

多输入多输出天线蜂窝系统中的分布式功率控制方法

赵 昆 邱 玲 朱近康

(中国科学技术大学个人通信与扩频实验室 合肥 230027)

摘 要: 在蜂窝无线通信系统设计中, 基于信号干扰比(SIR)测量的功率控制方法得到广泛的应用。该文提出多输入多输出(MIMO)天线蜂窝系统中的基于 SIR 测量的分布式功率控制(DPC)方法。该方法通过控制移动台或者基站的发射功率可以达到以下两个目标的其中之一: (1)最小化所有基站或者移动台的平均接收 SIR 中断概率; (2)在满足目标 SIR 要求的前提下最小化平均发射功率。数值仿真结果显示, 该文提出的 DPC 方法在低的计算复杂度下, 可以达到降低 SIR 中断概率和减小发射功率的目的。

关键词: 多输入多输出, 信号干扰比, 分布式功率控制, 中断概率, 发射功率

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)11-1681-05

Distributed Power Control in MIMO Cellular Systems

Zhao Kun Qiu Ling Zhu Jin-kang

(PCN&SS, Univ. of Sci. and Tech. of China, Hefei 230027, China)

Abstract In the design of cellular radio systems, power control methods based on signal-to-interference ratio (SIR) measurement have been used widely. This paper proposes distributed power control (DPC) methods based on SIR measurement in Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) antenna cellular systems. The methods control the transmitter power of mobile stations or base stations with one of the following two objectives: (1) to minimize the averaged SIR outage probability over all base stations or mobile stations and (2) to minimize the averaged transmitter power while satisfying the specified SIR requirements for all links. Numerical study shows that the DPC methods proposed in this paper can effectively lower SIR outage probability and transmitter power at low computation complexity.

Key words MIMO, SIR, Distributed power control, Outage probability, Transmitter power

1 引言

在过去的十几年中, 单天线蜂窝系统中的功率控制方法被广泛的研究, 用于抑制由信道复用导致的同信道干扰(CCI)。文献[1,2]讨论了基于信号干扰比(SIR)测量的集中式功率控制(CPC)方法, 将优化的发射功率的计算归纳为对信道增益矩阵的特征值求解, 并且达到在所有接收端最大化最小 SIR 的目的。在文献[3,4]中提出并研究了基于 SIR 测量的分布式功率控制(DPC)方法, DPC 方法极大简化了 CPC 方法的计算量。文献[5]总结并且比较了基于 SIR 测量的多种集中式和分布式的功率控制方法, CPC 方法可以得到发射功率的最优解, 但是需要知道系统中所有通信链路的信道增益, 不能实际应用, 一般用于在功率控制的方法分析中得到性能上

限值; DPC 方法仅需要测量目标信号功率和本地 SIR 值, 并且能够收敛于发射功率最优解, 易于实际应用。

多输入多输出(MIMO)天线技术由于能够显著提高系统容量^[6]和无线传输链路质量^[7], 在移动通信领域受到广泛的关注, 成为下一代移动通信系统的关键技术之一。然而, MIMO 系统由于多天线的共信道发送, 是个自干扰严重的系统, 尤其在从单链路扩展到多用户以及多小区后, 迫切需要研究抑制 CCI 的方法^[8]。文献[9]提出了 MIMO-PI 功率控制的思想, 该文中将多个发送和接收用户之间的信道建模为多入多出的信道, 适用于单天线的系统, 并不能直接扩展到多天线系统中。

针对 MIMO 蜂窝系统中的 CCI 问题, 并且考虑到方法

2004-06-07 收到, 2004-09-17 改回

国家自然科学基金(60390540)和国家“863”重大项目(2003AA123310)

资助课题

的可实现性,本文提出了 MIMO 蜂窝系统中的基于 SIR 测量的 DPC 方法。本文的 DPC 方法通过控制移动台或者基站的发射功率达到以下的两个目标之一: (1)最小化所有基站或者移动台的平均接收 SIR 中断概率; (2)在满足目标 SIR 要求的前提下最小化平均发射功率。

本文第 2 节给出了 MIMO 蜂窝系统模型以及 SIR 表达式; 第 3 节给出 DPC 算法, 以及算法实现的通用结构; 第 4 节给出数值仿真结果和性能分析; 最后给出全文结束语以及进一步的工作。

2 系统模型

本节中,我们给出 MIMO 蜂窝系统下行链路模型的详细描述,其中符号用大写字母表示。我们考虑的是一个由 Q 个小区组成的蜂窝系统,每个小区中心配置一个基站。在每个时刻,每个小区都有且只有一个处于激活状态的移动台与基站通信,移动台的位置在小区内满足均匀分布。基站的天线数目用 N_B 表示,移动台的用 N_M 表示。进一步地,我们用 B_j 表示小区 j ($j=1,2,\dots,Q$) 的基站,用 M_i 表示小区 i ($i=1,2,\dots,Q$) 的移动台。 L_{ij} 表示 B_j 到 M_i 的下行信道增益矩阵,大小是 $N_M \times N_B$ 的。我们用 $P_{n,j}$ 表示 B_j 的第 n 根天线的下行发射功率, P_{Tj} 表示 B_j 的下行发射总功率,其中 $P_{Tj} = \sum_{n=1}^{N_B} P_{n,j}$ 。在本文的分析中,移动台受到的干扰只考虑多用户的同信道干扰和接收端的噪声,不考虑邻信道干扰^[4]。

M_i 的基带接收信号可以表示为

$$R_i = L_{ii}X_i + \sum_{j=1, j \neq i}^Q (L_{ij}X_j) + \eta_i \quad (1)$$

其中 X_j 是 $N_B \times 1$ 的向量,表示 B_j 发射的基带信号。接收基带信号 R_i 是 $N_M \times 1$ 的向量。 η_i 是 $N_M \times 1$ 的向量,元素为均值 0, 方差 V_i 的复高斯白噪声信号。下行信道增益在一个无线帧内保持不变,帧与帧之间可变,文中的帧长定义为若干个符号时间。

将矩阵 L_{ij} 用列向量的形式表示,有 $L_{ij} = (L_{1,ij}, L_{2,ij}, \dots, L_{N_M,ij})$, 其中列向量 $L_{n,ij}$ 表示 B_j 的第 n 根天线到 M_i 的下行信道增益向量。将 M_i 测量的接收 SIR 表示为 Γ_i , 可以得到

$$\Gamma_i = \frac{\sum_{n=1}^{N_B} (P_{n,i} \|L_{n,ii}\|^2)}{\sum_{j=1, j \neq i}^Q \left[\sum_{n=1}^{N_B} (P_{n,j}) \|L_{n,ij}\|^2 \right] + V_i} \quad (2)$$

其中 $\|\cdot\|^2$ 表示向量的范数。在本文的分析中,我们将多用户的同信道干扰假设为在信号带宽内是平坦的,与白噪声的频谱特性相同^[8],文中用 SIR 既表示信号干扰比,也表示信号

干扰噪声比。

我们用 $W_{n,j}$ 表示 B_j 的第 n 根天线的功率加权,该天线的发射功率表示为

$$P_{n,j} = P_{Tj} W_{n,j} \quad (3)$$

在单用户的 MIMO 系统中,天线功率分配可以提高系统容量^[6]或者降低 BER^[10]。然而,在存在多用户同信道干扰的情况下,联合优化天线功率和用户功率,对系统性能的影响目前还不十分清楚,并且功率资源的联合优化必然是个迭代的过程,而该迭代如何收敛尚没有理论上的证明^[11]。本文的分析中,先简单固定天线功率加权,只进行用户功率控制,在进一步的研究中将讨论联合优化用户功率和天线功率的问题。

将式(3)代入式(2),可以得到简化的 SIR 表达式为

$$\Gamma_i = \frac{P_{Tj} \sum_{n=1}^{N_B} (W_{n,i} \|L_{n,ii}\|^2)}{\sum_{j=1, j \neq i}^Q \left[P_{Tj} \sum_{n=1}^{N_B} (W_{n,j} \|L_{n,ij}\|^2) \right] + V_i} = \frac{P_{Tj} Z_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^Q (P_{Tj} Z_{ij}) + V_i} \quad (4)$$

其中对 $j=1,2,\dots,Q$, 有

$$Z_{ij} = \sum_{n=1}^{N_B} (W_{n,j} \|L_{n,ij}\|^2) \quad (5)$$

不难发现,式(4)中的 SIR 表达式与单天线系统的 SIR 表达式形式上是一致的。

3 MIMO 蜂窝系统的分布式功率控制

基于文献[12], 本节提出了 MIMO 蜂窝系统中的两个 DPC 算法,适用于上下行链路,并给出实现算法的通用结构。第 1 个 DPC 算法以最小化所有接收端的平均 SIR 中断概率为目标,该算法适用于干扰受限的系统,忽略噪声的影响。第 2 个 DPC 算法是在满足目标 SIR 要求的前提下最小化平均发射功率,该算法加入对噪声的考虑,更加接近实际通信的情景。这两种分布式算法收敛性的证明可以参见文献[3,4]。

3.1 下行链路

按照前面提出的两个目标,给出下行链路的 DPC 算法。假设信道状态信息(CSI)在接收端已知。

算法 1

(1) 忽略噪声项,计算最大化的最小 SIR,用 γ_{\max} 表示,有

$$\gamma_{\max} = \frac{1}{\rho(\mathbf{E})} \quad (6)$$

其中矩阵 \mathbf{E} 的定义是

$$[\mathbf{E}]_{ij} = \begin{cases} Z_{ij}/Z_{ii}, & j \neq i \\ 0, & j = i \end{cases} \quad (7)$$

$\rho(\mathbf{E})$ 表示矩阵 \mathbf{E} 的谱半径。移动台 M_i 的目标 SIR 值用 Γ_{0i} 表示,设为 γ_{\max} 。

(2) B_i 的初始发射功率设为任意正数 $P_{Ti}(0)$ ，得到 M_i 的初始 SIR 表达式为

$$\Gamma_i(0) = \frac{P_{Ti}(0)Z_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^Q [P_{Tj}(0)Z_{ij}]} \quad (8)$$

(3) 按照下面的公式更新 B_i 的发射功率

$$P_{Ti}(n+1) = P_{Ti}(n) \frac{\Gamma_{oi}}{\Gamma_i(n)} \quad (9)$$

(4) 设置 $n=n+1$ 。返回(3)重复迭代至结束。

算法 2

(1) 根据服务质量(QoS)要求，设移动台 M_i 的目标 SIR 值为 Γ_{oi} 。每个移动台可以根据 QoS 要求设置不同的目标 SIR 值。考虑噪声影响。

(2) B_i 的初始发射功率设为任意正数 $P_{Ti}(0)$ ，得到 M_i 的初始 SIR 表达式为

$$\Gamma_i(0) = \frac{P_{Ti}(0)Z_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^Q [P_{Tj}(0)Z_{ij}] + V_i} \quad (10)$$

(3) 按照式(9)更新 B_i 的发射功率。

(4) 设置 $n=n+1$ 。返回(3)重复迭代至结束。

以上两个算法的实现框图如图 1 所示，说明如下：

(1) 在功率控制周期 T_p ¹⁾内，移动台 M_i 测量时刻 n 的接收功率值 $P_{Ti}(n)$ 和接收 SIR 值 $\Gamma_i(n)$ 。

(2) 在移动台端设置 Γ_{oi} 。根据式(9)计算 $P_{Ti}(n+1)$ ，并将其反馈给基站 B_i ， B_i 将其作为第 $n+1$ 时刻的发射功率。

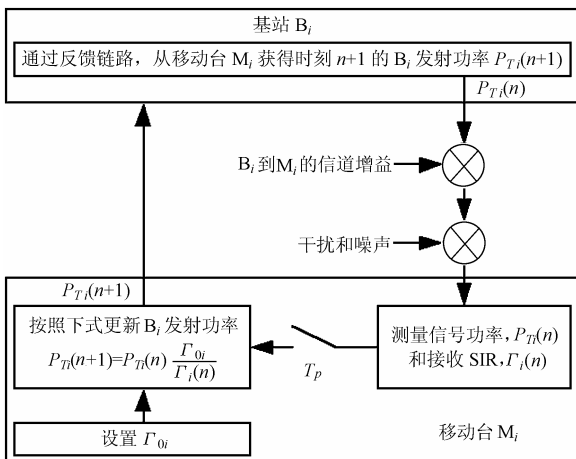


图 1 下行 DPC 实现框图

¹⁾ T_p 是定义为若干个符号时间，根据信道变化快慢来确定。时刻 n 和 $n+1$ 之间的间隔大于算法进行 1 次迭代所需要的时间，并且所有迭代在 T_p 内完成。

(3) 重复(1)，(2)的操作至满足迭代结束。

3.2 上行链路

由于上下行 DPC 方法非常类似，我们仅给出上行链路的简要描述。

基站 B_i 的接收 SIR，定义为 τ_i ，可以表示为

$$\tau_i = \frac{p_{Ti} \sum_{n=1}^{N_M} (w_{n,i} \|I_{n,ii}\|^2)}{\sum_{j=1, j \neq i}^Q [p_{Tj} \sum_{n=1}^{N_M} (w_{n,j} \|I_{n,ij}\|^2)] + v_i} = \frac{p_{Ti} z_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^Q (p_{Tj} z_{ij}) + v_i} \quad (11)$$

其中 p_{Tj} 是 M_j ($j=1,2,\dots,Q$) 的总发射功率， $w_{n,j}$ 表示 M_j 的第 n 根天线的功率加权， $I_{n,ij}$ 表示 M_j 的第 n 根天线和 B_i 之间的上行信道增益向量， v_i 表示 B_i 的接收端噪声方差。 z_{ij} 定义为

$$z_{ij} = \sum_{n=1}^{N_M} (w_{n,j} \|I_{n,ij}\|^2) \quad (12)$$

将 3.1 节中对应部分的描述符号用小写替换，就可以得到上行链路的两个 DPC 算法，此处我们不重复罗列。图 2 给出上行 DPC 算法的实现框图，其执行步骤与下行类似，不同之处仅是基站和移动台角色的变换。

需要说明的是，在实现 DPC 算法的时候，从接收端反馈用户功率到发送端。通过对反馈功率的适当量化可以在反馈数据量与算法性能间找到折衷，这需要在实际系统中进一步的研究。

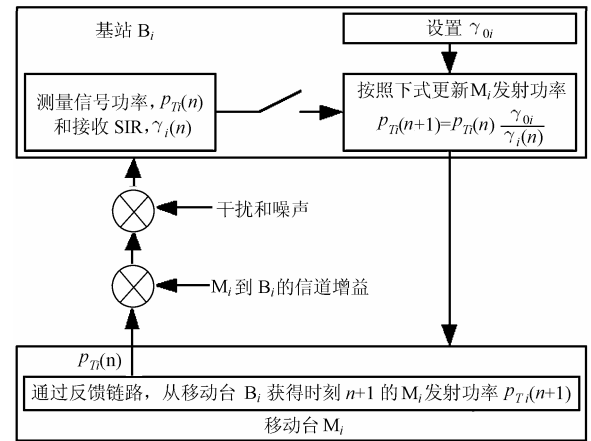


图 2 上行 DPC 实现框图

4 数值仿真结果

我们选取下行 MIMO 蜂窝系统，蜂窝采用 3 小区复用结构，共有 19 个同信道小区。本文的 DPC 方法适用于任意的天线组合，仿真中取 $N_B = 4$ 和 $N_M = 4$ 。

信道假设为平坦的，不考虑多径，下行信道增益矩阵 L_{ij} 表示为

$$L_{ij} = \sqrt{D_{ij}^{-\alpha} 10^{\left(\frac{1}{10} A_{ij}\right)}} H_{ij} \quad (13)$$

其中 D_{ij} 表示 B_j 和 M_i 间的距离, α 表示路径损耗因子, 仿真中设为 4, A_{ij} 表示阴影衰落因子, 为均值 0, 方差 8 dB 的高斯变量。 H_{ij} 由均值 0, 方差 1 的复高斯变量构成。接收噪声是均值 0, 方差 V 的复高斯变量。在仿真过程中, 我们假设所有距离对小区半径归一化, 所有发射端初始功率归一化为 1, SIR 为信号功率与干扰加噪声功率的比值, 所有接收端噪声方差相同并对发射功率归一化。接收端通过理想信道估计, 对 CSI 完全已知, 发射端仅有 P_{Tj} ($j=1,2,\dots,Q$) 反馈信息。由于发射端没有获得各个天线功率的反馈, 仅有总功率的反馈, 发射端采取均分天线功率的策略。

信道衰落的慢快取决于无线帧的长短, 由于假理想信道估计, 仿真结果适用各种帧长。功控周期 T_p 取为一帧时间, 实验结果发现经过 15 次到 20 次迭代 DPC 基本收敛, 仿真时在 T_p 内作 15 次 DPC 迭代。仿真中使用的 SIR 中断概率的定义是, 接收 SIR 小于目标 SIR 的概率, 表达式为 $P_r(\Gamma_i \leq \Gamma_{oi})$, 每个的接收端的目标 SIR 设置为相同。

图 3 给出不同功率分配方法下, 平均 SIR 中断概率的变化曲线的比较。横坐标是目标 SIR 值, 纵坐标是平均 SIR 中断概率, 定义为 $(1/Q) \sum_{i=1}^Q [P_r(\Gamma_i \leq \Gamma_{oi})]$ 。图中曲线分别对应固定功率(没有功率控制)的蜂窝系统, 应用 DPC 方法的蜂窝系统和应用 CPC 方法的蜂窝系统, 其中 DPC 曲线按照 3.1 节中算法 1 计算得到。图 3 中, DPC 曲线的 SIR 中断性能明显优于固定功率曲线, 略差于 CPC 曲线, 但是计算复杂度相对 CPC 降低了很多, 均与理论分析的结论一致。

图 4 给出在不同的噪声方差下, 目标 SIR 为 20 的条件下, 归一化的基站平均发射功率随 DPC 迭代次数的变化曲线。横坐标是 DPC 算法的迭代次数, 纵坐标是归一化的基站平均发射功率, 定义为 $(1/Q) \sum_{i=1}^Q P_{Ti}$ 。图 4 中 DPC 曲线按照 3.1 节中算法 2 计算得到, 发射端初始功率归一化为 1。由于应用 CPC 方法需要忽略噪声的影响, 不能得到发射功率的绝对值, 因而未在图中画出 CPC 相应的功率曲线。图 4 中的仿真结果显示, 归一化的基站平均发射功率随 DPC 算法的迭代次数增加而降低, 并且, 由于算法 2 的 SIR 表达式中加入对噪声的考虑, 随着噪声方差 V 的增大, 在相同的目标 SIR 要求下, 所需要的归一化发射功率增大, 均与理论分析的结论一致。

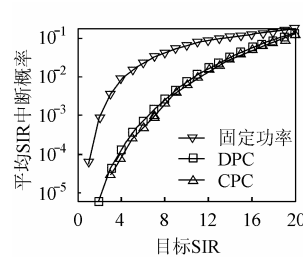


图 3 不同功率分配方法的平均 SIR 中断概率比较, DPC 算法迭代 15 次

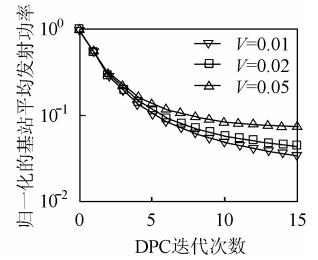


图 4 归一化的基站平均发射功率随 DPC 迭代次数的变化曲线, 目标 SIR 设为 20

5 结束语

本文固定天线间的功率分配, 得到简化的 SIR 表达式, 基于该 SIR 表达式, 分别针对下行链路和上行链路, 提出了两种 DPC 算法, 并且给出了两种算法的通用实现结构。算法 1 以最小化平均 SIR 中断概率为目标, 算法 2 在满足目标 SIR 要求下, 以最小化平均发射功率为目标。数值结果表明, 采用本文提出的基于简化的 SIR 的两种 DPC 方法, 能够降低平均 SIR 中断概率和平均发射功率。

我们还将进一步研究, 在用户功率反馈的基础上增加对天线间功率分配信息的反馈, 进一步提高系统性能; 通过减少同信道干扰源, 进一步降低 SIR 中断概率以及发射功率。

参考文献

- [1] Zander J, Fredigh M. Comment on Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems. *IEEE Trans. on VT*, 1994, 43(3): 636 – 636.
- [2] Grandhi S A, Vijayan R, Goodman D J, Zander J. Centralized power control in cellular radio systems. *IEEE Trans. on VT*, 1993, 42(4): 466 – 468.
- [3] Zander J. Distributed cochannel interference control in cellular radio systems. *IEEE Trans. on VT*, 1992, 41(3): 305 – 311.
- [4] Foschini G J, Miljanic Z. A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence. *IEEE Trans. on VT*, 1993, 42(4): 641 – 646.
- [5] Lee T H, Lin J C, Su Y T. Downlink power control algorithms for cellular radio systems. *IEEE Trans. on VT*, 1995, 44(1): 89 – 94.
- [6] Telatar E. Capacity of multiantenna Gaussian channels. AT&T Bell Labs, Tech. Memo., 1995: 915 – 919.
- [7] Tarokh V, Seshadri N, Calderbank A R. Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1998,

- 44(2): 744 – 765.
- [8] Catreux S, Driessen P F, Greenstain L J. Simulation results for an interference-limited multiple-input multiple-output cellular system. *IEEE Communications Letters*, 2000, 4(11): 334 – 336.
- [9] Hasu V, Koivo H N. A block MIMO PI-Power control algorithm for cellular systems. VTC 2001 fall, Atlantic, NY USA, 2001: 1927 – 1931.
- [10] Zhuang H, Dai L, Zhou S, Yao Y. Low complexity per-antenna rate and power control approach for closed-loop V-BLAST. *IEEE Trans. on Commun.*, 2003, 51(11): 1783 – 1787.
- [11] Demirkol M F, Ingram M A. Power-controlled capacity for interfering MIMO links. IEEE Vehicular Technology Conf. VTC 2001 Fall, Atlantic, NY, USA, 2001, 1: 187 – 191.
- [12] Farrokhi F R, Liu K J R, Tassiulas L. Transmit and receive diversity and equalization in wireless networks with fading channels. IEEE Global Telecommunications Conference, Phoenix, Arizona, USA, 1997, 3: 1193 – 1198.
- 赵 昆: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为无线通信及其信号处理、MIMO中的信号处理.
- 邱 玲: 女, 1963年生, 副教授, 研究方向为无线通信、移动通信中的信号处理、扩频通信、MIMO中的信号处理等.
- 朱近康: 男, 1943年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信及个人通信、扩频通信、通信中的信号处理等.