 设为 L_i , 但随机地分布在各个小区, 设区 C_i 中包含 L_i 个用户, 且 $\sum_{i=1}^N L_i = L_i$, 那么得到分布 $L = (L_1 L_2 \dots L_N)$ 的概率为

$$\Pr(L) = \frac{L_i}{N^{L_i} L_1! L_2! \dots L_N!}. \quad (6)$$

(3) 建立图示的直角坐标系, 由于每个小区的形状为正方形, 因此每个小区 C_i 的基站位置 $(x_i, y_i) = (\{2(i-1 - \text{int}[(i-1)/\sqrt{N}]\sqrt{N}) + 1\}\Delta, \{2\text{int}[(i-1)/\sqrt{N}] + 1\}\Delta)$, 其中 $\text{int}[x]$ 表示不超过 x 的最大整数, 2Δ 为正方形小区边长。处于小区 C_i 的第 k 个移动台的坐标为 (x_{ik}, y_{ik}) , 变量 x_{ik}, y_{ik} 的概率密度函数为

$$f_k(x_{ik}) = \begin{cases} (1/2)\Delta, & x_i - \Delta \leq x_{ik} \leq x_i + \Delta; \\ 0, & \text{其它.} \end{cases} \quad (7a)$$

$$f_2(y_{ik}) = \begin{cases} (1/2)\Delta, & y_i - \Delta \leq y_{ik} \leq y_i + \Delta; \\ 0, & \text{其它.} \end{cases} \quad (7b)$$

该移动台到区 C_j 的基台 B_j 的距离为 $R_{ikj} = \sqrt{(x_{ik} - x_j)^2 + (y_{ik} - y_j)^2}$.

(4) 本文信道模型考虑路径损失和对数正态分布阴影的综合影响,从移动台 M_{ik} 到基台 B_j 的路径衰减因子 A_{ikj} 为

$$A_{ikj} = 10^{(\xi_{ikj}/10)} R_{ikj}^{-\alpha}, \quad (8)$$

其中 $\alpha = 2-5.5$, 它随距离的变化而变化,一般来说,在郊区或距离较短时, α 较小;在稠密的大建筑物环境或距离较长时, α 较大. 由于我们考虑多区蜂窝系统,故取 $\alpha = 4$. ξ_{ikj} 是高斯随机变量,均值为 0,在城区标准方差 $\sigma = 6-10\text{dB}$, 其概率密度函数为

$$f_3(\xi_{ikj}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{\xi_{ikj}^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (9)$$

3.2 小区平均中断概率

反映系统性能的指标有很多,如比特错误率、呼损率等;当研究各种基带处理技术时采用比特错误率较好;若牵涉到信道的竞争和越区切换,则采用呼损率指标. 然而本文所关心的是正在通信的链路因接收载扰比低于某个门限时而不能正常通信的概率,即中断概率,它也是评价蜂窝系统性能的重要指标. 首先引入小区平均中断概率的概念. 过去一般考虑中心小区的中断概率,但中心小区的中断概率不能很好地反映整个系统的性能,在实际的系统中,边界的存在往往使靠边界的小区的中断概率与中心小区的中断概率不一样,而且不同的移动台用户数或它们的位置的变化也会使各小区的中断概率不一样,因此本文考虑将所有小区的中断概率作算术平均,得到小区的平均中断概率,并用此来评价多区蜂窝 CDMA 系统的性能.

如果小区 C_i 的接收信号干扰比低于满足性能要求的最低门限 γ , 就认为小区 C_i 被中断,其中断概率 O_i 为

$$\begin{aligned} O_i &= \Pr((C/I)_i < \gamma) = \Pr((I/C)_i \geq 1/\gamma) \\ &= \sum_{(L)} \Pr(L) \iiint f(\mathbf{X})f(\mathbf{Y})f(\xi) \Pr((I/C)_i \geq 1/\gamma | L, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \xi) d\mathbf{X}d\mathbf{Y}d\xi \\ &= \sum_{(L)} \Pr(L) \iiint f(\mathbf{X})f(\mathbf{Y})f(\xi) U((I/C)_i - 1/\gamma) d\mathbf{X}d\mathbf{Y}d\xi, \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $U(x)$ 为单位阶跃函数, $f(\mathbf{X})$, $f(\mathbf{Y})$ 和 $f(\xi)$ 分别为向量 \mathbf{X} , \mathbf{Y} 和 ξ 概率密度函数, 即 $f(\mathbf{X}) = \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^{L_i} f_1(x_{ij})$, $f(\mathbf{Y}) = \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^{L_i} f_2(y_{ij})$, $f(\xi) = \prod_{i=1}^N \prod_{k=1}^{L_i} \prod_{j=1}^N f_3(\xi_{ikj})$.

由此得小区的平均中断概率 O_a

$$\begin{aligned} O_a &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i \\ &= \sum_{(L)} \Pr(L) \iiint f(\mathbf{X})f(\mathbf{Y})f(\xi) \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U((I/C)_i - 1/\gamma) \right\} d\mathbf{X}d\mathbf{Y}d\xi \\ &= E \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U((I/C)_i - 1/\gamma) \right\} \approx \frac{1}{NM} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N U((I/C)_i^{(j)} - 1/\gamma). \end{aligned} \quad (11)$$

$(I/C)^{(j)}$ 为每次试验得到的干扰信号比的样值, 在每次试验时, 随机地产生 L_i 个移动台的位置 (x_{ij}, y_{ij}) , 累计各区的移动台数 $L_i (i = 1, 2, \dots, N)$, 并产生 $L_i N$ 个高斯正态分布的随机变量 ξ_{ikj} , 由(4)或(5)式可计算出每次试验的 $(I/C)^{(j)}$ 值。从而由(11)式可求出小区平均中断概率。

4 数值结果

本节根据(11)式给出大量数值结果, 见图 2—图 6, 图中横坐标为每小区的平均用户数 ($L = L_i/N$), 纵坐标为小区中断概率, 小区数 N 为参数。图 2—图 4 分别给出对数阴影的标准方差 $\sigma = 0\text{dB}$ (无阴影), 6dB 和 12dB 时采用两种方案的小区平均中断概率 (O_s)。由图可以看出: (1) 无阴影或阴影不严重时, 方案 ERP 比 E RTP 好, 但当

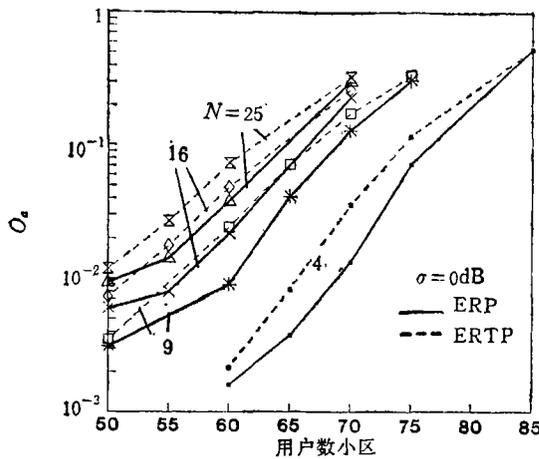


图 2 无阴影时 CDMA 系统上行链路的性能

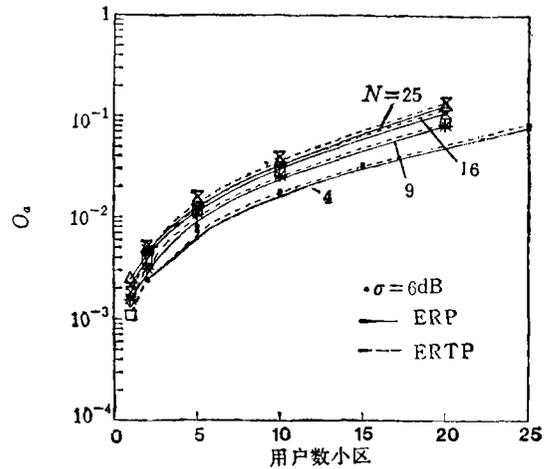


图 3 $\sigma = 6\text{dB}$ 阴影下 CDMA 系统上行链路的性能

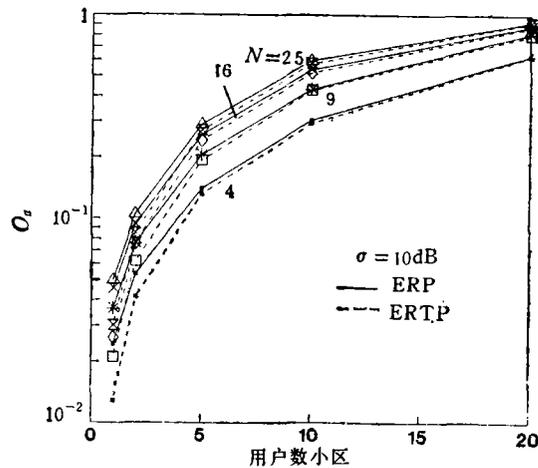


图 4 $\sigma = 10\text{dB}$ 阴影下 CDMA 系统上行链路的性能

阴影较严重时(如 $\sigma = 10\text{dB}$) 则 E RTP 较好; (2) 阴影对系统性能的影响很大; (3) 小区数增多性能变差, 这意味着分析时不能忽略邻区干扰的影响。图 5 和图 6 比较了 $N = 9$ 和 $N = 25$ 时中心小区中断概率和小区平均中断概率的差异。结果表明: 当平均用户数较少时中心小区中断概率 (O_c) 比小区平均中断概率 (O_a) 小, 反之较大。实际上我们还是建议采用小区平均中断概率为好, 因为对每个用户来说, 他关心的是自己进入这个系统不能正常通信的概率, 而由本文模型知, 该用户可随机地位于小区中任何一个位置。所以考察他的中断概率时应对所有小区作平均。 O_c 和 O_a 间的差异只能进一步说明传统评价方法的不准确性。

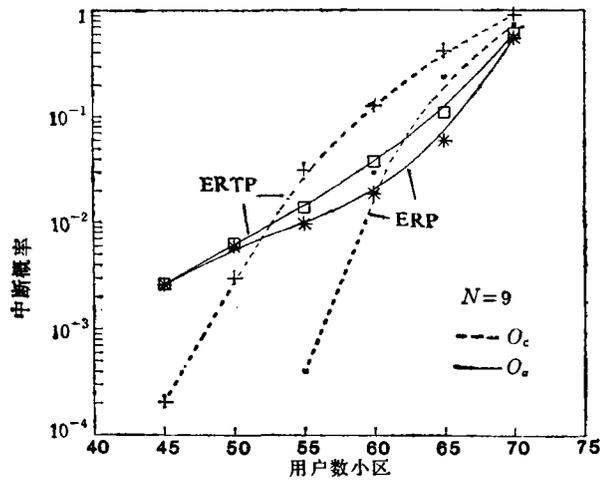


图 5 有 9 个小区的系统的小区平均中断概率与中心小区中断概率的比较

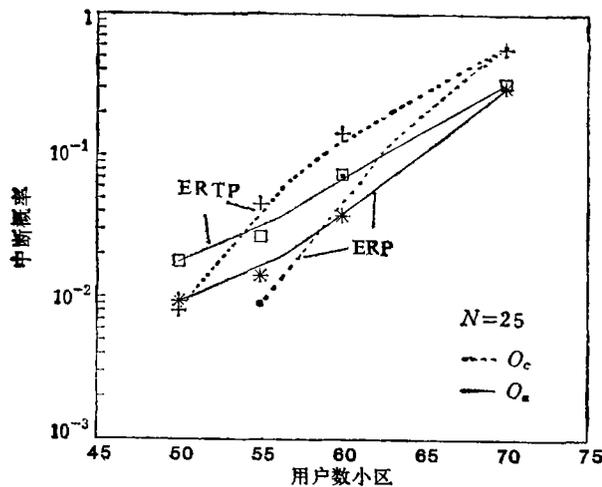


图 6 有 25 个小区的系统的小区平均中断概率与中心小区中断概率的比较

5 结束语

本文采用 ERP 和 E RTP 区内 C/I 平衡技术控制蜂窝 CDMA 系统移动台的发射

功率以抵偿路径损失和对数阴影的影响, 并研究了它们的性能。结果表明: (1) 分析系统性能时绝不能忽视对数阴影的影响, 亦不可忽视小区间的干扰; (2) 无阴影或阴影参数 $\sigma \leq 6\text{dB}$ 时建议采用 ERP, $\sigma > 6\text{dB}$ 时建议采用 E RTP; (3) 若评价整个系统中断概率, 则最好采用小区平均中断概率。

参 考 文 献

- [1] Lee W C Y. IEEE Trans. on VT, 1991, VT-40 (2): 291—302.
- [2] Simpson F, Holzman J. IEEE VTC'91, St. Louis, MO: 362—367.
- [3] Gilhousen K S, *et al.* IEEE Trans. on VT, 1991, VT-40 (2): 303—312.
- [4] Ariyavisitul S, Chang L F. GLOBECOM'91 Phoenix, AZ: 41.7.1—41.7.6.
- [5] Ariyavisitul S. GLOBECOM'92, Orlando, FL: 868—873.
- [6] Milstein L B, *et al.* IEEE J. of SAC, 1992, SAC-10 (4): 680—689.
- [7] Soliman S S, *et al.* GLOBECOM'92, Orlando, FL: 69—73.
- [8] Nettelton R, Alavi H. ICC'80, Seattle, Washington: 24.5.1—24.5.5.
- [9] Alavi H, Nettelton R. GLOBECOM'82, Miami, FL: A3.5.1—A3.5.5.
- [10] Aein J M. COMSAT Tech. Rev., 1973, 3 (2): 277—289.
- [11] Kchao C, Stuber G. MILCOM'91, New York: 1186—1191.
- [12] Stuber G, Kchao C, IEEE J. of SAC, 1992, SAC-10 (6): 669—679.

INTRACELL C/I BALANCING TECHNIQUES FOR UPLINKS OF A MULTI-CELL CELLULAR CDMA SYSTEM

Tan Lijun Li Lemin

*(Institute of Information Systems, University of Electronic Science &
Technology of China, Chengdu 610054)*

Abstract Two intracell C/I balancing techniques are presented for controlling mobiles' transmitter powers on the uplinks of a multi-cell cellular CDMA (Code Division Multiple Access) system in order to compensate the combined effects of shadowing and path loss, with their performance being evaluated in terms of cell-averaged outage probability which is different from the traditional index.

Key words Code division multiple access, Spread spectrum communications, Transmitter power controlling, Mobile communications