

两跳中继 CDMA 蜂窝系统的上行链路容量分析

鲁蔚锋¹, 吴蒙²

(1. 南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003; 2. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 首先在两跳中继 CDMA 蜂窝系统的基础上, 提出了 2 种使用带外信道提高传统 CDMA 蜂窝系统上行链路容量的中继方法; 然后通过分析传统无中继 CDMA 蜂窝系统的干扰功率, 分别得到这 2 种中继方法对当前小区和邻居小区总的干扰功率; 最后在一种对称小区模型的基础上, 通过数值计算对两跳中继 CDMA 蜂窝系统的上行链路容量进行分析, 并讨论了 2 种中继方法对系统性能所产生的影响。

关键词: 码分多址; 两跳中继; 带外信道; 上行链路容量; 性能分析

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2010)09-0046-08

Uplink capacity analysis of two-hop-relay CDMA cellular systems

LU Wei-feng¹, WU Meng²

(1. College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Based on the two-hop-relay CDMA cellular systems, two kinds of out-of-band relaying methods were proposed to improve the conventional CDMA cellular systems. Then by analyzing the interference power of the non-relaying CDMA cellular systems, the overall interference power to own and neighbor cell could be obtained with using these two relaying methods. Finally, based on a symmetrical cell model, the uplink capacity of two-hop-relay CDMA cellular systems was analyzed by mathematical calculating, and the impact of these two relaying methods on system's performance was discussed.

Key words: CDMA; two-hop-relay; out-of-band; uplink capacity; performance analysis

1 引言

由于 CDMA 的灵活性和更高的性能优势, 它已经被作为 cdma2000 和 UMTS 系统的接入方法。在 CDMA 蜂窝系统中, 小区中所有用户在同一时间内使用相同的频率信道, 并且扩频机制被用于区分不同用户的信号。然而, 由于 CDMA 系统所用到的扩频码序列很难实现完全正交, 而且根据移动

通信信道因多径传播会引起时延扩展以及具有多普勒频移等特性, 可以说扩频序列之间根本不可能达到完全正交, 所以各用户的扩频信号之间必然存在一定的相关性, 这就是 CDMA 系统中存在多址干扰 (MAI, multiple access interference) 的根源。由于 CDMA 系统是一个干扰受限的系统, 因此 MAI 成为影响系统容量和性能提高的主要因素^[1]。一种直接增加系统容量的方法是增加更多的小区数量,

收稿日期: 2009-04-02; 修回日期: 2010-04-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目 (2011CB302903); 江苏省高校自然科学研究重点基金资助项目 (10KJA510035); 校引进人才科研启动基金资助项目 (NY208008)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2011CB302903); The Key University Science Research Project of Jiangsu Province (10KJA510035); The Priming Scientific Research Foundation for Introduced Talents in Universities (NY208008)

但是随着小区数量的增加,将会大大增加网络基础结构的开销。因此,需要寻找其他具有较低开销和复杂性的增强技术。许多技术已经被提出通过消除小区内干扰来增加系统的上行链路容量,例如多用户检测、波束形成和小区扇区化等技术^[2]。但是所有这些技术的一个主要限制因素是小区间干扰^[3]。在典型的蜂窝系统中,基站处的小区间干扰数值为小区内干扰的 50%到 100%。

目前已经有许多研究组织考虑在无线网络中使用多跳中继的方法来提高传统蜂窝网络的性能^[4]。与传统蜂窝网络的一跳传输相比,多跳传输所获得的容量增益来自于采用多跳中继后数据传输中路径损耗的减少。由于在小区边缘的活动用户将会对邻居小区产生很大的干扰,采用多跳中继结构可以减小传统 CDMA 蜂窝系统所需的高功率信号强度,因此降低了其他小区中相邻信道的 MAI,从而增加了系统的容量^[5]。然而,为了在不同的跳上传输数据,多跳蜂窝网络需要更多的无线资源。在文献[6]所提出的中继方法中,在一条路由路径上的不同跳之间以 TDD 模式共享着无线信道资源,可以认为这是一种带内信道中继的方法。目前已经有文献[7,8]对这种使用带内信道中继方法的多跳蜂窝网络进行了性能分析,分析结果表明在 CDMA 蜂窝系统中使用带内信道中继方法所提高的性能增益是受到限制的。为了提供无处不在的无线业务,并在不同的频段上与不同的无线系统进行通信,未来的移动站可能将会配置多个无线接口。例如,移动节点可能具有 2 个接口,一个用于 3G 蜂窝网络,另一个用于 IEEE 802.11 网络。当移动站经历较差的信道环境时,它的数据可以通过使用高速率的 WiFi 接口与其他可以提供中继的移动站进行转发,这种实现方式被称为带外信道中继的方法^[9]。文献[10]使用计算机仿真表明:当多跳中继 CDMA 蜂窝系统使用带外信道中继的方法时,即使在两跳中继的方式下与传统 CDMA 蜂窝系统相比,也可以在系统容量方面获得较大的性能增益。

与文献[10]相似,本文在传统 CDMA 蜂窝系统中采用两跳中继和带外信道的方式来提高系统的容量。此外,与文献[11]中所分析可变数据速率两跳中继 CDMA 蜂窝系统的下行链路容量相比,本文主要分析固定数据速率两跳中继 CDMA 蜂窝系统的上行链路容量。本文在使用带外信道进行流量中继的情况下,提出了 2 种可以提高 CDMA 蜂窝

系统上行链路容量的中继方法,并分别得到了这 2 种方法对当前小区和邻居小区总的干扰功率。为了方便计算上行链路容量的闭合形式解,介绍了一种两跳中继 CDMA 蜂窝系统的小区系统模型,并分别得到了不同情况下各个小区中 CDMA 上行链路容量的计算公式。最后通过数值计算对两跳中继 CDMA 蜂窝系统的上行链路容量进行分析,并讨论了 2 种中继方法对系统性能所产生的影响。

2 2 种提高 CDMA 系统上行链路容量的中继方法

在本节中将提出 2 种提高 CDMA 蜂窝系统上行链路容量的中继方法:中继流量到邻居小区和中继流量到当前小区。其中,中继流量到邻居小区的方法是指将小区边缘地区的用户流量通过两跳中继的方式转移到邻居小区中。而中继流量到当前小区的方法是指将小区边缘地区的用户流量通过两跳中继的方式转移到当前小区中离基站距离更近的地区中。提出设计这 2 种中继方法的主要思想是根据部分用户在小区中所处的位置,使它们通过两跳中继的方式与当前或邻居小区中的基站进行通信。在所提出的 2 种中继方法中都使用了带外信道的中继方式,系统中每个移动站 (MS, mobile station) 有 2 个无线接口,分别为蜂窝接口和 ad hoc 接口。当 MS 通过蜂窝接口与基站 (BS, base station) 通信时,使用传统的蜂窝网频段。而通过 ad hoc 接口与中继站 (RS, relay station) 通信时,则使用与蜂窝网不同的频段。下面分别将上述 MS 或 RS 与 BS, 以及 MS 与 RS 之间的通信链路称为蜂窝链路和中继链路。此外,假设中继链路的容量要远远高于蜂窝链路,因此两跳中继蜂窝网络的容量仅受到蜂窝接口干扰的限制。所以在本文中所分析的干扰功率是以蜂窝链路之间干扰为基础,而忽略中继链路之间的干扰。

为了便于分析,将使用具有圆形小区的 CDMA 蜂窝系统模型来代替常用的六边形小区模型^[12]。假设 R_b 为圆形小区的半径, R_c 为六边形小区的半径。图 1 给出了在无中继方式下,基站所接收到干扰功率的圆形小区模型。从图中可以看出,一个 MS 位于极坐标为 (r_1, θ) 的点 N 处,其中,它所在小区 b 的中心为坐标原点 O 。由此可以得到它与邻居小区 c 中心的距离 r_0 为: $r_0 = \sqrt{3R_c^2 + r_1^2 - 2\sqrt{3}R_c r_1 \cos \theta}$ 。假设系统中的用户在每个小区覆盖范围中均匀分布,但是每个小区具有不同的用户数量,例如 K_c 表示为 BS_c 所在小

区的用户数量。并且假设系统中不同小区的基站需要不同的接收功率，例如 P_c 表示为 BS_c 的接收功率。

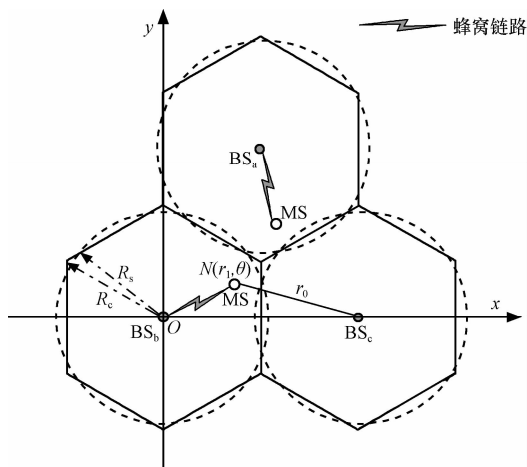


图 1 无中继方式下干扰功率的圆形小区模型

只进行第 1 层干扰小区所引起的“小区外部干扰”计算，并且忽略快速和阴影衰落的影响，则可以获得对小区 c 的外部干扰功率 I_{inter_cell} 。

$$I_{inter_cell} = \sum_{b \in N_c} \frac{K_b P_b}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta \quad (1)$$

其中， $b \in N_c$ 表示小区 b 为小区 c 的邻居小区， n 是衰减指数。此外，小区 c 的内部干扰功率 I_{intra_cell} 为小区内部的 $K_c - 1$ 个用户的干扰。

$$I_{intra_cell} = (K_c - 1)P_c \quad (2)$$

根据上述公式，可以获得小区 c 总的干扰功率 I_{total_cell} 为

$$I_{total_cell} = (K_c - 1)P_c + \sum_{b \in N_c} \frac{K_b P_b}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta \quad (3)$$

2.1 中继流量到邻居小区的方法

图 2 给出的是在中继流量到邻居小区的方法下，基站所接收到干扰功率的圆形小区模型。在小区 c 中，可以通过使用两跳中继的方式将它位于小区边缘的用户转移到邻居小区中，例如图 2 中的邻居小区 a 和 b 。小区 c 中的 MS 可以通过中继链路与邻居小区中的 RS 进行通信， RS 继而使用蜂窝链路与本小区中 BS 进行通信。假设在小区 c 中，可以直接使用蜂窝链路与基站进行通信的 MS 所覆盖范围是以 BS_c 为中心， R_1 为半径的圆。那么位于内径为 R_1 ，外径为 R_s 圆环区域中的 MS 可以通过中继方式与邻居小区中的 BS 进行通信。

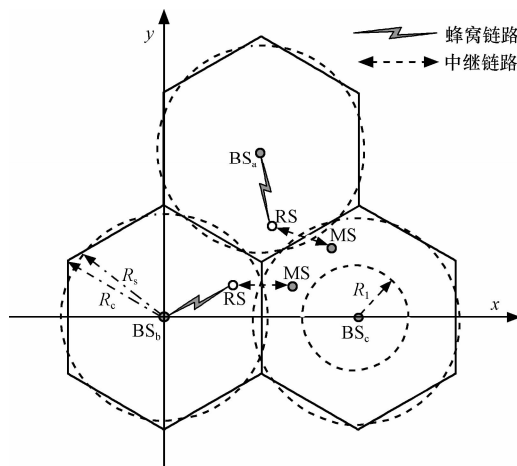


图 2 中继流量到邻居小区方法下干扰功率的圆形小区模型

首先，计算使用第 1 种中继方法下小区 c 总的干扰功率 $I_{total_cell_c}^{relay_1}$ 。在小区 c 中与基站直接通信用户的内部干扰功率为 $I_{intra_cell_c}^{relay_1}$ ，它是在小区 c 中半径为 R_1 的圆所覆盖范围下其他用户的干扰。

$$I_{intra_cell_c}^{relay_1} = \left(\frac{K_c}{\pi R_s^2} \pi R_1^2 - 1\right) P_c \quad (4)$$

假设邻居小区中的 RS 是均匀分布的，并且在小区 c 中可以使用中继的每个 MS 和邻居小区中的 RS 是一一对应的。则小区 c 的外部干扰功率 $I_{inter_cell_c}^{relay_1}$ 为

$$I_{inter_cell_c}^{relay_1} = \sum_{b \in N_c} \frac{K_b P_b}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta + \sum_{b \in N_c} \frac{K_b P_b}{\pi R_s^2} \int_{R_1}^{R_s} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta \quad (5)$$

其中，式 (5) 右边的第 1 项为小区 c 的邻居小区中原有用户对它的干扰。第 2 项为邻居小区中与用于提供中继功能的 RS 通信的用户对小区 c 用户的干扰。根据式 (4) 和式 (5)，可以获得小区 c 总的干扰功率 $I_{total_cell_c}^{relay_1}$ 为

$$I_{total_cell_c}^{relay_1} = \left(\frac{K_c}{\pi R_s^2} \cdot \pi R_1^2 - 1\right) P_c + \sum_{b \in N_c} \frac{K_b P_b}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta + \sum_{b \in N_c} \frac{K_b P_b}{\pi R_s^2} \int_{R_1}^{R_s} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta \quad (6)$$

其次，计算使用第 1 种中继方法下邻居小区 b 总的干扰功率 $I_{total_cell_b}^{relay_1}$ 。由于在小区 c 中使用两跳

中继方式将部分用户流量转移到邻居小区 b 中，所以小区 b 内部干扰功率除了自身小区中其他用户的干扰以外，还增加了用于提供中继功能的 RS 所在用户的干扰。所以可以获得小区 b 的内部干扰功率 $I_{intra_cell_b}^{relay_1}$ 为

$$I_{intra_cell_b}^{relay_1} = (K_b - 1)P_b + \frac{K_c}{6\pi R_s^2} (\pi R_s^2 - \pi R_1^2) P_b \quad (7)$$

小区 b 的外部干扰功率 $I_{inter_cell_b}^{relay_1}$ 为

$$I_{inter_cell_b}^{relay_1} = \sum_{a \in N_b, a \neq c} \frac{K_a P_a}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^n r_1 dr_1 d\theta + \frac{K_c P_c}{\pi R_s^2} \int_0^{R_1} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^n r_1 dr_1 d\theta + \sum_{a \in N_b, a \in N_c, a \neq c} \frac{K_a P_a}{\pi R_s^2} \int_{R_1}^{R_s} \int_{-\pi/2}^{\pi/6} \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^n r_1 dr_1 d\theta \quad (8)$$

其中，式 (8) 右边的前 2 项为小区 b 的邻居小区中原有用户对它的干扰。其中，第 2 项为在使用中继方式的邻居小区 c 中，半径为 R_1 的圆覆盖范围下用户对小区 b 用户的干扰。第 3 项为小区 b 的邻居小区 a 中用于提供中继功能的 RS 所在用户对小区 b 中用户的干扰。根据式 (7) 和式 (8) 可以获得小区 b 总的干扰功率 $I_{total_cell_b}^{relay_1}$ 为

$$I_{total_cell_b}^{relay_1} = (K_b - 1)P_b + \frac{K_c}{6\pi R_s^2} (\pi R_s^2 - \pi R_1^2) P_b + \sum_{a \in N_b, a \neq c} \frac{K_a P_a}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^n r_1 dr_1 d\theta + \frac{K_c P_c}{\pi R_s^2} \int_0^{R_1} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^n r_1 dr_1 d\theta + \sum_{a \in N_b, a \in N_c, a \neq c} \frac{K_a P_a}{\pi R_s^2} \int_{R_1}^{R_s} \int_{-\pi/2}^{\pi/6} \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^n r_1 dr_1 d\theta \quad (9)$$

2.2 中继流量到当前小区的方法

图 3 给出在中继流量到当前小区的方法下，基站处所接收到干扰功率的圆形小区模型。在小区 c 中使用了两跳中继的方式将它位于小区边缘的用户中继到离本小区基站更近的位置。小区 c 中的 MS 可以通过中继链路与当前小区中的 RS 进行通信， RS 继而使用蜂窝链路与本小区中 BS 进行通信。从图中可以看出小区 c 中被划分为 3 个区域，分别为：以 BS 为中心，半径为 R_2 的圆所包含的区域为小区中 MS 直接与 BS_c 进行通信的范围；内径为 R_2 ，外

径为 R_3 的圆环区域为 MS 可以使用两跳中继与 BS_c 间接通信的范围；内径为 R_3 ，外径为 R_s 的圆环区域为 MS 无法使用两跳中继与 BS_c 间接通信的范围。

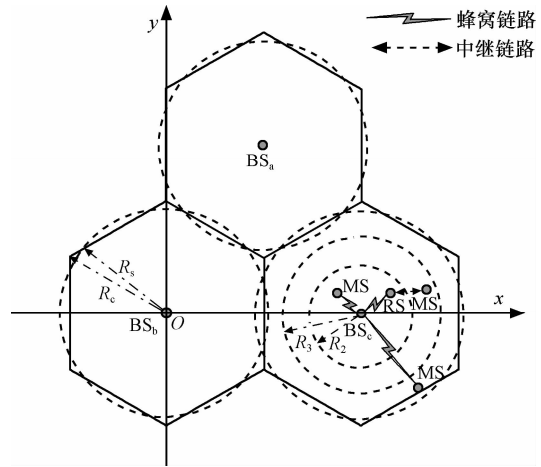


图 3 中继流量到当前小区方法下干扰功率的圆形小区模型

首先计算使用第 2 种中继方法下小区 c 总的干扰功率 $I_{total_cell_c}^{relay_2}$ 。在小区 c 中与基站直接通信用户的内部干扰功率为 $I_{intra_cell_c}^{relay_2}$ ，它是小区 c 覆盖范围下其他用户的干扰，表示为

$$I_{intra_cell_c}^{relay_2} = (K_c - 1)P_c \quad (10)$$

和无中继方式下外部干扰功率计算一样，小区 c 的外部干扰功率 $I_{inter_cell_c}^{relay_2}$ 为

$$I_{inter_cell_c}^{relay_2} = \sum_{b \in N_c} \frac{K_b P_b}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^n r_1 dr_1 d\theta \quad (11)$$

根据式 (10) 和式 (11)，可以获得小区 c 总的干扰功率 $I_{total_cell_c}^{relay_2}$ 为

$$I_{total_cell_c}^{relay_2} = (K_c - 1)P_c + \sum_{b \in N_c} \frac{K_b P_b}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^n r_1 dr_1 d\theta \quad (12)$$

其次，计算使用第 2 种中继方法下邻居小区 b 总的干扰功率 $I_{total_cell_b}^{relay_2}$ 。由于小区 b 内部干扰功率为自身小区中其他用户的干扰，所以可以获得小区 b 的内部干扰功率 $I_{intra_cell_b}^{relay_1}$ 为

$$I_{intra_cell_b}^{relay_2} = (K_b - 1)P_b \quad (13)$$

由于在小区 c 中使用两跳中继方式将部分小区边缘的用户流量转移到靠近 BS_c 附近的区域，所以小区 c 中可以使用中继方式的用户对小区 b 的干扰变成了提供中继功能的 RS 所在用户的干扰。此外

小区 b 的外部干扰还包括小区 c 中直接和 BS_c 通信用户的干扰, 以及小区 b 其他没有使用中继功能邻居小区中用户的干扰。所以小区 b 的外部干扰功率 $I_{inter_cell_b}^{relay_2}$ 为

$$I_{inter_cell_b}^{relay_2} = \sum_{a \in N_b, a \neq c} \frac{K_a P_a}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta + \frac{K_c P_c}{\pi R_s^2} \left(\int_0^{R_2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta + \frac{\pi R_3^2 - \pi R_2^2}{\pi R_2^2 - \pi(2R_2 - R_3)^2} \cdot \int_{2R_2 - R_3}^{R_2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta + \int_{R_3}^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta \right) \quad (14)$$

其中, 式 (14) 右边的第 1 项为没有使用中继功能的邻居小区中用户对小区 b 的干扰, 第 2 项为使用了中继功能的小区 c 中的用户对它的干扰。根据式 (13) 和式 (14) 可以获得小区 b 总的干扰功率 $I_{total_cell_b}^{relay_2}$ 为

$$I_{total_cell_b}^{relay_2} = (K_b - 1)P_b + \sum_{a \in N_b, a \neq c} \frac{K_a P_a}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta + \frac{K_c P_c}{\pi R_s^2} \left(\int_0^{R_2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta + \frac{\pi R_3^2 - \pi R_2^2}{\pi R_2^2 - \pi(2R_2 - R_3)^2} \cdot \int_{2R_2 - R_3}^{R_2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta + \int_{R_3}^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta \right) \quad (15)$$

3 两跳中继 CDMA 蜂窝系统上行链路容量的小区模型

由于在不对称情况下, 很难求得 CDMA 上行链路容量的闭合形式解^[13]。所以考虑在一个对称的 7 小区 CDMA 蜂窝系统下, 计算使用中继功能系统可以获得的上行链路容量。这里将上行链路容量表示为系统中小区可以容纳的用户数量。图 4 给出了两跳中继 CDMA 上行链路容量的小区模型。小区 0 为使用了两跳中继功能的小区, 在它覆盖的范围内均匀分布着 K_0 个移动用户。而在以小区 0 为中心的第 1 层邻居小区 (小区 1 到 6) 中没有使用中继的功能, 并且在每个邻居小区中均匀分布着 K_1 个移动用户。为方便计算, 假设不考虑在第 2 层以外的小区对这个 7 小区系统所带来干扰的影响。假设在上行链路方向, 使用中继功能的小区 0 所在基站接收功率为 P_0 。而由于对称性, 没有使用中继功能的其他小区所在基站接收功率为 $P_b = P_1$, 其中, $b =$

2, ..., 6。根据上节的分析过程, 在忽略快速和阴影衰落影响的情况下, 可以获得对称小区模型下的各个小区总的干扰功率。

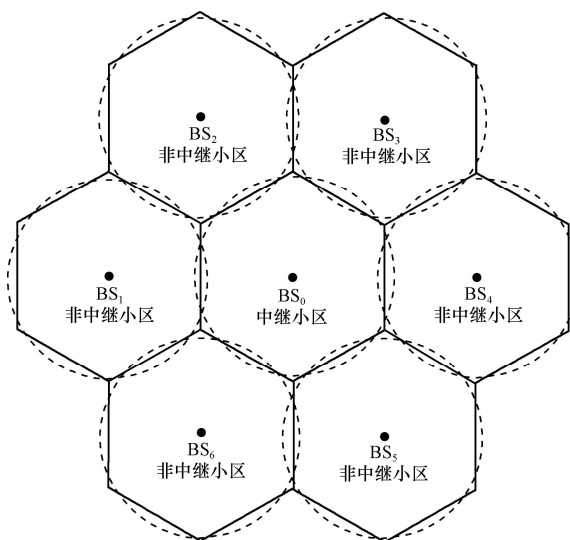


图 4 两跳中继 CDMA 上行链路容量的小区模型

1) 当系统不具有中继功能时, 小区 0 和小区 1 总的干扰功率 I_a 和 I_b 分别为

$$I_a = (K_0 - 1)P_0 + \frac{6K_1 P_1}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta \quad (16)$$

$$I_b = \left(K_1 - 1 + \frac{2K_1}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta \right) \cdot \left(P_1 + \frac{K_0 P_0}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta \right) \quad (17)$$

2) 当系统具有中继功能, 并采用第 1 种中继方法时, 小区 0 和小区 1 总的干扰功率 I_a 和 I_b 分别为

$$I_a = \left(\frac{6K_1}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta + \frac{6K_0}{\pi R_s^2} \int_{R_1}^{R_s} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta \right) P_1 + \left(\frac{K_0}{\pi R_s^2} \pi R_1^2 - 1 \right) P_0 \quad (18)$$

$$I_b = \left(K_1 - 1 + \frac{K_0}{6\pi R_s^2} (\pi R_s^2 - \pi R_1^2) + \frac{2K_1}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta + \frac{2K_0}{\pi R_s^2} \int_{R_1}^{R_s} \int_{-\pi/2}^{\pi/6} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta \right) P_1 + \frac{K_0 P_0}{\pi R_s^2} \int_0^{R_1} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta \quad (19)$$

3) 当系统具有中继功能, 并采用第 2 种中继方法时, 小区 0 和小区 1 总的干扰功率 I_a 和 I_b 分别为

$$I_a = (K_0 - 1)P_0 + \frac{6K_1P_1}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta \quad (20)$$

$$I_b = \left(K_1 - 1 + \frac{2K_1}{\pi R_s^2} \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta \right) P_1 + \frac{K_0 P_0}{\pi R_s^2} \left(\int_0^{R_2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta + \frac{\pi R_3^2 - \pi R_2^2}{\pi R_2^2 - \pi(2R_2 - R_3)^2} \cdot \int_{2R_2 - R_3}^{R_2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta + \int_{R_3}^{R_s} \int_0^{2\pi} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^n r_1 dr_1 d\theta \right) \quad (21)$$

由于宽带编码 CDMA 信号的带宽值 $W = 1/R$, 其中, R 是信息比特率, 干扰的功率谱密度 I_0 可以用干扰功率除以频谱带宽得到, 即 I_a/W 或 I_b/W . 接收信号比特能量 E_b 为 P_0/R 或 P_1/R . 由此可以获得信号比特能量与干扰频谱密度之比 E_b/I_0 为

$$\frac{E_b}{I_0} = \frac{P_0/R}{I_a/W} = \frac{P_1/R}{I_b/W} \quad (22)$$

将式 (16) ~ 式 (21) 所获得的各个小区的干扰功率代入式 (22), 通过公式变换便可以获得小区 0 和小区 1 的 CDMA 上行链路容量 K_0 和 K_1 .

4 容量分析

本节将考虑在 7 小区模型基础上, 通过数值方法对两跳中继 CDMA 蜂窝系统的上行链路容量进行分析. 在小区模型中假设小区 0 为拥塞小区, 而它的邻居小区为非拥塞小区. 这种类型的流量模型对应着在某个城市地区存在着一个流量密度较大的热点小区, 并且流量密度随着与小区中心距离的增加而逐渐下降. 假设系统只考虑距离相关的路径损耗模型, 其中, 衰减指数 $n=4$. 系统的传输带宽 $W=5\text{MHz}$, 每个连接的传输信息比特率 $R=64\text{kb/s}$, 并且系统所需求的 $E_b/I_0=5$ (或 7dB). 此外, 当系统采用第 2 种中继方法时, 假设 $R_2=0.5R_s$.

图 5 给出了在第 1 种中继方法中, 小区 0 中可容纳的 K_0 与 R_1/R_s 之间的关系, 其中, R_1/R_s 为已经标准化的无法获得中继辅助范围的半径. 从图中可以看出当邻居小区中的 K_1 较小时, 随着 R_1/R_s 的增加, K_0 将逐渐下降. 这是由于当 K_1 较小时, 在小区 0 中可以通过中继的方式将更多的流量转移到邻居小区中. 其中, 当 $R_1/R_s=1.0$ 时, 为传统无中继

CDMA 蜂窝系统的情况. 这时小区 0 中的用户流量将无法中继转移到邻居小区中, 所以系统获得了最低的 K_0 . 当 K_1 较大时, 如当 $K_1=12$ 时, K_0 刚开始随着 R_1/R_s 的增加而逐渐增加, 当 R_1/R_s 增加到 0.7 时, K_0 达到最大值. 随后 K_0 将随着 R_1/R_s 的增加而逐渐减小. 这是由于当 R_1/R_s 较小时, 小区 0 可以转移更多的用户流量到邻居小区中. 但是由于这时邻居小区中的用户数量已经较大, 所以转移到邻居小区的流量将会对小区 0 产生较大的外部干扰功率. 随着 R_1/R_s 的增加, 虽然从小区 0 转移到邻居小区中的用户数量逐渐减少, 但是邻居小区对小区 0 所产生的外部干扰功率也将会减少, 所以 K_0 将会逐渐增加. 当 R_1/R_s 增加到 0.7 后, 虽然小区 0 中可以转移到邻居小区的流量将越来越小, 但是所产生的小区外部干扰功率要大于转移流量所产生的内部干扰功率, 所以将会导致 K_0 逐渐减少. 最后当 K_1 很大时, 如当 $K_1=14$ 时, K_0 将随着 R_1/R_s 的增加而逐渐增加. 这是由于当 K_1 很大时, 邻居小区所产生的小区外部干扰功率也将会很大. 但是随着 R_1/R_s 的增加, 小区 0 中可以转移的流量将逐渐减少, 所产生的小区外部干扰功率也将会逐渐减少, 从而增加了 K_0 的大小.

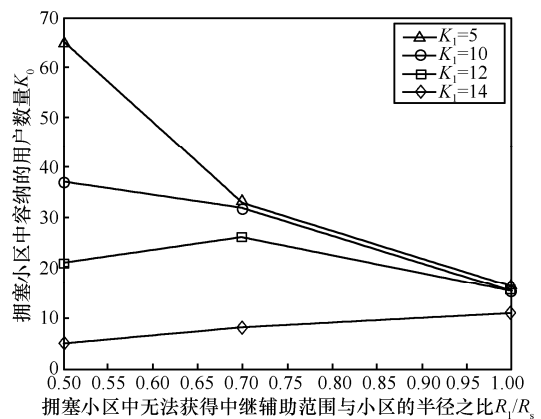


图 5 第 1 种中继方法中 K_0 与 R_1/R_s 的关系

图 6 给出了在第 1 种中继方法中, 小区 0 中可容纳的 K_0 与邻居小区中 K_1 之间的关系. 其中 $R_1=1.0$, R_s 所描述的曲线为传统无中继 CDMA 蜂窝系统的情况. 从图中可以看出, K_0 随着 K_1 的增加而逐渐减小. 这是由于当 K_1 越大时, 在邻居小区中所产生的外部干扰功率对 K_0 的影响程度越大. 当 $R_1/R_s=0.5$ 时, 在 K_1 较小的情况下小区 0 可以获得最大的 K_0 . 但是当 K_1 增加到 11 时, 系统所获得的 K_0 将小于 $R_1/R_s=0.7$ 情况下的数值大小. 这是因为

虽然具有较小 R_1 的小区 0 可以将更多的流量转移到邻居小区中,但是当 K_1 增加到某个特定数值时,邻居小区对小区 0 的外部干扰将成为影响 K_0 的主要部分。同样当 K_1 增加到 13 时,系统所获得的 K_0 将小于 $R_1/R_s=1.0$ 情况下的数值大小。当 $R_1/R_s=0.7$ 时,在 K_1 较小的情况下 K_0 的曲线变化比较平稳。这是因为小区 0 中可以转移到邻居小区中的流量较小,所以邻居小区对小区 0 产生的外部干扰功率也相对较小。当 K_1 增加到 11 以后,随着邻居小区所产生外部干扰功率的增大,导致 K_0 下降的幅度也将会增大。从图中可以看出当 K_1 较小时,使用中继方式的小区 0 可以容纳比无中继情况下更多的 K_0 。但是当 K_1 较大时,这种性能上的优势已经不明显了。随着 K_1 的进一步增加,当邻居小区已经处于拥塞状态时,使用中继方式的小区 0 所获得的容量甚至要小于传统 CDMA 蜂窝系统时的情况。所以在 K_1 较小的情况下,随着 R_1/R_s 的减小,系统获得小区 0 上行链路容量增加的效果将会更加明显。

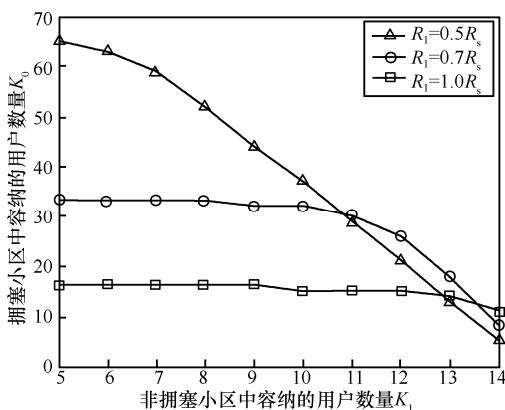


图 6 第 1 种中继方法中 K_0 与 K_1 的关系

图 7 给出了在第 2 种中继方法中,小区 0 中可容纳的 K_0 与 R_3/R_s 之间的关系,其中, R_3/R_s 为已经标准化的可以获得中继辅助范围的半径。当 $R_3/R_s=0.5$ 时,为传统无中继 CDMA 蜂窝系统的情况。随着 R_3/R_s 的增加,小区 0 中可以转移的流量将逐渐增加。从图中可以看出,当 K_1 较小时,如当 $K_1=5$,随着 R_3/R_s 的增加, K_0 将保持不变。这是由于当 K_1 较小时,邻居小区对小区 0 所产生的外部干扰功率很小,因此 R_3/R_s 的增加不会对小区 0 上行链路的容量产生影响。当 K_1 较大时,如当 $K_1=10$,随着 R_3/R_s 的增加, K_0 一开始保持不变。当 R_3/R_s 继续增加时, K_0 将会逐渐增加。这是因为当邻居小区的负载较大时,较小的 R_3/R_s 对应着较小的流量

转移,所以邻居小区对小区 0 所产生的外部干扰功率变化不大。但当 R_3/R_s 继续增加时,由于在小区 0 中进行中继转移的流量将逐渐增大,因此所产生的外部干扰功率将会逐渐减少。当 K_1 很大时,例如当 $K_1=14$,随着 R_3/R_s 的增加, K_0 将逐渐增加。从图中可以看出,代表 K_0 的曲线随 R_3/R_s 增加而上升的幅度最大。这是由于当邻居小区已经处于拥塞状态时,随着 R_3/R_s 的增加,系统使用中继功能而减少小区 0 外部干扰功率的作用将会更加明显,从而可以有效提高小区 0 的上行链路容量。

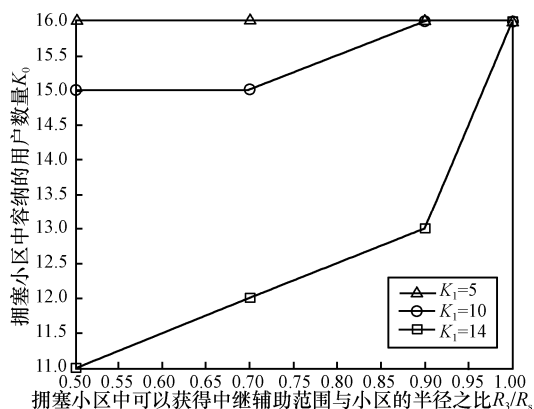


图 7 第 2 种中继方法中 K_0 与 R_3/R_s 的关系

图 8 给出了在第 2 种中继方法中,小区 0 中可容纳的 K_0 与邻居小区中 K_1 之间的关系。从图中可以看出,当 $R_3/R_s=1$ 时, K_0 随着 K_1 的增加而保持不变。这说明即使在 K_1 很大的情况下,使用中继功能的小区 0 也可以容纳很大的 K_0 。但是当 $R_3/R_s < 1$ 时, K_0 随着 K_1 的增加而减少。这是因为对于较小 R_3/R_s 而言,在小区 0 中可以通过中继转移的流量将会减少。所以随着 K_1 的增加,邻居小区对小区 0 产生的外部干扰功率作用更加明显。同时从图中可以看出

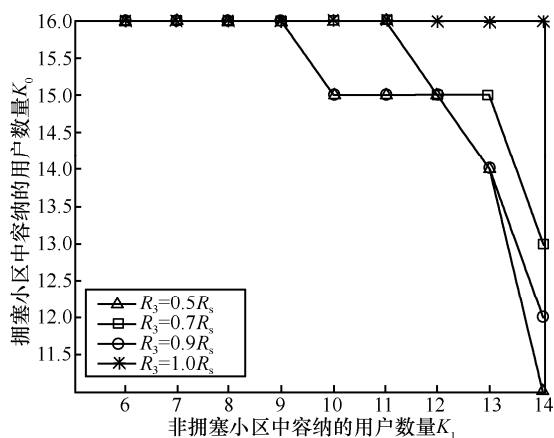


图 8 第 2 种中继方法中 K_0 与 K_1 的关系

随着 R_3/R_s 的逐渐减小, 代表 K_0 曲线下落的斜率将逐渐增大。这是由于 R_3/R_s 越小, 邻居小区对小区 0 所产生的外部干扰功率越大, 特别是在 K_1 很大的情况下。其中, 当 $R_3/R_s=0.5$ 时, 小区 0 可以容纳的 K_0 最少, 这对应着传统无中继 CDMA 蜂窝系统的情况。所以在 K_1 很大的情况下, 随着 R_3/R_s 的增加, 通过中继方式增加小区 0 上行链路容量的效果会更明显。

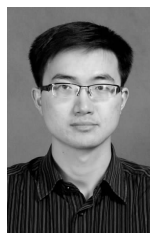
5 结束语

本文在一种两跳中继 CDMA 蜂窝系统结构的基础上, 提出了 2 种使用带外信道的中继方法来减少系统产生的小区间干扰, 从而有效提高系统的上行链路容量。其中, 第 1 种中继方法是通过两跳中继方式将小区边缘的用户流量转移到邻居小区中。而第 2 种中继方法的系统是通过两跳中继方式将小区边缘的用户流量转移到当前小区中离基站较近的区域。通过分析可知: 第 1 种中继方法适用于邻居小区负载较低, 而当前小区处于拥塞状态时的情况。第 2 种中继方法适用于邻居小区负载较高, 而当前小区处于任何状态时的情况。此外, 在第 2 种中继方法中, 系统所增加的上行链路容量将最终受到没有小区间干扰情况下单个小区容量的限制。下一步工作将研究两跳方式下同时使用这 2 种中继方法时对系统性能的影响, 并对这种集成系统的下行链路容量增益情况进行分析。

参考文献:

- [1] GILHOUSEN K S, JACOBS I M, PADOVANI R. On the capacity of a cellular CDMA system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1991,40(2):303-312.
- [2] RAPPAPORT T S. Wireless Communications, Principles and Practice[M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2nd ed, 2002.
- [3] VITERBI A J, VITERBI A M, GILHOUSEN K S. Soft handoff extends CDMA cell coverage and increases reverse link capacity[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1994, 12(8): 128-1288.
- [4] LE L, HOSSAIN E. Multihop cellular networks: potential gains, research challenges, and a resource allocation framework[J]. IEEE Magazine on Communications, 2007, 45(9): 66-73.
- [5] NOURIZADEH H, TAFAZOLLI R. Capacity improvement of WCDMA cellular systems through different relaying strategies[A]. MWCN 2005[C]. Marrakech, Morocco, 2005. 121-127.
- [6] ROUSE T, MCLAUGHLIN S, BAND I. Congestion-based routing strategies in multihop TDD-CDMA networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(5): 668-681.
- [7] ZADEH A N, JABBARI B. Analysis and modeling of upstream throughput in multihop packet CDMA cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(4): 680-692.
- [8] RADWAN A, HASSANEIN H S. Capacity enhancement in CDMA cellular networks using multi-hop communication[A]. Proceedings of the 11th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2006)[C]. 2006. 832- 837.
- [9] WEI H Y, GITLIN R D. WWAN/WLAN two-hop-relay architecture for capacity enhancement[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2004)[C]. 2004. 225 -230.
- [10] ZHAO D, TODD T D. Cellular CDMA capacity with out-of-band multihop relaying[J]. IEEE transactions on mobile computing, 2006, 5(2): 170-178.
- [11] WEI H Y, GITLIN R D. Two-hop-relay architecture for next-generation WWAN/WLAN integration[J]. IEEE Magazine on Wireless Communications, 2004,11(2): 24-30.
- [12] KWOK M S, WANG H S. Adjacent cell interference analysis of reverse-link in CDMA cellular radio systems[A]. Proceedings of the Sixth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 1995)[C]. 1995, 11(2):446-450.
- [13] TODD T D, ZHAO D. Cellular CDMA capacity in hotspots with limited ad hoc relaying[A]. Proceedings of the 14th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2003)[C]. 2003. 2828-2832.

作者简介:



鲁蔚锋 (1979-), 男, 安徽马鞍山人, 南京邮电大学讲师, 主要研究方向为无线通信和信息安全。



吴蒙 (1963-), 男, 上海人, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信、信息安全及 DSP 技术。