

## 多用户检测技术对CDMA系统的影响研究

杨晓波\* 杨新 范录宏

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**定量分析了具有多用户检测功能的CDMA移动通信系统的容量和覆盖,讨论了采用遗传算法实现多用户检测的方法,仿真结果表明无论是抗多址干扰还是抑制远近效应,基于遗传算法的多用户检测技术都明显优于传统检测器。

**关键词** 码分多址; 多用户检测; 遗传算法; 并行干扰对消

中图分类号 TN929.5 文献标识码 A

## Multi-User Detection Technique for CDMA

Yang Xiaobo Yang Xin Fan Luhong

(School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** In this paper, the coverage and capacity in CDMA Systems with multi-user detection technique are analyzed. A genetic algorithm based multi-user detection technique is presented. With the computer simulation, it is shown that the new multi-user detection technique has better performance than the conventional multi-user detection technique in terms of both the resistance on the multiple access interference and the near-far effects.

**Key words** code division multiple access; multi-user detection; genetic algorithm; parallel interference cancellation

随着移动通信的高速发展,城市中的频谱资源日益紧张。为提高频谱利用率,人们提出各种先进技术以提高系统频谱利用率,如智能天线、多用户检测、前向纠错编码等,其中多用户检测通过抑制小区内用户间的多址干扰而大幅提高系统上行容量,因而获得广泛关注。从90年代初开始,通过对多用户检测技术的大量研究,提出了诸多算法<sup>[1~3]</sup>,包括线性类算法如:去相关算法和最小均方误差检测算法,对消类算法如:串行干扰对消算法和并行干扰对消算法及各种加权结构和自适应结构。其中并行干扰对消算法性能优越,可实现性高,受到广泛重视。

对并行干扰对消算法的讨论主要从性能和实现结构来分析,然而在一个实际的码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)系统中,并行干扰对消不仅对基带接收机结构造成较大改变,也影响功率控制、准入控制等无线资源管理策略<sup>[4]</sup>。从系统设计的角度考虑,最值得关注的是并行干扰对消对整个蜂窝网络性能——容量和覆盖的影响。多用户检测(Multi-User Detection, MUD)对蜂窝网络性能的影响可以归结为多用户效率的大小,但多用户效率的大小与具体的MUD算法、自然环境和系统参数密切相关,链路级仿真不能为系统级仿真提供单一的多用户效率参数,这不仅使网络层的无线资源控制算法更加复杂,也使采用MUD的蜂窝网络的性能难以得到比较精确的预测。

2003年12月9日收稿

\* 男 39岁 硕士 教授 主要从事通信与雷达中的信号处理方面的研究

## 1 单用户接收机CDMA蜂窝系统性能分析

容量覆盖分析是CDMA蜂窝网络设计的重要课题。与时分多址和频分多址系统不同,在CDMA系统这种干扰受限系统中,覆盖和容量近似成反比关系:随着系统中用户数的增多,接收机中的干扰背景加重,每个用户都必须加大发射功率来满足一定的信噪比需求,而手机的最大发射功率是一定的,用来克服干扰消耗的功率越多,能够用来克服路径损耗的功率就越少,导致系统的覆盖范围越小。CDMA系统覆盖与容量的关系称为容量覆盖曲线<sup>[5]</sup>。

假设小区内都是单一速率的业务,激活因子为1,且能实现良好功控,即每个用户的信号到达基站的功率相等,则本小区基站接收到的信号中来自本小区干扰信号的功率

$$I_1 = (k-1)P_s \quad (1)$$

小区内感兴趣的用户解调前的信干比

$$r = \frac{P_s}{(I_1 + I_2 + s^2)} \quad (2)$$

式中  $k$  为系统用户数;  $P_s$  为该用户信号到达基站的功率;  $s^2$  为高斯热噪声的功率;  $I_T = I_1 + I_2$  为传统接收机解调前的CDMA干扰信号的总功率,  $I_2$  为本小区基站接收到的信号中来自邻小区干扰信号的功率。

CDMA系统复用因子

$$F = \frac{I_1}{I_1 + I_2} \quad (3)$$

$F$ 即本小区干扰功率在总干扰功率中所占的比例。设  $i = I_1/I_2$  为邻区干扰比。由式(3)可知,邻区干扰比  $i$  与复用因子  $F$  之间有如下关系:

$$F = (1+i)^{-1} \quad (4)$$

根据上述推导,可以求得系统此时的用户数

$$k = F(1 + \frac{1}{r} - \frac{s^2}{P_s}) \quad (5)$$

CDMA系统具有软容量的特性,系统可以通过牺牲一定的覆盖范围和通信质量来容纳更多的用户。在用户的通信质量(即用户接收信号的信噪比)确定后,系统可通过缩小覆盖范围来保证足够大的容量,当覆盖范围减小到0时,系统的容量达到极点容量。反之,系统也可以降低系统负载来增加覆盖范围,即提高最大允许路径损耗。CDMA系统的容量与覆盖的反比关系是通过噪声抬高相联系的。忽略噪声功率,令  $P_s \rightarrow \infty$ , 得到蜂窝系统的极点容量

$$K_{\max} = F(1 + \frac{1}{r}) \quad (6)$$

所以系统中用户数为  $k$  时的系统负载

$$X = \frac{k}{K_{\max}} = \frac{I_T}{I_T + s^2} \quad (7)$$

通常用户数满足  $k \gg 1$ ,

$$\frac{1}{1-X} = \frac{1}{1 - [I_T/(I_T + s^2)]} = \frac{I_T + s^2}{s^2} \quad (8)$$

系统的噪声增强是指总接收信号的功率引起背景噪声增强的倍数

$$N_R = \frac{I + N_0}{N_0} \quad (9)$$

式中  $I$  为进入接收机的总接收干扰功率,  $N_0$  指接收机的背景噪声功率。系统负载越大,进入接收机的总干扰功率越强,接收信号引起的噪声抬高的倍数也越大,因而CDMA网络规划和负载控制中往往把噪声抬高作为系统负载轻重的衡量。总干扰功率  $I_T$  在接收机产生的噪声增强为:

$$N_R \approx \frac{I_T + s^2}{s^2} \tag{10}$$

总接收功率产生的噪声增强近似等于总干扰功率引起的噪声增强，系统的噪声抬高与系统负载有如下的关系：

$$N_R = \frac{1}{1-X} \tag{11}$$

最大容许路径损耗定义为在一定的系统负载下，保证一定的通信质量时，无线链路能够容忍的路径传播损耗的最大值。最大路径损耗是小区覆盖范围的直接度量，最大路径损耗与系统负载的关系为：

$$L_{\max} = G_{all} - \frac{E_b}{N_0} - \frac{1}{1-X} \tag{12}$$

式中  $G_{all} = P_{tx} + G_{ant1} + G_{ant2} - NF - CL - FM + PG - Pn$ ， $P_{tx}$ 、 $G_{ant1}$ 、 $G_{ant2}$ 、 $NF$ 、 $CL$ 、 $FM$ 、 $PG$ 、 $Pn$  分别为移动台发射功率、移动台天线增益、接收机噪声指数、基站天线增益、电缆损耗、衰落余量、扩频增益和热噪声功率， $E_b$  为比特能量。

当蜂窝系统蜕化为单小区模型时，邻区干扰  $I_2 = 0$ ， $F = 1$ ，由式(6)、(7)、(12)化简得到CDMA单小区的容量与覆盖关系为：

$$K_{\max} = \frac{1}{1+(1/r)} \tag{13}$$

$$X = \frac{k}{K_{\max}} = \frac{k}{1+(1/r)} \tag{14}$$

$$L_{\max} = G_{all} - \frac{E_b}{N_0} - \frac{1}{X} \tag{15}$$

## 2 MUD对CDMA蜂窝系统的容量覆盖曲线的影响

MUD技术的应用，能有效地抑制本小区CDMA用户相互间的干扰，提高系统的极点容量，缓解CDMA系统覆盖范围随系统负载增加而迅速缩小的弱点。

在带有MUD接收机的CDMA蜂窝系统中，小区内用户在解调前的信噪比

$$r_2 = \frac{P_s}{(\tilde{I}_T + s^2)} \tag{16}$$

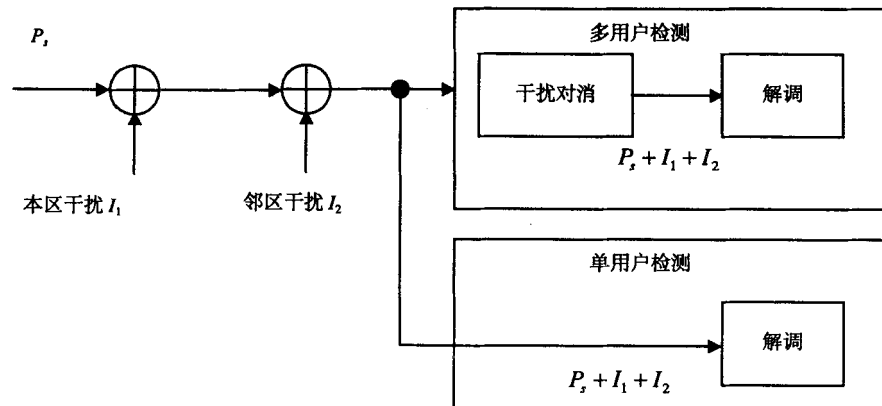


图1 CDMA系统干扰模型

图1所示为CDMA系统干扰模型，由图中可知，MUD接收机解调前的CDMA干扰信号的总功率

$$\tilde{I}_T = \tilde{I}_1 + I_2 \tag{17}$$

式中  $\tilde{I}_1$  为本小区用户的CDMA信号通过MUD后残留的干扰信号的功率。定义MUD效率

$$\mathbf{b} = 1 - \frac{\tilde{I}_T}{I_T} \quad (18)$$

MUD效率是衡量MUD算法性能的指标，其物理意义是：干扰对消器抑制多址干扰的比例，当  $\mathbf{b} = 0$  时， $\tilde{I}_T = I_T$ ，对消算法对多址干扰毫无抑制作用，而当  $\mathbf{b} = 1$  时， $\tilde{I}_T = 0$ ，对消算法将本小区和邻小区的多址干扰完全抑制。从式(18)可得：

$$\tilde{I}_T = (1 - \mathbf{b})\tilde{I}_T = (1 - \mathbf{b})(k - 1)P_s F^{-1} \quad (19)$$

系统用户数与解调前信噪比的关系为：

$$k = F\left(1 + \frac{1}{\mathbf{r}} - \frac{\mathbf{s}^2}{P_s}\right)(1 - \mathbf{b})^{-1} \quad (20)$$

忽略噪声功率，令  $P_s \rightarrow \infty$ ，得到带MUD接收机的蜂窝系统的极点容量

$$K_{\max 2} = F(1 - \mathbf{b})^{-1}\left(1 + \frac{1}{\mathbf{r}}\right) \quad (21)$$

对比式(21)与式(13)，可知：

$$K_{\max 2} = \frac{K_{\max}}{1 - \mathbf{b}} \quad (22)$$

可见，采用MUD将蜂窝系统的极点容量提高  $(1 - \mathbf{b})^{-1}$  倍。

带MUD接收机的CDMA蜂窝系统负载

$$X_2 = \frac{k}{K_{\max 2}} = \frac{\tilde{I}_T}{\tilde{I}_T + \mathbf{s}^2} \quad (23)$$

故

$$\frac{1}{1 - X_2} = \frac{1}{1 - \frac{\tilde{I}_T}{\tilde{I}_T + \mathbf{s}^2}} = \frac{\tilde{I}_T + \mathbf{s}^2}{\mathbf{s}^2} \quad (24)$$

同样，解调前残留干扰功率  $\tilde{I}_T$  产生的噪声增强为：

$$N_{R2} = \frac{\tilde{I}_T + \mathbf{s}^2}{\mathbf{s}^2} \quad (25)$$

系统的噪声与系统负载有如下的关系：

$$N_{R2} = \frac{1}{1 - X_2} \quad (26)$$

由此可得最大路径损耗与系统负载的关系：

$$L_{\max 2} = G_{all} - \frac{E_b}{N_0} - 10\lg(1 - X_2)^{-1} \quad (27)$$

### 3 基于遗传算法的多用户检测技术

引入进化计算中的遗传算法实现全局搜索，同时提高算法的收敛速度。遗传算法是一种模仿生物演变的搜索全局最优的随机搜索研究方法，其实现是从以二进制序列表示的随机染色体开始，染色体的人口数量不随时间改变，人口大小和染色体长度是独立的关系。人口的成员通常是表示求解问题的解决方案符号串，每一代的每一成员都根据它的适合度进行评价，然后分配相应被选择遗传的可能性，进行杂交来产生新的子代。

与经典的遗传进化算法相比，本文采用的遗传算法有以下特点：

- 1) 染色体(chromosome)编码：对所有权值矢量进行编号。
- 2) 染色体评价：对不同的染色体(即不同的权值矢量)进行计算，获得染色体性能评价函数，即适合度函数

$$F(b) = 2x^T b - b^T H b \quad (28)$$

式中  $b$  为各用户发送的信息序列,  $H$  为系统等效矩阵,  $x$  为输出向量,  $T$  为矩阵转置。

3) 遗传算子: 算法中主要使用变异算子, 对染色体父代增加较小的随机扰动以获得新的子代就是变异的过程。

4) 变异概率: 变异概率是指在染色体变异过程中权值发生变化的可能性。变异概率越大, 染色体变异时变化的权值数量越多。

5) 人口(population)数量: 人口数量是指变异过程中所产生的子代数量。人口数量过大, 将使算法的复杂度加大, 随着人口数量的增加, 算法的搜索空间也将增大, 从而提高了获得全局最优解的可能性。

基于遗传算法的多用户检测技术, 算法的复杂度并没有太大的增加, 然而新的算法却保证了搜索过程的收敛性, 同时加快了搜索的收敛速度。

为检验基于遗传算法MUD技术对CDMA系统的影响, 进行了计算机仿真模拟。仿真时系统参数为: 系统带宽1.25 MHz, 比特率14.4 Kb/s,  $F=0.625$ , 信干比 $E_b/N_0=5$  dB。图2所示为通过仿真获得的带MUD的CDMA蜂窝系统的容量覆盖曲线。从图中可以看出, MUD可以提高系统的容量和覆盖, 提高的幅度与MUD效率有关。

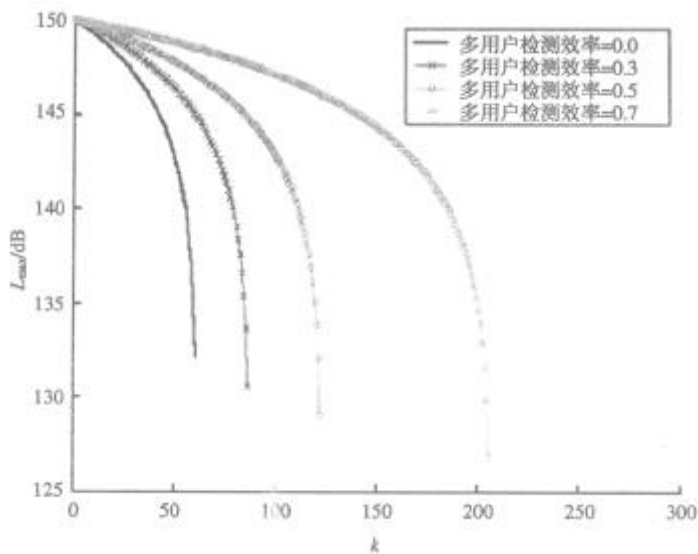


图2 基于遗传算法MUD的CDMA蜂窝系统的容量覆盖曲线

## 4 结束语

在宽带CDMA系统中应用多用户检测还需要做很多研究工作, 宽带CDMA是第三代移动通信中最有潜力的多址接入方式, 而MUD可以大幅度提高其系统容量, 在未来的宽带移动通信中发挥重要作用。

### 参 考 文 献

- [1] Gilhousen K S, Jacobs I M, Padovani R. On the capacity of a cellular CDMA system[J]. IEEE Trans. on Vehicle Technology, 1991, 40(2): 303-312
- [2] Veeravalli V, Sendonaris A. The coverage-capacity tradeoff in cellular CDMA systems[J]. IEEE Trans. on Vehicle Technology, 1999, 48(5): 1 443-1 450
- [3] Hashem B, Sousa E S. On the capacity of cellular DS/CDMA systems under slow Rician/Rayleigh-fading channels[J]. IEEE Trans. on Vehicle Technology, 2000, 49(5): 1 752-1 759
- [4] Holma H, Laakso J. Uplink admission control and soft capacity with MUD in CDMA[C]. IEEE Conference on Vehicle Technology (VTC), 1999. 431-435
- [5] 杨东林, 叶 梧. Turbo CDMA多用户检测的研究[J]. 电子科技大学学报, 2000, 29(3): 247-251

编辑 漆 蓉