

CDMA Bunched 系统覆盖控制算法研究

朱英勋 王荣 益晓新

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

摘要: 该文对 CDMA Bunched 系统位置优化问题进行了研究, 给出了使远端天线单元覆盖区域达到最优的方法; 根据 CDMA 系统中断方程提出了一种基于梯度下降算法的 CDMA Bunched 系统覆盖控制算法; 利用计算机仿真对该算法进行了验证, 结果表明, 经过优化的系统, 用户中断概率较天线单元均匀分布的系统低一个数量级, 较规则分布的系统低 40% 以上。

关键词: 码分多址; 集束系统; 覆盖控制; Voronoi 划分; 梯度下降算法

中图分类号: TN914.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)06-1437-04

Research on Coverage Control Algorithm of CDMA Bunched System

Zhu Ying-xun Wang Rong Yi Xiao-xin

(Institute of Communication Engineering, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China)

Abstract: In this paper, the situation optimization issue of a CDMA Bunched system is investigated and a method that optimize the points distribution is given. According to outage equation of CDMA system, a coverage control algorithm is proposed based on gradient descent algorithm. Computer simulation results show that outage probability of the optimized system is one order of magnitude less than the uniform distributed system and 40% less than the regular distributed system..

Key words: CDMA; Bunched system; Coverage control; Voronoi partition; Gradient descent algorithm

1 引言

对于城市商业中心, 国际会议中心, 体育场等高用户密度的热点地区, 由于用户的移动性和业务类型的不同, 无线网络流量会有较大波动。就蜂窝网络而言, 用户密度的增加意味着无线资源开销增大, 系统容量需要进行扩展, 这样不但增加了网络建设的成本, 而且使得无线资源管理(RRM)变得更加复杂。Bunch 概念^[1]的提出为有效解决上述问题提供了一个简单有效的办法。如图 1 所示, Bunched 系统由一个中心单元(CU)及若干个远端天线单元(RAU)组成, CU 与 RAUs 间通过光纤链路连接。系统采用高效的集中式无线资源管理策略, 所有的资源管理、信号处理功能全部集中在 CU 中, CU 可根据网络环境状况自适应调整资源的分配, 增加系统容量, 改善频谱利用效率。CU 还可根据需要对 RAUs 分布进行灵活的配置, 较好地解决热点地区和盲区的覆盖问题。

Bunched 系统可与多种现有网络结合。文献[2]对 Bunch +CDMA 系统在 7 个 RAUs 规则分布条件下对系统的性能进行了计算机仿真, 结果显示在中断概率为 1%的 QoS 指标下系统下行链路容量可提高 40%。然而在实际情况下, 用户密度是不断变化的, 这时仍采用固定分布的 RAUs 显然不适于发挥 Bunched 系统的优势, 若将 RAUs 的分布与用户密度

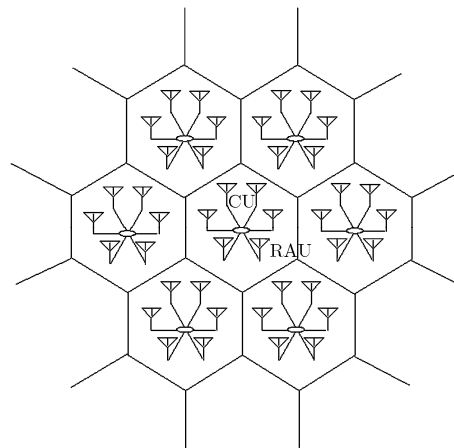


图 1 Bunched 系统结构

结合必将提升系统的性能。基于此, 本文提出了一种自适应覆盖控制算法, 对 RAUs 的分布进行了优化设计, 结果表明经过优化的系统性能有显著改善。

2 一种 CDMA Bunched 系统覆盖控制算法

覆盖控制是 CDMA Bunched 系统亟待解决的问题之一。对于传统的蜂窝网络, 基站覆盖优化问题的研究成果颇为丰富, 主要有贪婪算法、遗传算法和组合算法^[3,4]。然而由于 RAU 架设简单, 耗费低, 具备基站不具备的优势, 因此

在 RAU 的覆盖问题上可以有更大的改进。

2.1 位置优化问题^[5]

位置优化问题最终可以转换成求目标函数的极值问题。设 R^+ 为非负实数集, N 为正自然数集, Q 为 R^N 空间中含有边界的突多边形, $\| \cdot \|$ 表示欧几里德距离函数。令映射 $\phi: Q \rightarrow R^+$ 表示分布密度函数, $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ 表示位置点的集合, q 为 Q 内任意一测试点的位置, $f: R^+ \rightarrow R^+$ 为一单调递增的可微函数, f 和 q 与 p_i 的距离有关, 代表随距离变化的质量评价函数。 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 为 Q 的一个划分, 位置优化问题就是寻找一组最佳位置点及其划分, 使得如下的目标函数值最小:

$$H(P, W) = \sum_{i=1}^n \int_{w_i} f(\|q - p_i\|) \phi(q) dq \quad (1)$$

给定一组位置点坐标 P , 能够将整个计算区域划分为一组最优子区域的方法称为 Voronoi 划分^[6]。如果设 Q 的一个划分为 $V(P) = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, $V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_n = Q$, 则可以定义 Voronoi 划分为如下位置点的集合: $V_i = \{q \in Q \mid \|q - p_i\| \leq \|q - p_j\|, \forall j \neq i\}$ 。根据 Voronoi 划分的定义有 $\forall q \in V_j, \min_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} f(\|q - p_i\|) = f(\|q - p_j\|)$, 这样, 在最佳划分意义下的目标函数即为局部最优函数:

$$H(P, V(P)) = \int_Q \min_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} f(\|q - p_i\|) \phi(q) dq \quad (2)$$

显然, 给定的位置点坐标并不一定是最佳分布, 因此上式所给出的最优函数并不是全局最优的。为达到全局最优的目的, 必须寻找一组最优的位置点分布, 使得在该点集上定义的 Voronoi 划分为全局最优。梯度下降算法^[7]给出了实现全局最优的方法。

2.2 性能评价函数的选择

对于式(1)中性能评价函数 f , 可以是任何表征 Bunched 系统性能的函数, 在实际应用中可以根据需要进行选择。本文将用户的中断概率作为性能评价函数。CDMA 系统的中断方程^[3]如下:

$$S_j = \frac{(N_0 + I)WR\epsilon_j / (W + R\epsilon_j)}{1 - \sum_{i=1}^{k_u} \frac{R\epsilon_i}{W + R\epsilon_i}} \quad (3)$$

S_j 是 RAU 接收到的第 j 个用户的信号功率; ϵ_j 为 RAU 接收到第 j 个用户的信号在该处的信干比; W 是系统的信道带宽; R 是信息比特速率; N_0 是背景噪声功率谱密度; I 为其他 RAU 覆盖区域的干扰谱密度; k_u 为系统中处于通话状态的用户数。当式(4)分母小于零时, 中断方程无解, 这时导致的用户中断记做事件 A_{out} 。则 A_{out} 发生的概率为

$$P(A_{out}) = P\left(\sum_{i=1}^{k_u} \frac{R\epsilon_i}{W + R\epsilon_i} \geq 1\right) = 1 - \int_{-\infty}^1 \left[\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f_{Z_1}(x_1) \dots f_{Z_k}(x_{k-1} - x_k) dx_1 \dots dx_k \right] dx \quad (4)$$

其中随机变量 $Z_i = \frac{1}{W/(R\epsilon_i) + 1}$, 其概率密度函数满足如下关系式^[5]:

$$f_{Z_i}(x) = \frac{10}{\ln(10)\sqrt{2\pi}\sigma_{\epsilon_i}x(1-x)} \exp\left[-\frac{\left(10\lg\left(\frac{R}{W}\frac{1-x}{x}\right) + m_{\epsilon_i}\right)^2}{2\sigma_{\epsilon_i}^2}\right], \quad 0 < x < 1 \quad (5)$$

使得用户通话中断的另一种情形是用户终端的发射功率超出了自身发射功率的最大值或者 RAU 接收到的信号小于接收机的灵敏度 P_{min} 。将这类事件记做 B_{out} , 则在式(6)有解条件下, 该事件导致的中断概率为

$$P(B_{out} | A_{out}^C) = P(\hat{S}_k < P_{min} \text{ 或 } \hat{S}_k > \hat{S}_{max} - PL(d) + \gamma | A_{out}^C) \quad (6)$$

\hat{S}_k 为 RAU 接收到来自第 k 个用户的以 dBW 为单位的信号功率; \hat{S}_{max} 为用户终端最大发射功率; $PL(d)$ 为距离 RAU 为 d 处的路径损耗, 本文假定路径损耗符合以下关系^[3]: $PL(d) = K_1 + K_2 \lg d$; γ 为遮蔽因子, 表示由障碍物遮挡引起的分贝损耗。

$$P(B_{out} | A_{out}^C) = 1 - \left[1 - \left[1 - \Phi\left(\frac{\hat{S}_{max} - PL(d) - P_{min}}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{\hat{S}_{max} - PL(d) - P_{min}}{\sigma}\right) \Phi\left(\frac{\hat{S}_{max} - PL(d) - E(\hat{S}_k)}{\sqrt{D(\hat{S}_k) + \sigma^2}}\right) \right] \right] \left[1 - \Phi\left(\frac{P_{min}}{\sigma}\right) \right] \quad (7)$$

综上可以得到用户的中断概率为

$$P_{outate}(d, k_u) = P(A_{out}) + P(B_{out} | A_{out}^C) \quad (8)$$

式(8)即为所要选取的质量评价函数, 本文以下内容围绕着怎样使该函数值达到最小展开。

2.3 适用于 Bunched 系统的覆盖控制算法

将表达式(7)代入目标函数表达式(1)有

$$H(P, W) = \sum_{i=1}^n \int_{w_i} P_{outage}(\|q - p_i\|, k_u) \phi(q) dq \quad (9)$$

此时, Q 代表单个 bunched 系统控制的小区, q 表示小区内任意一点的坐标, $\phi(q)$ 表示该点处的用户密度, $\phi(q)$ 可以通过长时间对该区域用户位置进行统计观察所得到。 p_i 为小区内第 i 个 RAU 的位置。Bunched 系统覆盖控制算法可以描述为

- (1)产生 RAU 位置初始分布;
- (2)根据 RAU 分布将计算区域作 Voronoi 划分;
- (3)由线性搜索算法产生下降因子 α_j ;
- (4)由迭代关系 $p_j^{i+1} = p_j^i - \alpha_j \frac{\partial H^{(i)}(p_1^i, p_2^i, \dots, p_n^i)}{\partial p_j^i}$ 产生新的 RAU 分布;
- (5)判断 $|p_j^{i+1} - p_j^i|$ 是否小于 ϵ , 如果小于 ϵ 继续, 否则执行(2);

(6)迭代结束。

3 算法仿真与分析

本文假定仿真区域 Q 为一个 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 的正方形区域。在该区域中, 用户密度随位置的变化服从以坐标(1,1)为中心的标准正态分布。RAU 数目为 20 个, 初始分布为均匀分布, 其他参数如下: $R = 14.4\text{kbps}$, $W = 1.25\text{MHz}$, $N_0 = 10^{-10}\text{W/Hz}$, $I = 2N_0$, $m_e = 8\text{dB}$, $\sigma_e = 2.5\text{dB}$, $K_1 = 17.3\text{dB}$, $K_2 = 33.8\text{dB}$, $S_{\max} = 23\text{dBm}$, $P_{\min} = -136 - K_1\text{dB}$, $\sigma = 8\text{dB}$ 。

为了验证覆盖控制算法的有效性, 本文分别对 RAU 初始分布与经过算法运算所得收敛分布两种状态下系统的性能作以比较。图 2 所示为初始分布状态下的 RAU 位置及其 Voronoi 划分。由于均匀分布的随机性, 图 2 中 RAU 位置分布显得杂乱无章。这种状况显然不能够满足用户的需要, 随着用户数量的增多, 必然有某些 RAU 因承担了过多的用户而导致拥塞, 而另外一些 RAU 却因用户数量较少而处于闲置, 无线资源的利用率较低, 系统的运行效率较差。利用覆盖控制算法对初始分布的 RAU 位置进行 100 次迭代运算后, RAU 位置收敛到如图 3 所示的分布。图中可以看到, RAUs 分布趋于合理, RAU 的覆盖范围也更趋于规则。在区域的中心位置, 用户较多, 因此分配给该区域的 RAU 数目也较多, 而对于区域边缘, 由于用户数较少, 因此分配的 RAU 数量也相对较少。这样, 即满足了中心区域用户的需要又可以保证处于边缘地带用户的通信, 使系统运行效率大大提高。

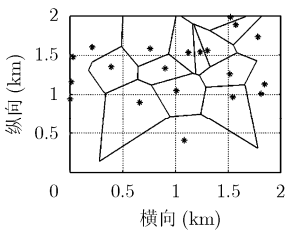


图 2 RAU 初始分布的 Voronoi 划分

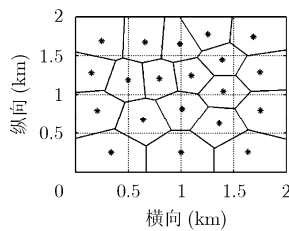


图 3 RAU 收敛分布的 Voronoi 划分

图 4 所示为初始分布与收敛分布下用户中断概率与用户数量的关系。图中三角线和方格线分别为初始 RAUs 分布和收敛分布条件下用户中断概率随用户数量的增加而变化的趋势。图 4 中可以看出, 当用户数量超过 10 时, 初始分布条件下的用户中断概率急剧增加, 产生这种趋势是由于用户进入系统时位置分布的不确定性, 使得个别 RAU 覆盖区域承担了过多的用户, 造成在该区域中的用户中断概率迅速上升。而这种趋势在用户数量越多时表现的越明显, 用户数量超过 30 时, 收敛分布的中断概率要优于初始分布一个数量级以上。用户中断概率还与 RAU 的数目有关。图 5 所示为 50 个用户在不同 RAU 分布条件下中断概率与 RAU 数目的

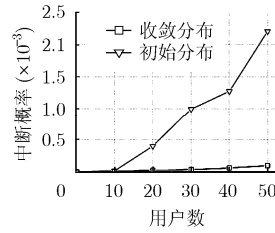


图 4 初始分布与收敛分布下用户中断概率与用户数量的关系

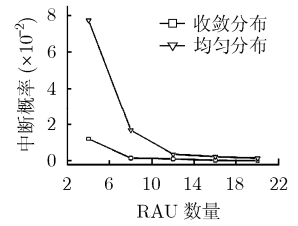


图 5 初始分布与收敛分布下用户中断概率与 RAU 数量的关系

关系。图 5 中可以看到, 收敛分布下的 Bunched 系统同样具有较大的优势。如果设系统中断概率门限值为 0.005, 则收敛分布条件下只需 7 个以上 RAUs 即可满足系统要求, 而对于初始分布的系统则需要 13 个以上的 RAUs。

收敛分布系统较初始分布系统的优势是明显的, 那么收敛分布与规则分布相比性能又是如何呢? 图 6 为一个服从规则分布的 16 RAUs 系统, 每个 RAU 覆盖区域大小相同, 位置固定。而图 7 所示为 16 RAUs 按收敛分布得到的结果。图 8 为两者在不同用户数量下中断概率的比较。图中可以看到, 收敛分布较规则分布至少要低 40%。

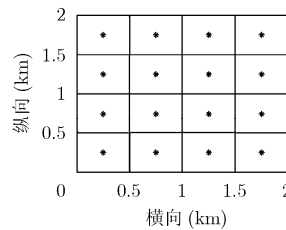


图 6 RAUs 规则分布的 Voronoi 划分

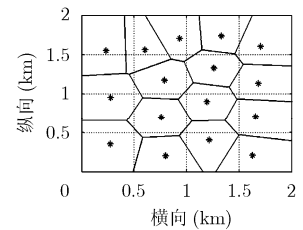


图 7 RAUs 收敛分布的 Voronoi 划分

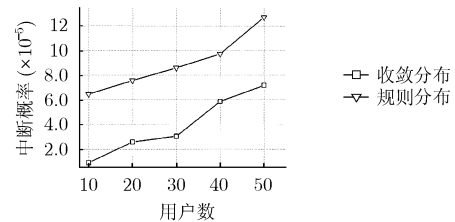


图 8 16 个 RAUs 在规则分布与收敛分布条件下用户数与中断概率的关系

4 结束语

文章对位置优化问题做了研究, 根据 CDMA 系统中断方程, 确定了依位置变化的系统目标函数。提出了一种基于梯度下降算法的 CDMA Bunched 系统的覆盖控制算法。该算法求得一组最佳 RAUs 位置点分布使得系统目标函数最小。计算机仿真结果表明, 经过优化的系统, 用户中断概率较天线单元均匀分步的系统低一个数量级, 较规则分布的系统低 40% 以上。在实际应用中, 用户密度还可能随时间变化的分布状态。例如, 在一个街区中, 上下班高峰期与平稳期

用户密度分布就存在着不同,这时不可能通过频繁变动 RAUs 的位置来实现系统性能的提升。这就需要有一套自适应的 RAUs 选择方案来适应分布的变化。RAUs 选择方案通过中心单元实现,在用户密度变化时,CU 根据覆盖控制算法自动的将部分 RAU 工作状态激活,使得所有处于激活状态的 RAUs 具有按照算法计算所得的位置分布。因此自适应 RAUs 选择算法是下一步需要研究的问题。

参 考 文 献

- [1] ETSI SMG Tdoc SMG2 UMTS D 9/97, Concept Group Delta Wideband TDMAICDMA, Evaluation Report-Part V0.2.
- [2] ITU-R WP8F, Draft New Report ITU-R M.[IMT.TRENDS] Technology trends, 27 October 2003: 25-31.
- [3] Venugopal V V and Sendonaris A. The coverage-capacity tradeoff in cellular CDMA systems [J]. *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, 1999, 48(5): 1443-1450.
- [4] Molina A, Nix A R, and Athanasiadou G E. Cellular network capacity planning using the combination algorithm for total optimization [C]. IEEE Vehicular Technology Conference, Tokyo, Japan, 2000: 2512-2516.
- [5] Cortes J, Martinez S, and Karatas T, *et al.* Coverage control for mobile sensing Networks [J]. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2003, 16(3): 791-803.
- [6] Du Q, Faber V, and Gunzburger M. Centroidal Voronoi tessellations: applications and algorithms [J]. *SIAM Review*, 1999, 41(4): 637-676.
- [7] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 108-121.
- Yuan Y X and Sun W Y. Optimization Theory and Method. Beijing: Science Publishing House, 1997: 108-121.
- 朱英勋: 男, 1978年生, 博士生, 目前的研究方向为ROF(光纤无线电)技术、OCDMA技术.
- 王 荣: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为光网络、集成光电子技术.
- 益晓新: 男, 1951年生, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为下一代无线网络.