

# 采用串行干扰消除的 CDMA 蜂窝系统中的 跨层资源管理\*

周朝荣<sup>1</sup>, 张翼德<sup>2a</sup>, 冯 钢<sup>2a</sup>, 李乐民<sup>2b</sup>

(1. 四川师范大学 物理与电子工程学院, 成都 610101; 2. 电子科技大学 a. 通信抗干扰技术国家级重点实验室;  
b. 通信与信息工程学院, 成都 610054)

**摘要:** 在采用串行干扰消除的 CDMA 蜂窝系统中, 资源的稀缺性以及不同的译码顺序导致不同的系统性能等因素的存在, 使得研究联合译码顺序调整的跨层资源管理很有必要。讨论了这类系统中无线资源管理的研究现状, 包括功率控制、速率分配、容量分析与接纳控制等方面, 分析了当前研究的局限性; 给出了跨层资源管理的进一步研究方向。

**关键词:** 串行干扰消除; 单用户检测; 译码顺序; 跨层资源管理

中图分类号: TN911 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2010)08-2828-06

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.08.005

## Cross-layer resource management in CDMA cellular systems with successive interference cancellation

ZHOU Zhao-rong<sup>1</sup>, ZHANG Yi-de<sup>2a</sup>, FENG Gang<sup>2a</sup>, LI Le-min<sup>2b</sup>

(1. School of Physics & Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China; 2. a. National Laboratory of Communications, b. School of Communication & Information Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** In CDMA cellular systems with successive interference cancellation (SIC), cross-layer resource management need to be studied by taking into account the adjustment of decoding orders due to scarce resources and different decoding orders resulting in different system performance. This paper first discussed the research status of radio resource management in this kind of systems, including power control, rate allocation, capacity analysis and admission control, and then analyzed the limitations of current research. Finally, proposed the further research direction of cross-layer resource management.

**Key words:** successive interference cancellation (SIC); single user detection (SUD); decoding order; cross-layer resource management

CDMA 技术可用于多址通信, 在当前的 3G 蜂窝系统中得到广泛的应用, 也可用于需要多址通信的其他场合。但是, 在 CDMA 蜂窝组网中, 随着用户数目的迅猛增长以及各类用户对系统提出更多、更迫切的通信要求, 系统对于无线资源的需求也越来越高。采用先进的通信信号处理技术, 如采用具有低实现复杂性、高系统性能的串行干扰消除(SIC)<sup>[1]</sup>这类多用户检测技术之后, 可在一定程度上提高这类系统的频谱利用率, 但依然无法彻底缓解有限的无线资源与无限的用户需求之间的矛盾。因此, 即使在结合 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中, 无线资源管理依旧是一个无法回避的重要研究课题。

在 CDMA 蜂窝系统中, 通常意义上的无线资源管理包括功率控制、速率分配、接纳控制等方面, 前两者对应的是链路层分组的做法, 后者对应的是网络层呼叫级的做法。此外, 由于容量分析可为接纳控制提供必要的参考, 容量分析也被纳入到了无线资源管理的框架中。在采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统

中, 如果小区中有  $K$  个用户, 则对应应有  $K!$  种可能的译码顺序。在不同的译码顺序下, 用户的发射(或接收)功率要求有所不同, 不同的译码顺序导致不同的系统性能。相应地, 在这类系统中, 无线资源管理与单用户检测(single user detection, SUD)接收机下的情况有着明显的不同。此时, 为了有效地利用无线资源, 需要在无线资源管理策略的设计中结合跨层的思想, 尤其是在设计上层(链路层与网络层等)的资源管理策略时联合考虑底层(物理层)译码顺序的调整。

### 1 采用 SIC 的基站接收机模型

SIC 是一种同时具有低实现复杂性与高系统性能的多用户检测技术, 其基本思想叙述如下: 基站接收机从总的接收信号中逐次对本小区各个用户的接收信号进行检测(译码), 某一用户的接收信号一旦被检测(译码), 基站接收机就结合信道估计以及检测(译码)的结果重建该用户的接收信号, 并在

收稿日期: 2010-01-26; 修回日期: 2010-03-24 基金项目: 国家“973”计划资助项目(2007CB310604); 国家自然科学基金资助项目(60772142)

作者简介: 周朝荣(1975-), 男, 四川内江人, 讲师, 博士, 主要研究方向为无线资源管理(zhou@cuit.edu.cn); 张翼德(1977-), 男, 四川成都人, 副教授, 博士, 主要研究方向为跨层协议、无线网络多播技术及无线资源管理; 冯钢(1964-), 男, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为无线通信与网络技术; 李乐民(1932-), 男, 浙江吴兴人, 中国工程院院士, 教授, 博导, 主要研究方向为宽带通信网络技术。

后续用户的检测前从总的接收信号中去除该用户的重建信号。基站接收机重复此过程直至本小区内所有用户的接收信号均被检测(译码)。相应地,在这类 CDMA 蜂窝系统中,第  $i$  个被基站接收机检测(译码)的用户的信干噪声比(signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR)如下表示:

$$\text{SINR}_i = \frac{P_i}{\sum_{j=1}^{i-1} \theta_j P_j + \sum_{j=i+1}^K P_j + f \sum_{j=1}^K P_j + N_0 W} \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, K$

其中:  $K$  为小区中的用户数;  $N_0 W$  为背景噪声,  $W$  为系统带宽,  $N_0$  为噪声的功率谱密度;  $f$  为外小区对本小区的干扰比<sup>[2]</sup>;  $P_i$  为用户  $i$  的接收功率;  $0 \leq \theta_i \leq 1$  为用户  $i$  的残余功率因子;  $\theta_i P_i$  为对用户  $i$  的接收信号进行干扰消除之后的残余信号功率。出现残余信号功率的原因如下: 基站接收机处的信道估计与译码判决结果通常无法做到准确无误, 信道真实值与估计值以及符号真实值与判决值之间的差异将导致针对用户  $i$  的重建信号无法精确等于其接收信号, 相应地, 对于在用户  $i$  之后检测(译码)的用户而言, 来自用户  $i$  的信号干扰无法完全消除, 这部分未被完全消除的干扰所对应的功率即为残余信号功率。

进一步地, 当用户  $i$  的速率取为  $R_i$  时, 为了达到可靠通信的目的, 该用户需要满足特定的误比特率要求, 此误比特率要求可以通过特定的比特能量干扰比(bit-energy-to-interference-power-spectral-density ratio,  $E_b/I$ ) 要求进行保证。  $E_b/I$  要求如下:

$$(W/R_i) \times \text{SINR}_i = \gamma_i; i = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

令  $Y_i = W/(R_i \gamma_i)$ , 在给定的译码顺序下, 联合式(1)(2), 可以得到各个用户的接收功率为

$$P_1 = \frac{N_0 W}{(Y_1 - f) - (1 + f) \left[ \sum_{i=2}^K \prod_{j=2}^i \frac{(\theta_{j-1} + Y_{j-1})}{(1 + Y_j)} \right]} \quad (3)$$

$$P_i = \frac{\theta_{i-1} + Y_{i-1}}{1 + Y_i} P_{i-1}; i = 2, \dots, K \quad (4)$$

与采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统有所不同的是, 在采用 SUD 接收机的 CDMA 蜂窝系统中, 用户  $i$  的 SINR 为

$$\text{SINR}_i = \frac{P_i}{\sum_{j=1}^{i-1} P_j + \sum_{j=i+1}^K P_j + f \sum_{j=1}^K P_j + N_0 W} \quad (5)$$

$i = 1, 2, \dots, K$

联合式(2)(5), 可以得到在 SUD 接收机的情况下各个用户的接收功率要求为

$$P_i = \frac{1}{1 + Y_i} \frac{N_0 W}{1 - (1 + f) \cdot \left[ \sum_{j=1}^K \prod_{l=1}^j \frac{1}{(1 + Y_l)} \right]}; i = 1, 2, \dots, K \quad (6)$$

对比 SIC 接收机以及 SUD 接收机下各个用户的接收功率要求, 即将式(3)(4)与式(6)进行对比之后可以发现, 在采用 SIC 的情况下, 某一用户的译码次序越靠后, 其他用户对该用户的干扰就越小; 相应地, 用户的接收(发射)功率要求在不同的译码顺序下有所不同。进一步地, 如果小区中存在  $K$  个用户, 则对应应有  $K!$  种可能的译码顺序, 译码顺序的调整不但会影响单个用户的接收(发射)功率要求, 还将导致不同的系统性能。而在 SUD 接收机的情况下, 不存在用户译码次序先后的问题, 即没有译码顺序调整的问题。因此, 在采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中, 研究无线资源管理策略时需要考虑译码顺序这一影响因素, 即在设计上层资源管理策略时需要联合底层(物理层)译码顺序的调整, 这与 SUD 接收机下的无线资源管

理策略有所不同。此时无线资源管理所对应的优化问题中, 可以调整的变量不再局限于功率、速率等因素, 译码顺序的选取成为了这类问题的新增变量。通常就优化问题而言, 如果涉及到的变量越多, 那么求解该问题所对应的复杂度也就越高, 相应地, 采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中的无线资源管理问题更加复杂。目前, 已有工作针对这类系统中的资源管理问题展开研究, 包括功率控制、速率分配、容量分析以及接纳控制等方面, 但这些相关研究还有诸多不足, 有待进一步地深入与完善, 尤其是如何联合物理层的译码顺序设计跨层资源管理策略的问题, 下文将就此进行分析讨论。

## 2 采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中的跨层资源管理

### 2.1 CDMA 蜂窝系统中基于 SIC 的功率控制

在采用 SUD 接收机的 CDMA 蜂窝系统中, 功率控制通过使得属于同种业务类型的用户的接收功率相同来达到抑制多址干扰、克服远近效应并最终保证 QoS 要求的目的。在采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中, 功率控制同样重要, 但由于某一用户的译码次序越靠后, 来自其他用户的干扰就越小, 相应地, 该用户所对应的接收功率要求就越低。因此在这类系统中, 功率控制不再需要使得属于同种业务类型的用户的接收功率相同, 反而可以让用户的接收功率有所不同。此外, 不同的译码顺序还将导致目标用户的(发射)接收功率要求有所不同。因此在这类系统中, 链路层的功率控制需要与物理层的译码顺序调整联合考虑。

类似于 SUD 接收机的情况, 在采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中, 功率控制同样可以分为分布式功率控制与集中式功率控制两大类。前者中不存在集中的功率控制模块, 各个用户通过分布式算法调整自身的发射功率以收敛到目标值; 后者中存在中心控制模块(通常是基站设备)来集中计算在某一优化目标下各个用户的(发射)接收功率要求, 然后通过反馈机制要求用户调整功率达到目标值。

文献[3]研究了基于非理想 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中的分布式功率控制的问题, 结果表明, 基于有限功控反馈比特的分布式功率控制算法可以使得用户功率收敛于最优解, 且该算法在多径衰落信道下同样有效。博弈论在非协作多目标优化问题中有着广泛的应用, 分布式功率控制算法可以归入这一优化问题的范畴, 为此, Jean 等人<sup>[4]</sup>研究了这类系统中基于博弈论的非协作功率控制, 分析了 Nash 平衡的存在情况。结果表明, 对于功率连续调整的情况, 系统存在惟一的 Nash 平衡; 对于功率离散调整的情况, Nash 平衡将以很高的概率存在。需要指出的是, 上述分布式算法针对的均是译码顺序预先设定的情况, 不涉及译码顺序调整的问题, 即这类研究未考虑如何联合译码顺序的调整设计跨层分布式功率控制算法的问题。

就基于 SIC 的集中式功率控制的问题而言, Siu 等人<sup>[5]</sup>考虑了多业务 CDMA 蜂窝系统中的情况, 其优化目标是调整译码顺序以最小化总的发射功率, 给出了能够最小化总发射功率的最佳译码顺序。该研究针对的是理想 SIC 的情形, 即在后续用户信号的逐次检测过程中, 先前已被检测(译码)用户的信号成分是被完全消除了; 在实际情况下, 可能存在的信道估计误差以及译码判决错误使得研究非理想 SIC 的情况更有意义。文献[6]考虑了非理想 SIC 的情况下的集中式功率控制问题, 同样给出了能够最小化总发射功率的最佳译码顺序, 但

仅仅针对单种业务类型的情况。文献 [7, 8] 进一步研究了多种业务类型的情况, 作者指出最佳的译码顺序为用户的 SINR 要求与信道增益的函数, 但缺乏显式结果。功控问题的优化目标除了最小化总的发射功率外, 还可以是最小化总的接收功率。文献 [9] 同样考虑集中式功率控制的问题, 但优化目标是调整译码顺序以最小化总的接收功率。需要说明的是, 上述集中式功率控制针对的都是单小区情况, 未考虑多小区的情况。在多小区的情况下, 位于小区边缘的用户是一类特殊的用户, 来自这类用户的信号不仅可被控制基站检测(译码)还能够被相邻小区基站检测(译码)。基于这样的考虑, Chung 等人 [10] 提出了在消除本小区干扰之前先消除来自小区边缘的邻小区用户信号干扰的做法, 但针对的是理想 SIC 的情况。此外, 功率受限的因素在上述集中式功率控制的研究中未涉及。

移动终端的发射功率通常是有限的, 即用户的最大发射(接收)功率存在着特定的限制。考虑到该限制, 还有一个与功率控制密切相关的问题就是确定系统是否可行的问题, 即系统对于用户功率的要求是否满足用户的最大功率限制的问题。并非在所有  $K!$  种可能的译码顺序下, 各个用户的功率限制条件都能够得到满足。因此, 系统可行与否定义如下:

**定义 1** 若在所有  $K!$  种可能的译码顺序下, 按照式 (3) (4) 的方式分配功率均不能使得用户的功率限制得到满足, 则系统不可行; 否则, 若存在某一译码顺序, 在该译码顺序下, 按照式 (3) (4) 的方式分配功率能够使得用户的功率限制得到满足, 则系统可行。

此时, 高效地检验系统是否可行有助于接纳控制或者调度机制尽快作出响应。然而, 即使对于中等用户规模的系统而言, 直接通过穷举法检验系统可行与否也意味着极大的计算量。在最坏的情况下, 穷举法需要检验所有  $K!$  种可能的译码顺序才能够确定系统可行与否。在基于 SUD 接收机的系统中, 检验系统可行与否没有译码顺序调整的因素需要考虑 [11]。针对给定的译码顺序, 文献 [3, 6, 12, 13] 研究了约束条件是否得到满足的问题, 尽管文献 [6] 也考虑了用户功率存在限制的情况, 但不涉及译码顺序调整的问题, 其结果也就类似于 SUD 接收机的情况。如果各个用户的残余功率因子  $\theta$  都相同, 就可以根据某一特定译码顺序下约束条件是否得到满足来直接确定系统是否可行 [14], 这较之穷举法能够极大地节省计算量。但在实际中各个用户的残余功率因子均相同的假设显得较为苛刻, 因此, 如何高效地确定采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统是否可行还有继续研究的余地。

为此, 在将来基于 SIC 的跨层功率控制问题中, a) 研究联合译码顺序调整的分布式功率控制算法以优化功率资源; b) 在可行性约束(诸如功率限制)、多小区以及非理想 SIC 的情况下, 研究如何在集中式功率控制算法中调整译码顺序以最小化总功率的问题; c) 针对更加普遍的情况(诸如用户残余功率因子取值不同) 研究如何高效确定系统是否可行的问题。

## 2.2 CDMA 蜂窝系统中基于 SIC 的速率分配

宽带 CDMA 蜂窝系统需要对多媒体业务类型提供支持, 这类业务具有弹性特性, 即根据当前的系统负荷以及物理链路性能, 系统可在特定的速率集合中调整用户的业务速率。相应地, 在保证用户 QoS 要求的前提下, 如何利用业务的弹性特性公平有效地分配速率成为研究人员以及运营商关注的重点。在这类速率分配的问题中, 需要兼顾功率的限制、速率的取值

范围以及各个速率对应的  $E_b/N_0$  要求等多个约束条件, 此外, 约束条件之间的关系较为复杂, 这导致即使是在 SUD 接收机的情况下, 求解速率分配的问题也不容易, 需要同时考虑功率控制与速率分配两方面的因素。

在采用 SIC 的 CDMA 系统中, 不同的译码顺序导致不同的系统性能, 在某一给定的速率模式下, 用户的功率限制以及对应的  $E_b/N_0$  要求是否能够得到满足不仅仅与用户自身的限制有关, 还与物理层所选取的译码顺序密切相关。类似于系统可行与否的定义, 速率模式是否可行定义如下:

**定义 2** 就某一速率模式而言, 若在某种译码顺序下, 按照式 (3) (4) 的方式分配功率能够使得用户的功率限制以及对应的  $E_b/N_0$  要求得到满足, 则该速率模式可行; 否则, 即在所有  $K!$  种可能的译码顺序下, 按照式 (3) (4) 的方式分配功率均不能够使得用户的功率限制以及对应的  $E_b/N_0$  要求得到满足, 则该速率模式不可行。

由于某一速率模式的可行与否不再独立于译码顺序的选取, 在采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中, 链路层的速率分配不仅涉及到功率控制与速率分配两个方面, 还需要考虑物理层译码顺序的调整。

Kumaran 等人 [15] 研究了采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中的速率分配问题, 其优化目标是最大化系统吞吐量, 系统吞吐量定义为用户速率的加权。结果表明, 当所有用户的接收信号有着相同的互相关特性时, 最佳的译码顺序由用户权值的升序排列所确定, 基于此译码顺序, 各用户以最大功率发射信号能够最大化系统吞吐量。但该研究有两个局限——理想 SIC 以及用户速率为 SINR 的连续函数。在异步 CDMA 蜂窝系统中, 无线信道传输特性的不同以及扩频码字之间的差异导致用户接收信号之间的互相关特性不再相同, 这时, 为了最大化系统吞吐量, 各个用户以最大功率发射信号不再是最佳的方式, 最大化系统吞吐量是个 NP 完全问题。文献 [16] 针对这种情况展开研究, 提出了基于离散随机近似 (discrete stochastic approximation, DSA) 的次优算法进行求解, 考虑了功率控制、速率分配与译码顺序三方面的联合调整。然而, 文献 [15] 中的局限(理想 SIC 与速率连续取值) 在文献 [16] 中同样存在。信道估计误差以及译码错误的存在使得 SIC 通常并不理想; 用户速率并非 SINR 的连续函数, 其取值范围通常基于离散集合。为此, 文献 [17] 考虑非理想 SIC 以及用户速率离散取值的情况, 此时的速率分配问题同样是 NP 问题, 提出了次优算法求解这一问题, 具体的算法分为内外两层: 内层算法快速调整译码顺序, 外层算法基于贪婪思想对速率模式进行有效的更新。但该研究还有两方面可以改进: a) 针对更加普遍的情况(诸如残余功率因子不同) 如何快速调整译码顺序的算法; b) 在速率模式的有效更新过程中考虑性能更优异的启发式算法, 如遗传算法、粒子群算法等。

上述基于 SIC 的速率分配仅仅针对单个快拍 (snapshot) 或者说非时变信道的情况, 缺乏考虑时变信道尤其是多径衰落信道的情况。文献 [18] 研究了快衰落信道的情况, 速率分配的目标是最大化系统的平均吞吐量, 这一问题具有指数复杂度, 为此作者提出了次优的贪婪算法求解。类似于文献 [17] 中的算法, 该算法同样分为内外两层, 内层确定译码顺序, 基于所确定的译码顺序, 外层完成用户速率的分配。除了快衰落信道之外, 多径衰落信道还可能是慢衰落信道。在快速衰落信道的情

况下,考虑的是用户的平均速率,而在慢衰落的情况下,需要考虑用户的中断速率。文献 [19] 研究了慢衰落信道情况,所提出的算法同样是在内层确定译码顺序,基于所确定的译码顺序,外层完成用户速率的分配。但需要指出的是,文献 [18, 19] 针对的均是理想 SIC 的情况,此外,用户速率假设为 SINR 的连续函数。

为此,在将来基于 SIC 的跨层速率分配的研究中,可以对更加实际的情况(非理想 SIC、用户速率离散取值以及用户残余功率因子不同)设计对应的速率分配算法。上述速率分配的研究均为集中式速率分配问题,类似于功率控制的问题,同样可以研究分布式速率分配的问题。此外,在现有相关研究中,优化目标通常只有一个,即最大化系统吞吐量或者最大化总效用,这样的问题归结为单目标优化的范畴。在实际中,仅仅采用单一的优化目标很难全面反映这类速率分配问题的特点,如优化目标为多个相互冲突的量,可以在最大化用户效用的同时最小化用户的功率,这时需要考虑多目标优化的问题,而求解多目标优化问题较之单目标优化问题更加复杂。

### 2.3 CDMA 蜂窝系统中基于 SIC 的容量分析

分析 CDMA 蜂窝系统的容量意义有三: a) 小区规划(基站位置的选取、基站个数的确定等)阶段,需要估算系统容量之类的相关信息; b) 在容量分析的过程中,多个影响因素(路径损耗、阴影效应、多径衰落特性等)被纳入考虑,通过解析计算的分析方法,有助于确定影响容量的关键因素、提出正确的解决措施; c) 容量分析的结果可为资源管理策略尤其是接纳控制算法提供必要的参考。因此,有必要研究 CDMA 蜂窝系统的容量性能。

文献 [20] 较早研究 CDMA 蜂窝系统的容量性能,基于该文献中的分析方法,不少文献随后分析了更加复杂情况下的系统容量。Lee 等人 [21] 分析了多径衰落信道下的系统容量,兼顾了非理想功率控制的因子; Jung 等人 [22] 分析了采用正交跳码的上行同步 CDMA 系统的容量; Alishahi 等人 [23] 分析了任意加性噪声分布情况下的系统容量,得到了一系列的容量下限。然而,这些工作针对的均为 SUD 接收机的情况。在采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中,用户在译码次序上的先后差异导致同种业务类型的用户的接收功率不再相同,因此在这类系统中,原先基于 SUD 接收机的容量分析方法不再适用。此时的容量分析与译码顺序的选取密切相关,即系统的容量分析需要与物理层的译码顺序联合考虑。

文献 [24] 分析了采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统的容量,给出了在总接收功率限制下系统容量的计算方法,然而该文献针对的是理想 SIC 的情况。信道估计误差与译码判决错误的存在导致 SIC 不可能是理想的,从复合信号中去除先前已被译码用户的重建信号时,始终有该用户的残余信号成分,该信号成分影响系统容量。为此, Slimane 等人 [25] 考虑了非理想 SIC 的情况,分析了功率控制与 SIC 两者之间的相互作用对于 CDMA 蜂窝系统容量的影响,结果表明,在单业务的环境中,通过 SIC 接收机可在降低用户发射(接收)功率要求的同时提高系统容量。进一步地,为了降低接收机的复杂度,作者又在限制 SIC 级数的情况下得到了基于 SIC 级数的容量上限。文献 [13] 同样考虑了非理想 SIC 情况下的 CDMA 蜂窝系统,针对的是多种业务类型,推导出了系统容量,并在保持扩频增益与用户数目的比例恒定的同时令两者趋于无穷,得到了基于每自由度的渐

进容量。

阴影效应是影响系统容量的重要因素之一,阴影效应的存在使得用户的控制基站并非就是距离其最近的基站,控制基站由空间距离与阴影效应两方面因素共同决定,而前述基于 SIC 的容量分析并未涉及阴影效应。Nie 等人 [26] 指出,不考虑阴影效应,外小区干扰会被明显低估,因此,作者考虑了阴影效应对于信道增益模型的影响,提出了新的模型分析外小区干扰,其有效性通过仿真得到验证。此外,CDMA 蜂窝系统是干扰受限的,若期望小区有较大的覆盖范围,就需要在一定程度上牺牲小区的容量性能;反之,若期望小区的容量性能较高,其覆盖范围就会有所下降。针对非理想 SIC 的情况,Dawy 等人 [27] 结合阴影效应分析了上行链路的覆盖与容量两者的性能折中,推导出了对应的解析表达式。

类似于阴影效应,多径衰落对于系统容量同样影响显著。就多径衰落信道而言,即使采用快速闭环功率控制也会因反馈的功控指令跟不上信道的快速变化而出现功率控制误差,这一误差在前述相关研究中未被涉及,即前述基于 SIC 的容量分析针对的是理想功率控制的情况。功率控制误差的存在将会导致 SIC 的残余误差随机变化,文献 [28] 研究了这种情况,推导出了残余误差的概率密度分布函数,相应的结果可以用于这类系统的建模。文献 [29] 在分析 WCDMA 系统中 IP 电话容量与覆盖的性能折中的同时兼顾了多径衰落的影响,作者还指出,在 SIC 的情况下,基于判决译码的结果重建用户信号的方法较之基于解调的结果重建用户信号的方法有着更好的性能。

在 CDMA 蜂窝系统中,基站处的 Rake 接收机可以同时分辨、最大比合并多条分集信道,而可被同时分辨、最大比合并的分集信道的数目也将影响系统容量,这点在基于 SIC 的容量分析中 [30] 已经得到证实,但该研究未涉及阴影效应的影响,并且对于如何选取译码顺序缺乏考虑。在采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中,物理层译码顺序的选取也将影响系统容量,虽然部分研究涉及到了译码顺序的选取,但通常只是根据用户路径损耗的大小来确定的,这是一种被动的方式,若在容量分析的同时考虑用户的功率限制以及业务类型,译码顺序的选取就不再那样简单,相应地,译码顺序的调整对于系统容量的影响就无法忽略,这点在上述相关的研究中没有体现。

综合前述基于 SIC 的容量分析的讨论可以看出,在采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中,单业务或多业务类型、SIC 是否理想、阴影效应、多径衰落、功率控制误差、分集信道的数目以及物理层的译码顺序均为影响容量性能的重要因素。而在该类容量分析的已有研究中,对于这些影响因素缺乏较为全面的考虑,在将来的工作中,可以研究如何在全面兼顾多种影响因素的情况下分析系统容量。

### 2.4 CDMA 蜂窝系统中基于 SIC 的接纳控制

接纳控制的目标是控制进入系统中的呼叫数目以保证已有连接的 QoS 要求,最终达到提高资源利用率并防止系统负荷过载的目的。接纳控制对应于网络层的资源管理策略,网络层的 QoS 要求与物理层的性能指标通常是对立的,如降低网络层的呼叫阻塞概率有助于系统接纳更多的用户,但系统中的干扰电平将会增长,用户所能够达到的 SINR 有所下降。此外,在基于分组交换的 CDMA 蜂窝系统中,链路层分组级还有特定的 QoS 要求(如分组时延),因此,在接纳控制算法的设计过程中,必须兼顾各协议层间相互对立的性能要求。文献

[31] 兼顾了这些因素,避免了相关研究中呼叫级的 QoS 要求被忽略的缺陷,所提出的接纳控制算法折中了层间的多种性能要求。在接纳控制算法的设计过程中,除了各协议层的性能要求需要考虑之外,还需要兼顾两类功率的限制,即单个用户发射(接收)功率的限制<sup>[32]</sup>和基站接收机处总接收功率的限制<sup>[33]</sup>。前者好理解,移动台有限的发射功率导致接收功率受到限制;就后者而言,接收机的动态范围限制使得基站接收机处的总接收功率不能超过某一上限<sup>[30]</sup>。此外,有限的容量使得系统无法不加区分地接纳所有连接请求,须为不同业务类型的用户提供有所差别的服务<sup>[34]</sup>,尤其是要区别对待切换业务与新呼叫业务,这可通过服务等级(grade of service, GoS)<sup>[35]</sup>之类的性能指标来实现。文献[36]考虑了如何为切换业务设置更高的优先级,以改善系统的阻塞概率以及丢弃概率等性能。Lenin 等人<sup>[37]</sup>结合移动性预测、自适应编码调制以及数据业务的时延不敏感等因素设计接纳控制算法,以提高资源的利用率。然而这些接纳控制的算法都是基于 SUD 接收机的,没有考虑 SIC 的情况。

在结合 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中,译码顺序影响系统容量,相应地,译码顺序的调整也会影响接纳控制算法的决策,即通过调整译码顺序,可以使得在某些译码顺序下被系统拒绝的用户在调整后的译码顺序下能够被系统所接纳。因此,在采用 SIC 的 CDMA 系统中,接纳控制算法的设计需要联合考虑物理层译码顺序的调整。其次,在采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中,随着系统能够同时支持的用户数目的增长,较早被译码的用户依然会受到较强的多址干扰,这时同样会有较高的发射(接收)功率要求,另一方面,随着用户数目的显著增长,基站接收机处的总接收功率同样增长明显。因此,单个用户发射(接收)功率的限制以及总接收功率的限制依然存在,而这两类功率限制对于译码顺序的调整有不同的要求。

目前,已经涌现了大量基于 SUD 接收机的接纳控制的文献,但基于 SIC 的接纳控制算法的研究工作还比较少。Chen 等人<sup>[38]</sup>研究了这类系统中的接纳控制算法,提出了基于模糊逻辑的呼叫接纳控制算法,然而单个用户的功率限制以及基站接收机处的总接收功率限制均未涉及。此外,物理层的译码顺序是按照各个用户接收功率大小降序排列所确定的,这样确定译码顺序的方式是一种被动的方式,没有涉及到接纳控制与译码顺序调整的联合优化,即缺乏译码顺序随着系统状态的改变而主动调整的过程。文献[39]同样针对此类系统中的接纳控制展开研究,但仅仅涉及到了单个用户功率的最大限制,缺乏考虑基站接收机处总接收功率的限制,相应地,译码顺序的调整中缺乏对于总接收功率的考虑,并且未能区别对待不同业务类型的用户。在采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中,系统容量虽然得以极大地提高,但相对于用户的多种需求而言,容量依旧紧张,因此还是需要区别对待不同业务类型的用户,尤其是区别对待切换与新呼叫。除了集中式的接纳控制算法之外,还可以研究分布式的接纳控制算法,Catrein 等人<sup>[40]</sup>提出了分布式的接纳控制算法,这种分布式的接纳控制算法较之集中式的算法能够极大地节省计算量,但在算法的设计过程中,物理层的译码顺序是随机产生的,对于怎样调整译码顺序以及如何兼顾单个用户发射(接收)功率的限制缺乏考虑。

为此,在将来的基于 SIC 的跨层接纳控制的研究中,a) 在兼顾上述两类功率限制的情况下,研究如何联合译码顺序的调

整设计接纳控制算法的问题;b) 研究如何设置各类业务的接纳门限以区别对待不同业务类型的问题,如基于总接收功率的限制计算得到各类业务的剩余容量后,研究如何根据剩余容量设置各类业务接纳门限的问题。

### 3 结束语

在采用 SIC 的 CDMA 蜂窝系统中,有限的无线资源与无限的用户需求之间的矛盾依然存在,针对无线资源管理的研究同样无法回避。而在这类系统中,不同的译码顺序导致不同的系统性能,设计上层(链路层乃至网络层等)的资源管理策略时需要联合考虑底层(物理层)的译码顺序的调整。本文分析讨论了这类系统中的功率控制、速率分配、容量分析以及接纳控制等方面的研究现状,并给出了各个方面联合译码顺序调整的跨层资源管理的研究方向。

此外,在这类蜂窝系统中,为了进一步地提高系统性能,物理层还可以在 SIC 的基础上结合最小均方误差(minimum mean square error, MMSE)准则,这时所对应的资源分配问题中,需要考虑的因素不仅有译码顺序的调整,还有 MMSE 准则下滤波器系数的设置问题。其次,除了存在中心控制节点的蜂窝系统之外,无线网络还包括不存在中心控制节点的其他类型,如 Ad hoc 网络, SIC 同样可以用于这类没有中心控制节点的网络中,这时,如何基于 SIC 的特性来扩展现有的研究值得考虑。

### 参考文献:

- [1] HOU Ji-lei, SMEE J E, PFISTER H D, *et al.* Implementing interference cancellation to increase the EV-DO Rev A reverse link capacity [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2006, 44(2): 96-102.
- [2] ZHANG Hui, FANG Xu-ming. A pricing and game theory-based call admission control scheme for CDMA systems [C] // *Proc of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. Shanghai: IEEE Press, 2007: 6493-6496.
- [3] AGRAWAL A, ANDREWS J G, CIOFFI J M, *et al.* Iterative power control for imperfect successive interference cancellation [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2005, 4(3): 878-884.
- [4] JEAN C A, JABBARI B. On game-theoretic power control under successive interference cancellation [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2009, 8(4): 1655-1657.
- [5] SIU M S, CHENG R S. Power control for multi-rate CDMA systems with interference cancellation [C] // *Proc of Global Communications Conference*. San Francisco: IEEE Communications Society, 2000: 895-900.
- [6] BERGGREN F, SLIMANE S B. Power allocation for a simple successive interference cancellation scheme in a multi-rate DS-SS-CDMA system [C] // *Proc of International Conference on Communications*. New York: IEEE Communications Society, 2002: 351-355.
- [7] JALALI S, KHALAJ B K. Power control for multi-rate DS-SS-CDMA systems with imperfect successive interference cancellation [J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2008, 57(1): 600-603.
- [8] MOHAMMED M, BUEHRER R M. The effects of ordering criteria in linear successive interference cancellation in CDMA systems [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2008, 7(11): 4128-4132.
- [9] SHU Tao, NIU Zhi-sheng. Capacity optimization by using cancellation-error-ascending decoding order in multimedia CDMA networks with imperfect successive interference cancellation [C] // *Proc of In-*

- ternational Conference on Communications. 2003: 2170–2174.
- [10] CHUNG H W, JEON S W, PARK D H, *et al.* Joint determination of power and decoding order for successive inter- and intra-cell interference cancellation [C] //Proc of International Conference on Advanced Communication Technology. 2007: 1482–1486.
- [11] MATHAR R, SCHMEINK A. Proportional QoS adjustment for achieving feasible power allocation in CDMA systems [J]. *IEEE Trans on Communications*, 2008, 56(2): 254–260.
- [12] CATREIN D, MATHAR R. Feasibility and power control for linear multi-user receivers in CDMA networks [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2008, 7(2): 4700–4709.
- [13] ATAMAN S, WAUTIER A. Capacity and asymptotic user capacity of a multi-service CDMA uplink with successive interference cancellation [C] //Proc of International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2006: 1–5.
- [14] ZHOU Zhao-rong, FENG Gang, ZHANG Yi-de, *et al.* Efficient feasibility examination for successive interference cancellation in DS-CDMA systems [C] //Proc of Global Telecommunications Conference. New Orleans: IEEE Communications Society, 2008: 1–5.
- [15] KUMARAN K, QIAN Li-jun. Scheduling on uplink of CDMA packet data network with successive interference cancellation [C] //Proc of Wireless Communications and Networking Conference. New Orleans: IEEE Communications Society, 2003: 1645–1650.
- [16] VERONESI D, TOMASIN S, BENVENUTO N. Cross-layer optimization for multimedia traffic in CDMA cellular networks [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2008, 7(4): 1379–1388.
- [17] ZHANG Yi-de, ZHOU Zhao-rong, FENG Gang, *et al.* Novel radio resource allocation strategy in CDMA cellular networks [C] //Proc of International Conference on Communications, Circuits and Systems. 2009: 59–63.
- [18] LAU V K N. On the macroscopic optimization of multicell wireless systems with multiuser detection and multiple antennas: uplink analysis [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2005, 4(4): 1388–1393.
- [19] LAU V K N, NG K W. Per-user packet outage analysis in slow multi-access fading channels with successive interference cancellation for equal rate applications [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2008, 7(5): 1754–1763.
- [20] VITERBI A M, VITERBI A J. Erlang capacity of a power controlled CDMA system [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1993, 11(6): 892–899.
- [21] LEE C H, CHANG C J, SHEEN W H. A capacity analysis method for uplinks in DS/CDMA cellular systems with imperfect SIR-based power control and multi-path fading [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2008, 7(1): 78–83.
- [22] JUNG B C, CHO S S, SUNG D K. Uplink capacity improvement through orthogonal code hopping in uplink-synchronized CDMA systems [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2009, 8(11): 5404–5410.
- [23] ALISHAHI K, MARVASTI F, AREF V, *et al.* Bounds on the sum capacity of synchronous binary CDMA channels [J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2009, 55(8): 3577–3593.
- [24] WARRIER D, MADHOW U. On the capacity of cellular CDMA with successive decoding and controlled power disparities [C] //Proc of Vehicular Technology Conference. 1998: 1873–1877.
- [25] SLIMANE B, CAI Meng, ZHANG Xi, *et al.* On the capacity of CDMA with linear successive interference cancellation [C] //Proc of the 5th European Personal Mobile Communications Conference. Chichester: Wiley, 2003: 362–366.
- [26] NIE Hong, MATHIOPOULOS T, KARAGIANNIDIS G. Reverse link capacity analysis of cellular CDMA systems with controlled power disparities and successive interference cancellation [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2006, 5(9): 2447–2457.
- [27] DAWY Z, DAVIDOVIC S, SEEGER A. The coverage – capacity tradeoff in multi-service WCDMA cellular systems with serial interference cancellation [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2006, 5(4): 818–828.
- [28] HASAN A, ANDREWS J. Cancellation error statistics in a power-controlled CDMA system using successive interference cancellation [C] //Proc of International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. 2004: 419–423.
- [29] WANG Y P, GRANT S J. Multi-user detection for improving VoIP capacity and coverage in WCDMA uplink [C] //Proc of Vehicular Technology Conference. Barcelona: IEEE Press, 2009: 1–5.
- [30] WU T M, TSAI T H. Successive interference cancellers for multimedia multi-code DS-CDMA systems over frequency-selective fading channels [J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2009, 55(5): 2260–2282.
- [31] SHENG Wei, BLOSTEIN S D. Cross-layer call admission control in packet CDMA wireless networks employing ARQ [C] //Proc of Symposium on Communications. 2008: 48–53.
- [32] CHOI J G, CHOI Y J, BAHK S. Power-based admission control for multiclass calls in QoS-sensitive CDMA networks [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2007, 6(2): 468–472.
- [33] AISSA S, KURI J, MERMELSTEIN P. Call admission on the uplink and downlink of a CDMA system based on total received and transmitted powers [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2004, 3(6): 2407–2416.
- [34] CHATTERJEE M, LIN Hai-tao, DAS S K. Rate allocation and admission control for differentiated services in CDMA data networks [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2007, 6(2): 179–191.
- [35] LIU Jia-bin. GoS based call admission control algorithm for power controlled WCDMA networks [C] //Proc of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Dalian: IEEE Press, 2008: 1–4.
- [36] SINDAL R, TOKEKAR S. A neuro-fuzzy call admission control algorithm for voice/data traffic in CDMA cellular network [C] //Proc of International Advance Computing Conference. 2009: 827–832.
- [37] TAMILARASAN N, LENIN S, DANANJAYAN P. Call admission control for CDMA systems with adaptive modulation [C] //Proc of International Conference on Control, Automations, Communication and Energy Conservation. 2009: 1–6.
- [38] CHEN Y H, CHANG C J, SHEN S. Outage-based fuzzy call admission controller with multiuser detection for WCDMA systems [J]. *IEEE Proceedings on Communications*, 2005, 152(5): 617–623.
- [39] ZHOU Zhao-rong, ZHANG Yi-de, FENG Gang, *et al.* Call admission control algorithm in wireless cellular network with successive interference cancellation [C] //Proc of International Conference on Communications, Circuits and Systems. 2008: 301–305.
- [40] CATREIN D, MATHAR R. Segregating in- and other-cell interference with applications to decentralized admission control [J]. *IEEE Trans on Communications*, 2009, 57(8): 2495–250.