

一种新的分布式功率控制算法¹

肖 琨 吴诗其

(电子科技大学信息所 成都 610054)

摘 要: 该文首先提出改进的分布式功率控制 (IDPC) 算法的原型算法, 再进一步以分布式实现该原型算法, 从而最终得到 IDPC 算法。该文还对不同的分布式功率控制算法做了理论分析及仿真比较, 最终得出了 IDPC 算法具有很快的收敛速度和优越的中断性能的结论。

关键词: 功率控制, CDMA, 中断概率

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)01-0035-06

A New Distributed Power Control Algorithm

Xiao Kun Wu Shi-qi

(Comm. and Info. College of UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract This paper first proposes the prototype algorithm of an improved distributed power control (IDPC). In this algorithm, mobile units adjust their transmitter powers according to not only their power levels at last iterative step but also the largest and second smallest eigenvalues of the link gain matrix at current time instant. As for the prototype algorithm, link gains for all mobile units must be measured and large burden may be brought in at base stations. For this reason, the prototype algorithm is developed further in a distributed way and thus lead to IDPC algorithm, in which both the positive receiver noise and constrained transmitter power are also considered. As a result, with IDPC algorithm, the CIR's are balanced quickly and a superior outage performance to other algorithms is reached.

Key words Power control, CDMA, Outage probability

1 引言

功率控制是无线移动通信的一个核心问题, CDMA 小区系统的容量与干扰是密切相关的, 功率控制成为提高系统容量、改善通信质量的有效途径。目前主要有两类功率控制方法, 即集中式功率控制和分布式功率控制。集中式功率控制需要大规模的数据管理, 给基站带来了重负荷, 并且容易引起网络的脆弱; 分布式功率控制在每个小区只使用当前的载干比 (CIR) 测量和当前的传输功率, 要求少得多的信息, 从而简单得多。然而, 由于信息量的限制, 分布式功率控制较集中式功率控制要花费更多的时间来达到 CIR 平衡, 因此研究快速的分布式功率控制算法是功率控制问题的核心问题。

最初的功率控制着眼于保持所接收到的功率在一个恒定的水平^[1,2], 文献 [3] 提出了一种集中式功率控制算法 (CPC), 力求在所有的无线链路上得到相同的 CIR。这种思路引入了迭代机制后得到进一步的发展, 形成了分布式平衡算法 (DBA)^[4,5], 文献 [6] 对 DBA 做了改进, 提出了分布式功率控制 (DPC) 算法; 与 DBA 相比, DPC 的收敛速度要快得多, 而且中断概率要低。中断概率是评价一个功率控制算法性能好坏的最重要的因素之一, 通常定义为在给定

¹ 2002-07-11 收到, 2003-04-09 改回

链路上某一移动台的 CIR 小于系统保护门限的概率。近来,一种完全的 DPC 算法^[7]和一种参数式的功率控制算法^[8]进一步改进和完善了 DPC 算法的研究。

本文的贡献在于:(1)提出了改进的分布式功率控制(IDPC)算法的原型算法,之所以称之为“原型算法”,是因为我们最终要得到的 IDPC 算法是由原型算法分布式实现而得来。原型算法利用了链路增益矩阵的最大特征值和次最小特征值,由于需要测量无线传播增益,该原型算法可归类为 CPC 算法,要求基站进行大规模的数据管理,从而给基站带来了重负荷,并且容易引起网络的脆弱。(2)我们对原型算法进行分布式处理,进一步得到了 IDPC 算法;同时,接收机热噪声在实际系统中是客观存在和不能忽略的,发射机的最大发射功率也是受到限制的,于是,在 IDPC 中我们考虑了接收机热噪声和功率受限的情况。此外,我们还将文献[6-8]中的算法与 IDPC 进行了总结和比较。仿真结果表明, IDPC 有很快的收敛速度,而且应用 IDPC 时的业务中断性能优于其它文献中的算法。

2 链路增益

功率控制和链路增益直接相关,“远近”效应实质上就是不同的链路增益引起的,具有不同链路增益的移动台为了达到相应的载干比或者 QoS 保证,要求发射或接收到的功率也不同。这里不失一般性,只考虑上行链路。定义链路增益 G 为接收功率 P_r 与发射功率 P_t 之比,即

$$P_r = P_t G \quad (1)$$

考虑一个包含 N 个小区的无线小区系统,任一小区 i 中处于通信状态的移动台数为 n_i , $G_i(k,l)$ 为小区 k 中移动台 l 对小区 i 基站的上行链路增益。于是,任一小区 i 中移动台 j 的上行链路载干比为

$$\Gamma_{i,j} = P_{i,j} G_i(i,j) / \left[\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^{n_k} P_{k,l} G_i(k,l) - P_{i,j} G_i(i,j) + \eta_{i,j} \right] \quad (2)$$

其中 $P_{i,j}$ 为上行链路小区 i 中移动台 j 的发射功率, $\eta_{i,j}$ 为基站处的接收机热噪声。对式(2)变形有

$$\Gamma_{i,j} = P_{i,j} / \left[\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^{n_k} P_{k,l} Z_{i,j}(k,l) - P_{i,j} + \varepsilon_{i,j} \right] \quad (3)$$

$$Z_{i,j}(k,l) = G_i(k,l)/G_i(i,j); \quad \varepsilon_{i,j} = \eta_{i,j}/G_i(i,j)$$

其中 $Z_{i,j}(k,l)$ 表示小区 k 中移动台 l 相对于小区 i 中移动台 j 的链路增益因子。为了获得一个要求的服务质量,应该满足 $\Gamma_{i,j} \geq \Gamma^*$, Γ^* 为 CIR 门限。

3 改进的分布式功率控制算法

在文献[6-8]的基础上,我们首先提出 IDPC 算法的原型算法,并对算法的收敛性进行了证明,然后分布式实现原型算法,最终得到 IDPC 算法。

3.1 IDPC 的原型算法

一个有 $M(\geq 3)$ 个移动台的无线小区系统,其任一小区 i 中移动台 j 的功率更新函数表示

为

$$P_{i,j}^{(v)} = \begin{cases} c^{(v-1)} P_{i,j}^{(v-1)} [1 - \alpha + (1/\Gamma_{i,j}^{(v-1)})], & \text{Im}(\alpha) = 0 \\ c^{(v-1)} P_{i,j}^{(v-1)} [1 - |\alpha| + (1/\Gamma_{i,j}^{(v-1)})], & \text{Im}(\alpha) \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\alpha = \begin{cases} (\lambda_1 + \lambda_{M-1})/2, & |\lambda_1 + \lambda_{M-1}|/2 \leq 1 \\ 1, & \text{其它} \end{cases}$$

$$c^{(v-1)} = \min\{\Gamma_{i,j}^{(v-1)}, \Gamma^*\}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, n_i$$

其中 $|\lambda_i|$ 为按照从大到小排列后的链路增益矩阵 \mathbf{Z} 的特征值的绝对值 (对于复特征值, 则为其模), 即 $|\lambda_1| \geq |\lambda_2| \geq \dots \geq |\lambda_M|$; 链路增益矩阵 \mathbf{Z} 由式 (3) 中的链路增益因子构成; $\text{Im}(\cdot)$ 代表一个复数的虚部, v 为迭代的步数。

证明 当 $\text{Im}(\alpha) = 0$ 且不考虑接收机热噪声的影响时, 由式 (4) 得到:

$$\begin{aligned} P_{i,j}^{(v)} &= c^{(v-1)} P_{i,j}^{(v-1)} [1 - \alpha + (1/\Gamma_{i,j}^{(v-1)})] \\ &= c^{(v-1)} P_{i,j}^{(v-1)} \left\{ 1 - \alpha + \left[\left(\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^{n_k} Z_{i,j}(k,l) P_{k,l}^{(v-1)} - P_{i,j}^{(v-1)} \right) / P_{i,j}^{(v-1)} \right] \right\} \\ &= c^{(v-1)} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^{n_k} Z_{i,j}(k,l) P_{k,l}^{(v-1)} - \alpha c^{(v-1)} P_{i,j}^{(v-1)} \end{aligned}$$

以向量形式表示为

$$\mathbf{P}^{(v)} = c^{(v-1)} (\mathbf{Z} - \alpha \mathbf{I}) \mathbf{P}^{(v-1)} = c^{(v-1)} \mathbf{H} \mathbf{P}^{(v-1)} \quad (5)$$

类似地, 当 $\text{Im}(\alpha) \neq 0$ 时, 有

$$\mathbf{P}^{(v)} = c^{(v-1)} (\mathbf{Z} - |\alpha| \mathbf{I}) \mathbf{P}^{(v-1)} = c^{(v-1)} \mathbf{H} \mathbf{P}^{(v-1)} \quad (6)$$

于是

$$\mathbf{H} = \begin{cases} \mathbf{Z} - \alpha \mathbf{I}, & \text{Im}(\alpha) = 0 \\ \mathbf{Z} - |\alpha| \mathbf{I}, & \text{Im}(\alpha) \neq 0 \end{cases}$$

其中 $\mathbf{P}^{(v)}$ 为功率向量, \mathbf{I} 为单位矩阵, \mathbf{H} 是不回归的非负矩阵^[9]。由于所有的链路增益因子都是正实数, 根据 Perron-Frobenius 定理^[9], 式 (4) 将以概率 1 达到 CIR 平衡, 其证明类似于文献 [4, 6] 中的证明, 此处省略。

注意到当所有的特征值都为实数而且满足 $\lambda_1 + \lambda_{M-1} \leq 2$ 时, 选择的 α 满足以下两个表达式:

$$(1) |\lambda_1 - \alpha| < |\lambda_M - \alpha|, \quad (2) \alpha = \text{minimize} \left\{ \max \left\{ \frac{|\lambda_1 - \alpha|}{|\lambda_M - \alpha|}, \frac{|\lambda_{M-1} - \alpha|}{|\lambda_M - \alpha|} \right\} \right\};$$

这样, 式 (4) 具有最快的收敛速度。但是, 我们注意到当 $\alpha > 1$ 时, 由 (4) 式可知 $P_{i,j}^{(v)}$ 在迭代过程中可能小于零, 这是不允许的, 这种情形下我们令 $\alpha = 1$ 。

原型算法需要对所有的无线链路进行测量, 来获得传播增益矩阵, 从而求得特征值。这会给基站带来很大的负担, 大量的数据管理是不能不令人头疼的, 而且容易带来网络的脆弱, 这是致命的。因此, 我们必须再进一步将原型算法分布式实现。

3.2 IDPC 算法

在实际系统中, 每两次成功的功率控制过程之间的时间间隔是很小的, 我们可以认为链路增益矩阵在此期间没有发生变化, 因此当前时刻的特征值可以用上一次成功的功率控制时刻的特征值来取代。这里成功的功率控制过程是指在功率控制的作用下, 每一个移动台的 CIR 都高于 CIR 门限值。由于次最小特征值 (或其模) 总是远小于最大特征值, 这里忽略次最小特征值的影响, 参考文献 [4, 6], $1/\min_{i,j} \Gamma_{i,j}^{(v-1)}$ 将收敛到 $1/\gamma^*$, 其中 $\gamma^* = 1/(\lambda_{\max} - 1)$ 。此外, 接收机热噪声是客观存在和不能忽略的, 我们假设对于所有的移动台, $\eta_{i,j} = \eta$; 而且移动台的最大发射功率也应该受到限制。综合以上因素, IDPC 的功率更新函数可以进一步描述为

$$P_{i,j}^{(l,v)} = \{c^{(l,v-1)} P_{i,j}^{(l,v-1)} [1 - \beta + (1/\Gamma_{i,j}^{(l,v-1)})], P_{\max}\} \quad (7)$$

$$\beta = \begin{cases} (1 + 1/\min_{i,j} \Gamma_{i,j}^{(l-1)})/2, & \min_{i,j} \Gamma_{i,j}^{(l-1)} \geq 1 \\ 1, & \text{其它} \end{cases}$$

$$c^{(l,v-1)} = \min\{\Gamma_{i,j}^{(l,v-1)}, \Gamma^*\}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, n_i$$

其中 $P_{i,j}^{(l,v)}$ 是小区 i 中第 j 个移动台在第 l 次成功的功率控制过程中的第 v 次迭代时的发射功率, $\Gamma_{i,j}^{(l-1)}$ 是小区 i 中第 j 个移动台在第 $l-1$ 次成功的功率控制过程中取得的 CIR 值, P_{\max} 是最大允许的移动台发射功率。

4 分布式功率控制算法的比较分析

4.1 分布式功率控制 (DPC) 算法 [6]

DPC 的功率更新函数为 $P_{i,j}^{(v)} = c^{(v-1)} P_{i,j}^{(v-1)} / \Gamma_{i,j}^{(v-1)}$, 其中 $c^{(v-1)} = 1/\max_{i,j} P_{i,j}^{(v-1)}$ 。DPC 需要中央搜集处理来协助功率控制, $P_{i,j}^{(v-1)}$ 的搜集是直接和简单的。

4.2 完全的分布式功率控制 (FDPC) 算法 [7]

FDPC 改进了 DPC 的性能, 其功率更新函数为 $P^0 = 1$ 和 $P_{i,j}^{(v)} = c^{(v-1)} P_{i,j}^{(v-1)} / \Gamma_{i,j}^{(v-1)}$, 其中 $c^{(v-1)} = \min(\Gamma_{i,j}^{(v-1)}, \gamma)$ 。当 $\gamma = \Gamma^*$ 时, FDPC 取得最好的性能。FDPC 不需要中央搜集处理来协助功率控制, 而且当 $c^{(v-1)} = 1/\max_{i,j} P_{i,j}^{(v-1)}$, FDPC 蜕化为 DPC。

4.3 参数式功率控制 (PPC) 算法 [8]

PPC 的功率更新函数为 $P_{i,j}^{(v)} = c^{(v-1)} (\beta / \min_{i,j} \Gamma_{i,j}^{(v-1)} + 1/\Gamma_{i,j}^{(v-1)}) P_{i,j}^{(v-1)}$, 其中 $c^{(v-1)} = \tau^{(v-1)} / (1 + \beta)$, $\tau^{(v-1)}$ 通常设置为 CIR 门限 Γ^* 。PPC 需要中央搜集处理来协助功率控制过程, 但是 $\Gamma_{i,j}^{(v-1)}$ 的搜集和 $\min_{i,j} \Gamma_{i,j}^{(v-1)}$ 的计算是非常直接的和简单的。参数 β 值的选取应该适当。当 $c^{(v-1)} = 1/\max_{i,j} P_{i,j}^{(v-1)}$ 且 $\beta = 0$ 时, PPC 蜕化为 DPC。

4.4 改进的分布式功率控制 (IDPC) 算法

IDPC 的收敛速度不仅取决于 H 的次最大特征值和最大特征值的比值, 而且取决于最小特征值和最大特征值的比值。然而, DPC 中的 $\alpha = 1$ 对于更快速收敛来说太大。在 IDPC 中, (7) 式的 $\beta = (1 + 1/\min_{i,j} \Gamma_{i,j}^{(l-1)})/2$ 有助于加速算法的收敛。

IDPC 虽然需要中央搜集处理来协助功率控制, 但是 $\Gamma_{i,j}^{(l-1)}$ 的搜集和 $\min_{i,j} \Gamma_{i,j}^{(l-1)}$ 的计算是一件轻松的事情, 而且由于在 IDPC 中只需每个成功的功率控制过程执行一次中央收集处理而不是每一次迭代执行一次, 因此工作量较 DPC 和 PPC 小得多。当 $\beta = 1$ 时, IDPC 蜕化为

FDPC, 因此 FDPC 可以看作 IDPC 的特例; 还有, 如果进一步令 $c^{(l,e-1)} = 1/\max_{i,j} P_{i,j}^{(l,e-1)}$, DPC 也可以认为是 IDPC 的特例。

5 仿真分析

仿真中, 呼叫业务按照泊松过程到达, 服务时间服从均值为 3.0min 的负指数分布, 传播增益 $G = d^{-4}10^{\zeta/10}$, 其中 d 为移动台和基站之间的距离, ζ 服从对数正态分布, 均值为 0dB, 均方差为 8dB。仿真在均匀业务模型下进行, 接收机热噪声分别为 $10^{-14}, 10^{-12}, 10^{-10}W$ 。呼叫移去算法在必要时逐步移去 CIR 最小的呼叫业务直到每一个呼叫业务的 CIR 值都大于门限值为止, 最大移动台发射功率为 1W。

图 1 反映了统计的最小 CIR 均值与迭代步数之间的关系。IDPC, FDPC, PPC(1.0) 和 PPC(0.1) 的曲线表明: 虽然在 FDMA 系统中 PPC 表现了很快的收敛性能, 但是在 CDMA 系统中, 结论不是同样成立; 与 IDPC 和 FDPC 比较, PPC 的曲线远低于 IDPC 和 FDPC; 同时, IDPC 的收敛性能优于 FDPC, 在经历了三次迭代后, 曲线进入了一个相对平滑的部分。

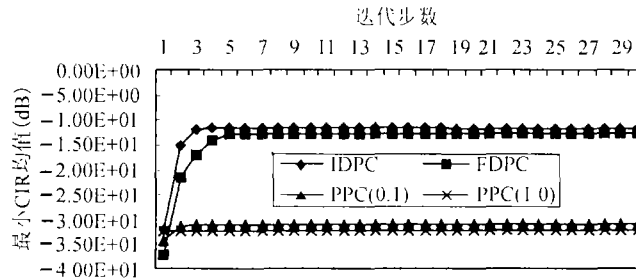


图 1 最小 CIR 均值与迭代步数关系图

图 2 表示在不同的接收机热噪声下, 系统的中断概率和小区容量的关系图。可以看出, 小区容量越大, 中断概率越高, 表明当移动台数量越多时, 功率控制达到 CIR 平衡的难度越大, 导致越来越坏的中断性能。与 FDPC 相比, IDPC 有更好的中断性能。

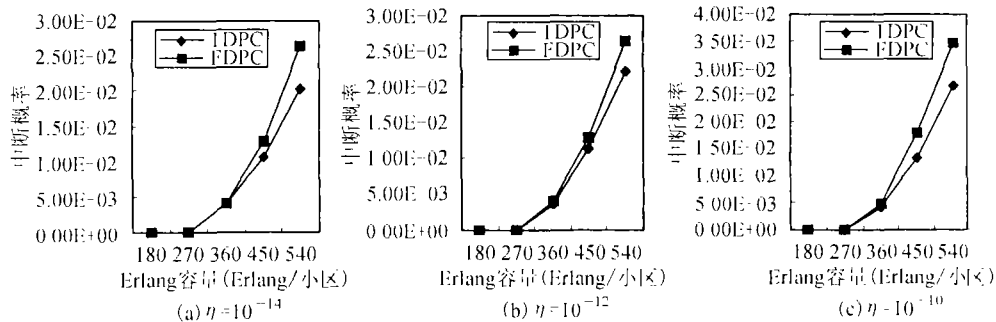


图 2 中断概率与小区爱尔兰容量关系图

图 3 表示在不同的接收机热噪声下, 系统的中断概率和 CIR 门限的关系图。可以看出, CIR 门限越高, 中断概率越高, 表明当要求一个更高的服务质量时, 功率控制达到 CIR 平衡的难度越大, 导致越来越多的呼叫中断。同样, 与 FDPC 相比, IDPC 有更好的中断性能。

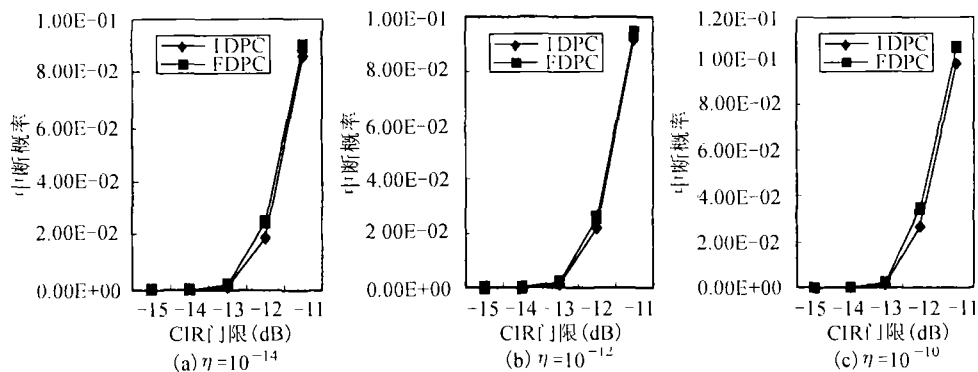


图 3 中断概率与 CIR 门限关系图

6 结论

本文首先提出了 IDPC 的原型算法。原型算法中, 我们需要测量无线传播增益, 基站会承受较大的负担, 带来了大规模的数据管理。于是, 我们进一步发展了原型算法, 用分布式方法实现了它, 最终得到了 IDPC 算法。与其它算法比较, IDPC 算法不需要大规模的数据管理, 也不容易引起网络的脆弱; 更重要的是, 它能很快地达到 CIR 平衡并具有更优的中断性能。

参 考 文 献

- [1] Tschirks W. Effects of transmission power control on the cochannel interference in cellular radio networks. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 1989, 106(5): 194-196.
- [2] Fujii T, Sakamoto M. Reduction of cochannel interference in cellular systems by intra-zone channel reassignment and adaptive transmitter power control. Proc. IEEE Veh. Tech. Conf., Philadelphia, USA, 1988, VTC-88: 668-672.
- [3] Jens Zander. Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems. *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, 1992, 41(1): 57-62.
- [4] Jens Zander. Distributed cochannel interference control in cellular radio systems. *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, 1992, 41(3): 305-311.
- [5] Nettleton R W, Alavi H. Power control for spread spectrum cellular radio systems. in Proc. IEEE Veh. Tech. Conf. Toronto, Canada, 1983, VTC-83: 242-246.
- [6] Grandhi S A, Vijayan R, Goodman D J. Distributed power control in cellular radio systems. *IEEE Trans. on Commun.*, 1994, COM-42(2/3/4): 226-228.
- [7] Tsern-Huei Lee, Jen-Cheng Lin. A fully distributed power control algorithm for cellular mobile systems. *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 1996, 14(4): 692-697.
- [8] Chae Y. Lee, Taehoon Park. A parametric power control with fast convergence in cellular radio system. *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, 1998, 47(2): 440-449.
- [9] Gantmacher F R. *The Theory of Matrices*, New York: Chelsea, 1974, vol.2, ch. VIII.

肖 琨: 男, 1974 年生, 博士生, 主要从事地面移动通信系统、卫星移动通信系统无线传播环境等领域的研究, 发表论文十余篇, 其中 EI 收录两篇。

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, 6 次获部、省级科技进步奖。