

两跳中继 WCDMA 蜂窝系统的性能分析

鲁蔚锋 吴蒙

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

摘要: 该文首先介绍了一种两跳中继 WCDMA 蜂窝系统结构,建立了系统的解析模型。然后在这个模型的基础上,分别得到了系统的平均下行传输速率和数据包呼叫请求阻塞概率。最后通过数值计算分析了各种系统参数对两跳中继 WCDMA 蜂窝系统性能的影响,并和传统非中继 WCDMA 蜂窝系统以及具有拥塞控制功能的两跳中继 WCDMA 蜂窝系统进行了比较。

关键词: 两跳中继; 宽带码分多址; 蜂窝系统; 拥塞控制

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)11-2552-04

Performance Analysis of Two-Hop-Relay WCDMA Cellular Systems

Lu Wei-feng Wu Meng

(Communication and Information Engineering Institute, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: This paper firstly introduces a new architecture of two-hop-relay WCDMA cellular system, and builds the analytical model of this system. Then based on this model, the average downlink transmission rate and the call blocking probability of packets of the system are obtained respectively. Finally, through numerical calculation, the impact of the various parameters on the performance of the two-hop-relay WCDMA cellular systems is analyzed, and the system's performance is compared with the traditional WCDMA cellular systems without relaying and the two-hop-relay WCDMA cellular systems with congestion control.

Key words: Two-hop-relay; WCDMA; Cellular systems; Congestion control

1 引言

通用移动通信系统(UMTS)^[1]可以为用户提供不同数据传输速率的业务,移动节点可以通过使用宽带码分多址(WCDMA)无线接入技术与基站进行通信。在 WCDMA 蜂窝系统中,为了保证不同用户物理信道之间的正交性,正交可变扩频因子(OVSF)码被分配给不同用户物理信道用于数据的传输^[2]。文献[3]根据移动节点和基站之间可以传输的最大比特率,将小区划分为不同传输速率覆盖的地区。由于处于低速率覆盖地区的移动节点只能支持相对较低的传输速率,从而降低整个 WCDMA 系统的平均传输速率。

一个有效提高系统传输速率的方法是在 WCDMA 蜂窝系统中引入中继转发的功能^[4]。ODMA(Opportunity Driven Multiple Access)^[5]是在第三代移动通信系统中引入自组织网络的一种尝试,它通过无线多跳中继将蜂窝系统的高速率覆盖扩展到小区边界,从而减少传输功率和共信道干扰,增加系统容量并提高小区边界无线传输的有效性。文献[6]中提

出了 UCAN(Unified Cellular and Ad hoc Network Architecture)的混合网络结构。UCAN 的基本目标是当在基站和移动节点之间的下行链路信号质量变差时,通过使用多跳路由来提高系统的吞吐量。和文献[6]相似,文献[7]提出了 iCAR(Integrated Cellular and Ad hoc Relaying Systems)的体系结构,它是将蜂窝体系和 Ad hoc 中继技术集成来动态平衡负载的有效方式。和上述相关工作不同,两跳中继 WCDMA 蜂窝系统不仅利用中继方式提高当前小区平均下行数据传输速率,并且通过将当前小区的呼叫请求中继到邻居小区,以降低当前小区的阻塞概率。本文首先介绍了两跳中继 WCDMA 蜂窝系统的结构。然后建立了它的解析模型,并在模型基础上,得到了系统的各种性能指标。最后通过数值计算分析了两跳中继 WCDMA 蜂窝系统的性能,并讨论了不同参数对这种系统性能所产生的影响。

2 两跳中继 WCDMA 蜂窝系统结构

图 1 显示了两跳中继 WCDMA 蜂窝系统的结构。根据移动节点和基站之间可以传输的最大比特率,每个小区可以分为高速率和低速率覆盖地区。在传统 WCDMA 蜂窝系统中,当新的呼叫请求从高速率地区到达时,一个高比特率信道可以分配给这个呼叫进行传输,例如图中的移动节点 C,

2007-04-16 收到, 2007-10-16 改回

国家 863 计划项目(2006AA01Z208), 江苏省基础研究计划(BK2004149), 江苏省青蓝工程基金项目 and 江苏省六大人才高峰基金项目资助课题

G 可以直接使用高比特率信道与基站通信。然而由于路径损耗和多径效应等原因,对于从低速率地区到达新的呼叫请求,只能分配给这个呼叫一个低比特率信道进行数据包的传输。而在两跳中继 WCDMA 蜂窝系统中,位于低速率地区的移动节点 A, E 可以发现位于高速率地区的中继节点,从而可以通过两跳中继的方式与基站通信。此外,如果移动节点的当前小区发生拥塞时,拥塞小区中移动节点也可以通过发现邻居小区的中继节点而将流量转移到非拥塞小区中。例如图中小区 2 中的基站可以通过中继节点将数据包传送到小区 1 中的节点 D 。

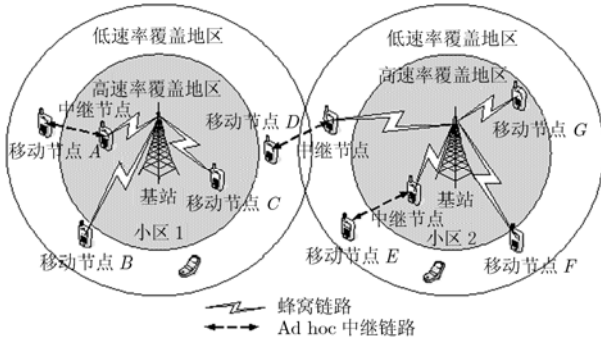


图 1 两跳中继 WCDMA 蜂窝系统结构

3 两跳中继 WCDMA 蜂窝系统解析模型

在 WCDMA 蜂窝系统中,OVFSF 码的产生原理是基于一个具有 $K+1$ 层的完全二叉树^[8],其中 $K \geq 2$ 。在 k 层上的 OVFSF 码可以表示为 C_k ,它具有的扩频因子 $SF=2^k$ 。假设 OVFSF 码 C_K 可以支持的数据传输速率为 r bits/s,那么 C_k 所支持的速率 R^k 为 $2^{K-k}r$ bits/s。此外,基站可以支持的总的数据传输速率 R_T 为 $2^K r$ bits/s。为了简化分析,在这里将 R_1 和 R_2 分别表示为下行高速率和低速率信道所需的比特率。在两跳中继 WCDMA 蜂窝系统中,我们定义 P_1 为低速率地区的移动节点可以获得高速率地区中继节点的概率,而定义 P_2 为当前小区的移动节点可以获得相邻小区中继节点的概率,影响这两个获得中继节点的概率的因素比较复杂^[9]。

假设下行数据包传输呼叫请求是服从泊松分布的随机变量,它的到达速率为 λ 。并且移动节点均匀分布在小区所覆盖的范围内,定义高速率地区所占小区面积的比率为 P_h ,所以从高速率和低速率地区到达的呼叫请求速率分别为 $\lambda_1 = P_h \lambda$ 和 $\lambda_2 = (1 - P_h) \lambda$ 。假设数据包大小服从均值为 $1/\mu$ 的指数分布,当数据包以高速率或低速率传输时,所需的传输时间将分别为服从均值 $1/(R_1 \mu)$ 和 $1/(R_2 \mu)$ 的指数分布。

两跳中继 WCDMA 蜂窝系统可以通过二维的马尔可夫过程进行建模。状态 (i, j) 表示在一个基站覆盖范围内, i 个

高比特率信道和 j 个低比特率信道正在被系统占用。状态空间 S 可以表示为

$$S = \{(i, j) | 0 \leq iR_1 + jR_2 \leq R_T, 0 \leq i \leq M, 0 \leq j \leq N\},$$

$$M = \lfloor R_T/R_1 \rfloor, \quad N = \lfloor R_T/R_2 \rfloor \quad (1)$$

假设 $Q(i, j)$ 是状态 (i, j) 的稳态概率。如果状态 $(i, j) \notin S$, 那么 $Q(i, j) = 0$ 。系统的状态转移过程可以考虑以下 3 种情况:

(1) 当 $iR_1 + jR_2 \leq R_T - R_1$

如果从小区来的呼叫请求到达状态 (i, j) , 并且低速率地区的移动节点可以获得高速率地区的中继节点时,基站将使用高比特率信道进行数据包的传输,这时状态 (i, j) 将以速率 $\lambda_1 + P_1 \lambda_2$ 转移到 $(i+1, j)$ 。当以高比特率传输的呼叫在状态 (i, j) 时结束,状态 (i, j) 将会以速率 $iR_1 \mu$ 转移到 $(i-1, j)$ 。如果低速率地区的移动节点不能获得高速率地区的中继节点时,状态 (i, j) 将以速率 $(1 - P_1) \lambda_2$ 转移到 $(i, j+1)$ 。当以低比特率传输的呼叫在状态 (i, j) 时结束,状态 (i, j) 将会以速率 $jR_2 \mu$ 转移到 $(i, j-1)$ 。状态等式如下所示:

(a) 当 $i=0$ 时,

$$[jR_2 \mu + \lambda_1 + P_1 \lambda_2 + (1 - P_1) \lambda_2] Q(0, j)$$

$$= (1 - P_1) \lambda_2 Q(0, j-1) + (j+1) \cdot R_2 \mu Q(0, j+1) + R_1 \mu Q(1, j) \quad (2)$$

(b) 当 $j=0$ 时,

$$[iR_1 \mu + \lambda_1 + P_1 \lambda_2 + (1 - P_1) \lambda_2] Q(i, 0)$$

$$= (\lambda_1 + P_1 \lambda_2) Q(i-1, 0) + R_2 \mu Q(i, 1)$$

$$+ (i+1) R_1 \mu Q(i+1, 0) \quad (3)$$

(c) 当 $i \neq 0, j \neq 0$ 时,

$$[iR_1 \mu + jR_2 \mu + \lambda_1 + P_1 \lambda_2 + (1 - P_1) \lambda_2] Q(i, j)$$

$$= (1 - P_1) \lambda_2 Q(i, j-1)$$

$$+ (\lambda_1 + P_1 \lambda_2) Q(i-1, j) + (j+1) R_2 \mu Q$$

$$\cdot (i, j+1) + (i+1) R_1 \mu Q(i+1, j) \quad (4)$$

(2) 当 $R_T - R_1 < iR_1 + jR_2 \leq R_T - R_2$

如果从高速率或低速率地区来的呼叫请求到达状态 (i, j) , 基站都将使用低比特率信道进行数据包的传输,这时状态 (i, j) 都将以速率 $\lambda_1 + \lambda_2$ 转移到 $(i, j+1)$ 。当以低比特率传输的呼叫在状态 (i, j) 时结束,状态 (i, j) 将会以速率 $jR_2 \mu$ 转移到 $(i, j-1)$ 。状态等式如下所示:

(a) 当 $i=0$ 时,

$$[jR_2 \mu + \lambda_1 + \lambda_2] Q(0, j)$$

$$= (1 - P_1) \lambda_2 Q(0, j-1) + (j+1) R_2 \mu Q(0, j+1) \quad (5)$$

(b) 当 $i \neq 0$ 时,

$$[iR_1 \mu + jR_2 \mu + \lambda_1 + \lambda_2] Q(i, j)$$

$$= (1 - P_1) \lambda_2 Q(i, j-1) + (\lambda_1 + P_1 \lambda_2)$$

$$\cdot Q(i-1, j) + (j+1) R_2 \mu Q(i, j+1) \quad (6)$$

(3) 当 $R_T - R_2 < iR_1 + jR_2 \leq R_T$

如果从高速率或低速率地区来的呼叫请求到达状态 (i, j) , 呼叫将会被阻塞。当以高比特率传输的呼叫在状态 (i, j) 时结束, 状态 (i, j) 将会以速率 $iR_1\mu$ 转移到 $(i-1, j)$ 。而当以低比特率传输的呼叫在状态 (i, j) 时结束, 状态 (i, j) 将会以速率 $jR_2\mu$ 转移到 $(i, j-1)$ 。状态等式如下所示:

(a) 当 $i=0$ 时,
$$jR_2\mu Q(0, j) = (\lambda_1 + \lambda_2)Q(0, j-1) \quad (7)$$

(b) 当 $j=0$ 时,
$$iR_1\mu Q(i, 0) = (\lambda_1 + P_1\lambda_2)Q(i-1, 0) \quad (8)$$

(c) 当 $i \neq 0, j \neq 0$ 时,
$$(iR_1\mu + jR_2\mu)Q(i, j) = (\lambda_1 + \lambda_2)Q(i, j-1) + (\lambda_1 + P_1\lambda_2)Q(i-1, j) \quad (9)$$

此外, 对于所有状态 $(i, j) \in S$,

$$\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N Q(i, j) = 1 \quad (10)$$

图2显示了一个两跳中继 WCDMA 蜂窝系统马尔可夫模型的状态转移图。其中 $R_1=2^{n+1}r, R_2=2^n r, R_T=2^{n+3}r$, 并且 $3 \leq n+3 \leq K$ 。

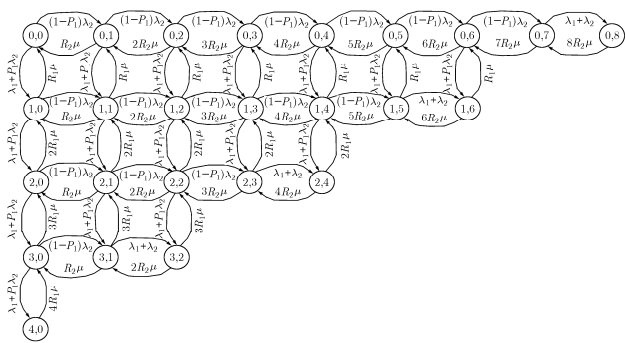


图2 两跳中继 WCDMA 蜂窝系统的马尔可夫状态转移过程

对于从小区范围中到达的呼叫请求, 如果系统中剩余的比特率不能支持一个低比特率信道时, 这个呼叫请求将会被阻塞。因此可以得到两跳中继 WCDMA 蜂窝系统的阻塞概率 P_b :

$$P_b = \sum_{iR_1 + jR_2 > R_T - R_2, (i, j) \in S} Q(i, j) \quad (11)$$

此外, 除去状态 $(0,0)$ 时的稳态概率, 可以获得系统的平均下行传输速率 R_v :

$$R_v = \sum_{(i, j) \in S, (i, j) \neq (0,0)} \left(\frac{iR_1 + jR_2}{i + j} \right) \frac{Q(i, j)}{1 - Q(0,0)} \quad (12)$$

当在两跳中继 WCDMA 蜂窝系统中加入拥塞控制功能时, 呼叫请求将会被阻塞, 当且仅当系统处于阻塞状态, 并且移动节点无法发现邻居小区中的中继节点, 或者可以发现中继节点, 但是邻居小区处在拥塞状态中。假设 P_b^a 为邻居小区的平均呼叫请求阻塞概率, 加入拥塞控制功能的系统呼叫请求阻塞概率 P_b^c 为

$$P_b^c = \sum_{iR_1 + jR_2 > R_T - R_2, (i, j) \in S} Q(i, j) [(1 - P_2) + P_2 P_b^a] \quad (13)$$

4 两跳中继 WCDMA 蜂窝系统性能分析

基于两跳中继 WCDMA 蜂窝系统的解析模型, 可以对系统的平均下行传输速率 R_v 和呼叫请求阻塞概率 P_b 和进行数值分析和比较。假设系统的呼叫到达速率 λ 分别为 10, 20, 30, 40 数据包/秒; 数据包大小的均值 $1/\mu=1\text{kbits}$; $r=10\text{kbits/s}, R_1=4r, R_2=2r, R_T=8r$ 。

图3显示了当 $P_h=0.25$ 时, P_1 对两跳中继 WCDMA 蜂窝系统性能的影响。图3(a)显示了 R_v 随着 P_1 的增加而增加。 P_1 越大意味着移动节点更加容易获得高速率地区的中继节点, 从而使得基站采用两跳中继方式提供高比特率传输机会增大。图3(b)显示了 P_b 随着 P_1 的增加而增加, 因为采用两跳中继方式的系统将会占用更多的高比特率信道, 新到达的呼叫请求将由于没有足够的比特率用于传输而增加被丢弃的可能性。

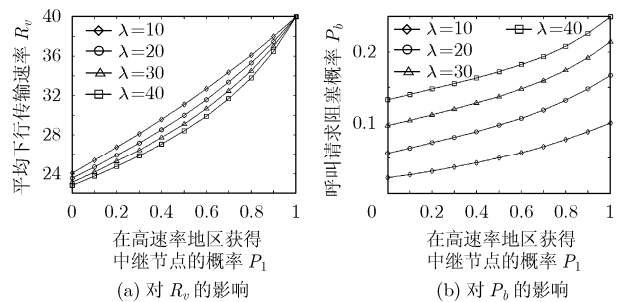


图3 不同 P_1 和 λ 时的系统性能 ($P_h=0.25$)

图4显示了当 $P_1=0.5$ 时, λ 对两跳中继 WCDMA 蜂窝系统性能的影响。图4(a)中显示了 R_v 随着 λ 的增加而减少。当 λ 增加时, 系统的传输信道将会更快地被占用, 从而减少了使用两跳中继方式的机会。所以在低速率地区发出的呼叫请求以低比特率传输方式得到服务的可能性更大。图4(b)中显示了 P_b 随着 λ 的增加而增加。当 λ 增加时, 更多的传输信道将被数据包传输呼叫所占用, 从而增加了 P_b 。

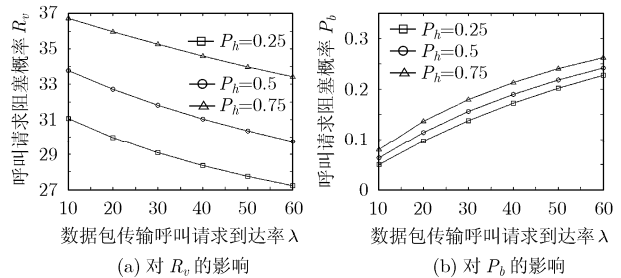


图4 不同 λ 和 P_h 时的系统性能 ($P_1=0.5$)

图5显示了当 $\lambda=40$ 时, P_h 对两跳中继 WCDMA 蜂窝系统性能的影响。图5(a)中显示了当 $P_1=0$ 和 0.5 时, R_v 随

着 P_h 的增加而增加。因为当 P_h 增加时, 将会有更多的移动节点位于高速率覆盖的地区, 使得基站使用高比特率信道传输数据包的可能性增大。当 $P_1=1$ 时, 基站可以对所有来自小区的呼叫请求使用高比特率信道传输。所以 R_v 保持不变。图 5(b) 显示了不同 P_h 对 P_b 的影响。从图中可以看出当 $P_1=0$ 和 0.5 时, P_b 随着 P_h 的增加而增加。当 P_h 增加时, 更多的高比特率信道将被呼叫所占用, 从而使得新的呼叫请求被丢弃的可能性增大。当 $P_1=1$ 时, P_b 将不随 P_h 的变化而改变。这是由于基站对小区内所有的呼叫请求使用高比特率信道进行数据包的传输。

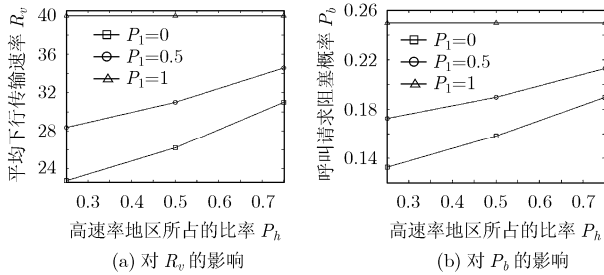


图 5 不同 P_h 和 P_1 时的系统性能 ($\lambda=40$)

通过对两跳中继 WCDMA 蜂窝系统的性能分析可以看出: 增加 P_1 和 P_h 的大小可以提高 R_v , 但是同时也增加了 P_b 。此外上述分析并没有考虑在系统中加入拥塞控制功能的情况。图 6 显示了当 λ 分别为 10 和 40 时, 系统在加入拥塞控制功能以后 P_b^c 的变化情况。从图中可以看出 P_b^c 随着 P_1 的增加而增加, 而随着 P_2 的增加而下降。这是由于当增加 P_2 时, 当前小区中的呼叫请求通过两跳中继的方式转移到邻居小区的机会更大, 从而可以有效降低当前小区的 P_b^c 。

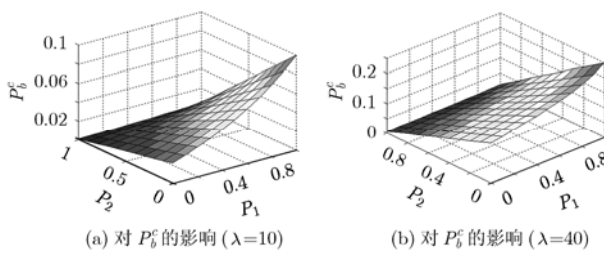


图 6 不同 P_1 和 P_2 时的 P_b^c ($P_h=0.25, P_b^a=0.05$)

5 结束语

本文提出了一种两跳中继 WCDMA 蜂窝系统结构。为了提高边缘地区的下行传输速率和对热点小区的流量进行拥塞控制, 它将两跳中继功能应用到传统 WCDMA 蜂窝系

统中。通过理论分析得到了两跳中继 WCDMA 蜂窝系统的解析模型, 数值分析结果表明两跳中继 WCDMA 蜂窝系统可以获得比传统无中继蜂窝系统更高的平均下行传输速率。当加入拥塞控制功能时, 可以进一步降低系统的呼叫请求阻塞概率。

参考文献

- [1] 3rd Generation Partnership Project. Technical specification group services and systems aspects; General packet radio service (GPRS); Service description; Stage 2.3GPP, Tech. Rep. 3G TS 23.060 V4.1.0, 2001.
- [2] Cheng R G and Lin P. OVSA code channel assignment for IMT-2000. Proceedings of the International Conference on Vehicular Technology, Tokyo, Japan, May 2000: 2188-2192.
- [3] 3rd Generation Partnership Project. Opportunity driven multiple access. 3GPP Tech. Rep. TR 25. 924 V1.0.0, 1999.
- [4] Pabst R, Walke B H, and Schultz D C, et al. Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(9): 80-89.
- [5] Rouse T, McLaughlin S, and Haas H. Coverage-capacity analysis of opportunity driven multiple access(ODMA) in UTRA TDD. Proceedings of the International Conference on 3G Mobile Communication Technologies, London, England, March 2001: 252-256.
- [6] Luo H, Ramjee R, and Sinha P, et al. UCAN: A unified cellular and ad-hoc network architecture. Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, San Diego, California, USA, September 2003: 353-367.
- [7] Wu H Y, Qiao C M, and De S, et al. Integrated cellular and Ad hoc relaying systems: iCAR. *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 2001, 19(10): 2105-2115.
- [8] Minn T and Siu K Y. Dynamic assignment of orthogonal variable spreading-factor codes in W-CDMA. *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(8): 1429-1439.
- [9] Feeney L M, Hollos D, and Karl H, et al. A geometric derivation of the probability of finding a relay in multi-rate networks. Proceedings of the third International IFIP-TC6 Networking Conference, Athens, Greece, May 2004: 1312-1317.

鲁蔚锋: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为无线混合网络的性能分析、切换及路由算法。

吴蒙: 男, 1963 年生, 博士, 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。