

An Improved Femtocell Spectrum Allocation Algorithm

Long Luo

Department of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing
Email: luolong0228@163.com

Received: Dec. 15th, 2011; revised: Dec. 28th, 2011; accepted: Jan. 8th, 2012

Abstract: Femtocell is considered to be one of emerging technologies in next generation communication systems. It provides an effective method for us to solve the indoor coverage problem. However, deploying the femtocell system in the existing macrocell network still faces many problems, such as spectrum allocation between cells to maximize spectral efficiency to minimize cell interference, switching between cells and power control. In this paper, according to the frequency reuse method we use the soft frequency reuse (SFR) method to our two-tier femtocell network. Allocating different power to the internal area and external area of macrocell, we propose an improved femtocell spectrum allocation method. Simulation results and analysis showed that the proposed spectrum allocation algorithm can raise the performance of the macro users and increase the system capacity.

Keywords: Femtocell; Macrocell; SFR; System Capacity

一种改进的家庭基站频谱分配算法

罗 龙

南京邮电大学, 通信与信息工程学院, 南京
Email: luolong0228@163.com

收稿日期: 2011 年 12 月 15 日; 修回日期: 2011 年 12 月 28 日; 录用日期: 2012 年 1 月 8 日

摘 要: 家庭基站(Femtocell)被认为是下一代通信系统新兴技术之一, 为我们解决室内覆盖问题提供了一种有效的方法。而要想在已经存在的宏蜂窝网络中成功的部署家庭基站系统, 仍然面临许多问题, 比如, 小区之间的频谱划分来最大化频谱效率最小化小区干扰, 切换和功率控制等。本文从频率复用的角度, 将软频率复用方法(SFR)应用到 Femtocell 两层网络的频谱分配算法中, 给宏小区的内部区域和外部区域分配不同的功率, 提出一种改进的基于 SFR 的家庭基站频谱分配算法。仿真结果和分析显示我们所提出的频谱分配算法能够提高宏用户的性能, 最小化家庭基站的配置对宏用户性能的影响, 保证小区边界用户的性能, 增大系统容量。

关键词: 家庭基站(Femtocell); 宏基站; 软频率复用; 系统容量

1. 引言

近年来在宏蜂窝网络中使用 Femtocell 来解决网络的室内覆盖问题已经成为热点。Femtocell 是一种对运营商和用户都有利的能增大覆盖面积且能支持更高的数据速率的新兴技术^[1]。然而, 在现有的宏蜂窝网络中配置数量众多的家庭基站却面临许多问题。其中一个重要问题就是如何在宏蜂窝网络和家庭网络

共存的时候进行频谱的分配^[2]。而且, 由于频谱资源非常短缺, 如何有效的利用频谱资源, 同时要兼顾两层网络共存时候的同信道干扰问题对系统性能的影响^[3]。软频率复用(Soft Frequency Reuse, SFR)算法是宏蜂窝系统中减少小区之间干扰的解决方法之一, 而且使用该方法的频谱效率近似接近复用因子为 $1^{[4-6]}$, 该算法区别其他部分频率复用的方法在于给小区内外部区域和外部区域分配不同的功率。本文我们将从频

率复用的角度, 基于文献[7]的频谱分配算法提出一种改进的频谱分配算法, 文献[7]中宏用户和家庭用户按照频谱和时隙两个维度来进行资源的分配, 将部分频率复用(Fractional Frequency Reuse, FFR)概念应用到宏基站的频谱分配中^[8-10], 但是该算法中宏小区内部区域和外部区域使用相同的功率, 在限制总功率的前提下, 平均分配功率给宏小区中用户。本章我们将 SFR 应用到宏基站的频谱分配中, 给宏小区的内部区域和外部区域分配不同的功率, 相应的提出一种改进的家庭基站频谱分配方法, 在保证宏用户的系统性能的前提下, 减少宏小区之间和宏小区和家庭小区之间的同信道干扰, 增大系统的容量。

2. 系统模型

我们考虑由 $M = 19$ 个宏小区组成的 2 层蜂窝网络。如图 1 所示宏基站位于每个宏小区的中心。家庭基站均匀的, 相互分隔的分布在每个宏小区中。一个宏用户不仅受到相邻的 18 个宏小区的干扰而且受到相邻的家庭小区的干扰, 因此宏用户 m 在子载波 k 上的接收信干噪比 SINR 可以表示为^[4]

$$\text{SINR}_{m,k} = \frac{P_{M,k} G_{m,M,k}}{N_0 \Delta f + \sum_{M'} P_{M',k} G_{m,M',k} + \sum_F P_{F,k} G_{m,F,k}} \quad (1)$$

其中 $P_{M,k}$ 和 $P_{M',k}$ 分别表示所在的宏小区 M 以及临近的宏小区 M' 在子载波 k 上的传输功率。而 $G_{m,M,k}$ 表示宏小区 M 里面的宏用户 m 在子载波 k 上的信道增益, $G_{m,M',k}$ 表示来自相邻宏小区 M' 的宏用户 m 在

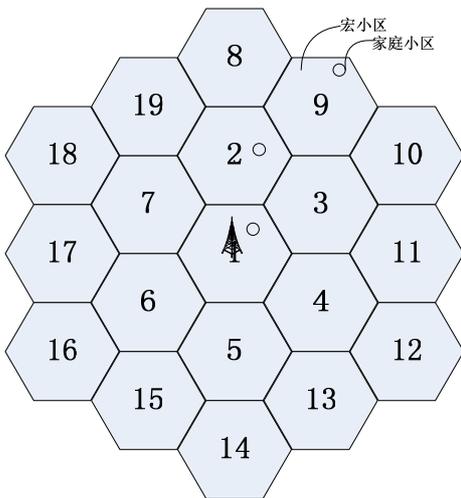


Figure 1. Two-tier network with femtocells
图 1. 加载家庭基站的两层网络

子载波 k 上的信道增益。 $P_{F,k}$ 表示相邻家庭小区 F 在子载波 k 上的传输功率。 $G_{m,F,k}$ 表示宏用户 m 和相邻家庭小区 F 在子载波 k 上的信道增益。 N_0 表示高斯白噪声的功率频谱密度值, Δf 表示子载波大小值。

相应的对于一个家庭小区用户来说, 不仅受到 19 个宏小区的干扰还受到相邻的家庭小区的干扰, 因此一个家庭用户 f 在子载波 k 上的接收信干噪比 SINR 可以表示为:

$$\text{SINR}_{f,k} = \frac{P_{F,k} G_{f,F,k}}{N_0 \Delta f + \sum_M P_{M,k} G_{m,M,k} + \sum_{F'} P_{F',k} G_{m,F',k}} \quad (2)$$

而信道增益 G 主要是由路径损耗来决定, 而室内和室外的路径损耗表达式并不相同。因此我们分为两种情况来分别讨论信道模型。一种称之为外部路径损耗模型:

$$PL_{\text{outdoor}} = 28 + 35 \log_{10}(d) \text{ dB} \quad (3)$$

另一种称之为室内路径损耗模型:

$$PL_{\text{indoor}} = 38.5 + 20 \log_{10}(d) + L_{\text{walls}} \text{ dB} \quad (4)$$

其中 d 是基站和用户之间的距离, 其中 L_{walls} 在三种不同情况下的取值分别为 7, 10 和 15 dB^[11]。信道增益 G 可以表示为

$$G = 10^{-PL/10} \quad (5)$$

宏用户 m 在子载波 k 上的实际容量可以表示为^[4]

$$C_{m,k} = \Delta f \log_2(1 + \alpha \text{SINR}_{m,k}) \quad (6)$$

其中 α 是一个常量, 与 BER(目标错误比特率)有关, 我们可以将它定义为 $\alpha = -1.5/\ln(5\text{BER})$, 我们假设 $\text{BER} = 10^{-6}$ 。

因此工作宏小区 M 的总的吞吐量可以表示为

$$T_M = \sum_m \sum_k \beta_{m,k} C_{m,k} \quad (7)$$

其中, $\beta_{m,k}$ 代表分配给宏用户的子载波。当 $\beta_{m,k} = 1$, 表明子载波 k 已经分配给宏用户 m 。 $\beta_{m,k} = 0$, 则表明子载波 k 没有分配给宏用户 m 。从 OFDMA 系统的特性我们可以知道, 在某个时隙里某个子载波只能分配给一个宏用户。这就表明 $\beta_{m,k}$ 之间还存在着这样的关系 $\sum_{m=1}^{N_m} \beta_{m,k} = 1$, 其中 N_m 表示在一个宏小区中所有宏用户的总数。

对于家庭用户而言, 用户容量和总的吞吐量的公式和宏用户的相类似, 我们可以参考上一段中的各表达式, 将符号稍作修改便可使用。

3. 算法的提出

3.1. 宏小区的 SFR 方法

在我们提出的宏小区中的 SFR 方法中，一个宏小区划分成两部分，内部区域和外部区域。一个移动用户到底属于内部区域还是外部区域是基站通过初始配置时候或者系统状态更新的时候接收到用户的参考信号的 SINR 来决定。如果一个移动用户报告的 SINR 超过了预先设定的 SINR 阈值，基站就认为这个移动用户是属于宏小区的内部区域，否则，如果移动用户报告的 SINR 低于预先设定的 SINR 阈值，基站认为移动用户是外部区域。一个移动用户的报告 SINR 大小取决于用户的位置，在小区中移动用户离基站越远，则用户到基站的路径损耗就越大。如图 2 所示为 SFR 中频谱和功率的分配方法，F1 + F2 + F3 代表全部的频谱，其中 F1 = F2 = F3。由于本文考虑使用 SFR 方法，在频谱分配的时候考虑了功率的分配问题。当外部区域使用 1/3 的总带宽的时候，其使用功率为 P_{max} ，当内部区域使用剩下的 2/3 的带宽的时候，使用的功率为 αP_{max} 。如图 3 所示列出了本文提出的宏小区中频谱分配方法，图中根据一个移动用户所属的区域阐述了宏小区一种可行的频段划分。小区中所有子信道的 1/3 可以分配给外部区域，其使用功率为 P_{max} ，内部区域使用剩下的 2/3 子信道，使用的功率为 αP_{max} 。同时，内部区域和外部区域的服务时间通过时隙来分隔开来。由于来至相邻宏小区基站的 CCI 是有限的，因此宏小区中的内部区域的移动用户都可以同时正常工作，在宏小区的外部区域的移动用户也可以同时工作，但是为了避免来至相邻宏基站的很强的

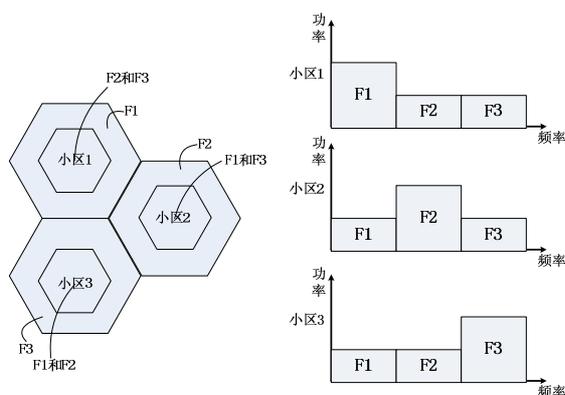


Figure 2. Spectrum and power resource allocation in SFR
图 2. SFR 方法中频谱和功率的分配

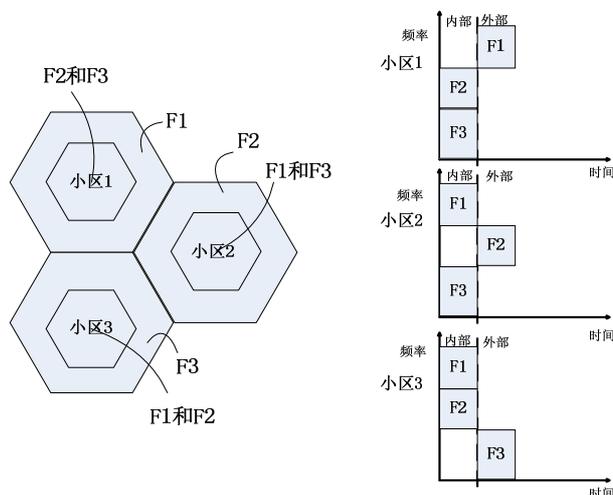


Figure 3. Spectrum and time resource allocation based on SFR in macrocell

图 3. 宏小区内频谱和时隙资源的 SFR 方法

CCI 它们都使用了正交的子信道来工作。总之，为了减少小区之间和小区内的内部区域和外部区域的干扰，内部区域和外部区域配置分隔的时隙和频谱资源。

3.2. femtocells 家庭基站的频谱划分方法

在宏小区使用 SFR 方法的基础上我们提出一种改进的家庭小区之间的频谱划分方法。首先，家庭小区应该合理配置来最大化宏小区的性能而不仅仅是为了尽量减少对宏小区性能的影响。在我们提出的方法中，家庭小区通过一个家庭小区是处于宏小区的内部区域或者外部区域而被划分成内部组和外部组。我们假设家庭基站可以支持自配置功能。一个家庭基站通过导频感知来报告宏小区中到宏基站的参考信号的 SINR 大小，这个过程类似于宏小区中的宏用户刚刚开机时候的过程。然后宏基站决定这个家庭小区到底是属于内部区域还是外部区域，并且通知该家庭基站使用适合的频谱资源。我们假设所有的宏基站和家庭基站都是同步的。接下来，我们可以考虑影响家庭小区频谱划分的三个因素，频谱，时间，空间状态。

在内部组的家庭小区也即内部的家庭小区的时隙和频谱的分配按照如下的原则，当分配内部时隙的时候可以使用与宏小区内部时隙相正交的频谱资源，当分配外部时隙的时候可以使用与宏小区外部时隙相正交的频谱资源，按照之前宏小区的频谱分配方法，在内部时隙的时候宏小区使用 1/3 的总带宽的时候，相应还有 2/3 的未被使用的频带资源可以配置给

内部组家庭小区。在外部时隙的时候宏小区使用 2/3 的总带宽的时候，相应还有 1/3 的未被使用的频带资源可以配置给内部组家庭小区。而由于家庭基站的低功率特点以及相对较大的路径损耗因素(例如长距离的路径损耗和室内大楼的墙体穿透损耗等因素)使得内部家庭小区和相邻宏小区之间的 CCI 被限制在很小的范围。

而对于外部组的家庭小区，它们的特点是发射功率比较低，并且离宏基站的距离相对较远，因此处于该组的家庭基站受到的小区之间的干扰以及小区内部来至宏基站的干扰和小区内部来至相邻家庭基站的干扰值都相对比较小。从频谱带宽和服务时间两个维度来讲，我们可以给它们分配相同的频谱带宽和时隙，例如，可以分配处于小区内部区域的宏用户的工作时间(内部时间)而使用 2/3 频谱资源，分配外部时间仍然使用 2/3 的频谱资源。如图 4~7 所示。

4. 性能估算

本文考虑由 $M = 19$ 个宏小区组成的 2 层蜂窝网络。宏基站位于每个宏小区的中心，家庭基站均匀的，相互分隔的分布在每个宏小区中。假设各个宏小区里宏用户数目为 180 个，每个宏小区里家庭基站的数目从 30 到 180 变化，宏小区覆盖半径，家庭基站覆盖半径分别为 600 m, 30 m。取中心区域与宏小区的覆盖半径比为 0.65，宏基站对边缘用户，对中心用户，以及不区分内外区域情况下的发射功率分别为，30 W, 15 W, 20 W。家庭基站的发射功率假设为 20 mW。可用子载波数目为 300，子载波间隔为 15 KHz，

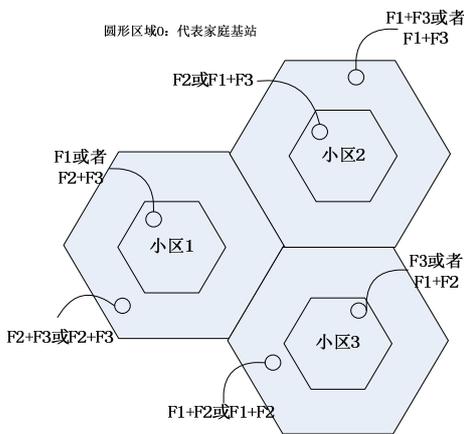


Figure 4. Spectrum allocation in Femtocell
图 4. Femtocell 的频谱分配方法

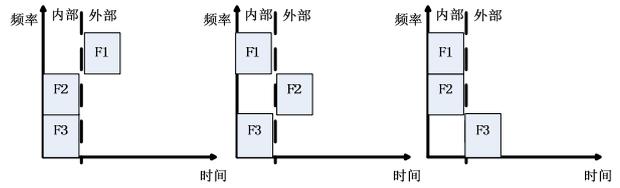


Figure 5. Spectrum allocation in macrocell
图 5. 宏小区的频谱分配

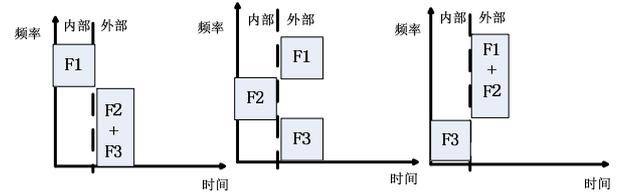


Figure 6. Spectrum allocation in internal group of Femtocell
图 6. Femtocell 内部组的频谱分配

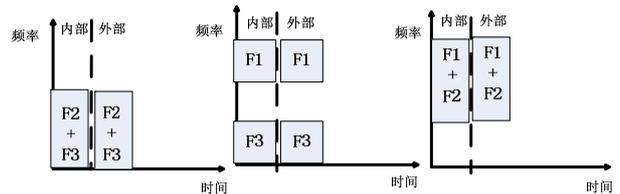


Figure 7. Spectrum allocation in external group of Femtocell
图 7. Femtocell 外部组的频谱分配

白噪声功率谱密度 $N_0 = -174$ dBm/Hz。本文提出的算法还要和其他两种算法(SFR 和原算法)相比较。SFR 方法：宏基站层使用 SFR 方法来进行频谱分配，而家庭基站层则与宏基站共享全部频谱并将全部频谱进行随机分配使用。原方法：宏基站层使用 FFR 方法进行频谱分配，家庭基站层使用如参考文献[7]中所述的频谱分配方法。

图 8 中我们得到一个宏基站移动用户从小区的中心移动到小区边界时候的平均 SINR 的变化情况，其中宏基站位于(0, 0)点。情形 1，我们考虑所有的宏小区和家庭小区使用相同的频谱带宽的情况，也即频率复用因子为 1 的时候。在这种情况下，我们观察宏小区移动用户在小区边界处的平均 SINR 相对较低，这和我们的预期相同。另一方面，考虑情形 2，在没有加载家庭基站的时候的基础 SFR 方法的性能，图中显示宏用户在小区边界处的平均 SINR 比情形 1 的时候要大，这是由于情形 2 中避免了来至其他层小区的 CCI。我们设置 SINR 阈值为 5 dB 作为区分小区内部区域和外部区域的标准。我们可以发现一个加载有 234 个家庭小区的宏小区的平均 SINR 和没有加载

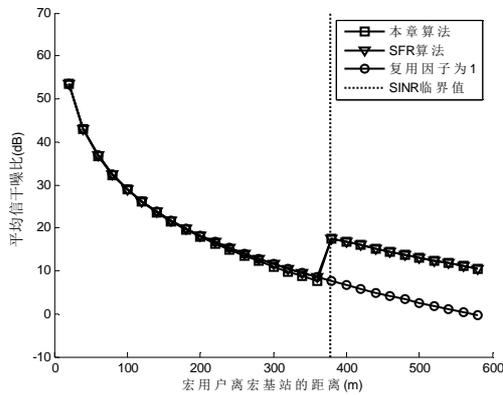


Figure 8. The average SINR of macro users
图 8. 宏用户的平均 SINR

家庭小区的情形基本相同。因此我们可以得出结论，使用我们提出的算法可以使得宏基站用户的性能不会受到家庭基站的配置而减小。

图 9 表示随着家庭小区的数量的变化，位于宏小区覆盖范围内的宏用户的吞吐量值的变化曲线。在本文提出的算法中，宏小区使用软频率复用方法，中心区域和边界区域的发射功率不同，对于边界区域的宏用户而言，使用更大的功率，会提高用户的 SINR，增大系统吞吐量；家庭用户能够使用宏用户不使用的子载波，因此可以很好的避免宏用户和家庭用户之间的干扰。家庭小区对宏用户性能的影响小于相比较的另外两种算法。另外一方面，在 SFR 方法中，子载波是随机分配给家庭用户而不管宏用户中使用的子载波的情况，必然存在宏用户和家庭用户位置很靠近的时候分配使用了相同的子载波，宏用户和家庭用户之间的干扰比我们提出的算法要大。因此随着家庭基站数量的增大，本章的算法与 SFR 算法之间的吞吐量差距越来越大，这是由于随着配置的家庭基站的数量增大，宏用户受到家庭基站的干扰会越来越大，本文的算法可以避免这种干扰因此性能恶化的情况明显要小很多。而原算法在宏小区使用 FFR 方法，并没有考虑功率对系统容量的影响。而本文算法在宏小区的频谱配置的时候充分考虑了功率对系统容量的影响，因此宏用户吞吐量比原算法要高。

图 10 描述位于边界区域的宏用户和家庭用户总的吞吐量。在 OFDMA 蜂窝系统中，由于小区之间的干扰会导致边界区域的性能很差。在我们提出的算法中，分配给边界区域的家庭小区大量的子载波，边界区域的吞吐量明显改善。相对比 SFR 算法，根本不

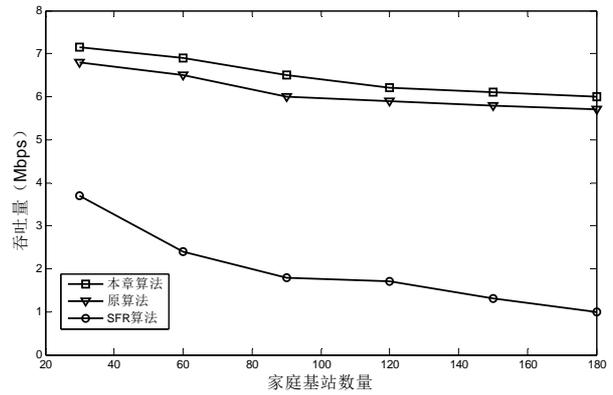


Figure 9. The throughput of macro users
图 9. 宏用户的吞吐量

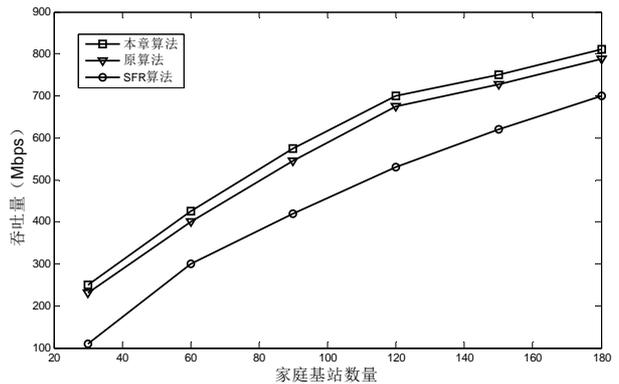


Figure 10. Throughput of macro and femto users located in the edge region
图 10. 边界区域的宏用户和家庭用户总的吞吐量

考虑用户位置是在中心还是边界区域，只是随机的分配子载波给家庭用户。因此边界区域的吞吐量小于提出的算法。而相比原算法，虽然分配给边界区域的家庭小区的子载波数量要少，但是宏用户的 SINR 却更大，边界区域的宏用户和家庭用户总的吞吐量也更大。

5. 结论

在本文中，我们参考已有的一些家庭基站两层网络中的频谱分配算法的基础上，提出一种使用 SFR 同时从频谱和时隙两个维度来考虑频谱分配的方法。在宏小区和家庭小区共存的两层网络的场景下，使用相同的频谱会有一些的难度和风险，家庭基站的大量铺设会对宏小区用户的性能产生很大的影响。算法通过给宏基站使用 SFR 方法来减少宏基站之间的干扰，通过给中心区域和边界区域分配不同的功率来提高宏用户的性能。然后在家庭基站层里使用一种改进的频

谱分配方法使得在指定的时隙给内部家庭小区使用宏小区没有使用的频谱带宽来减少干扰，从而起到保护宏用户的作用，同时给小区的边界用户提供了大量的频谱资源，提高小区边界用户的性能。通过系统性能仿真我们可以看到使用该算法首先能够提高宏用户的性能，最小化家庭基站的配置对宏用户性能的影响。其次，对于小区边界的用户的性能也能够得到保证，使得整个系统的容量增大。

6. 致谢

这篇论文能够完成首先要感谢我的导师潘教授，是潘老师在自己的课题的研究基础上给我提了很多宝贵的意见，激发和引导我的论文思路，您严谨的治学态度和渊博的知识永远都是我的学习楷模，同时也要感谢在论文撰写过程中给我帮助的各位同学和朋友，在你们的帮助下，使我逐渐进步，让我对无线通信领域有了更深的了解，谢谢大家。

参考文献 (References)

- [1] V. Chandrasekhar, J. Andrews. Femtocell networks: A survey. *IEEE Communications*, 2008, 9: 59-67.
- [2] D. López-Pérez, A. Valcarce, G. Roche and J. Zhang. OFDMA Femtocells: A roadmap on interference avoidance. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(9): 41-48.
- [3] S.-E. Elayoubi, O. Ben Haddada and B. Fougere, Performance evaluation of frequency planning schemes in OFDMA-based networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(5): 1623-1633.
- [4] H. Lei, L. Zhang, X. Zhang and D. Yang. A novel multi-cell OFDMA system structure using fractional frequency reuse. Athens: *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 3-7 September 2007: 1-5.
- [5] M. Assaad. Optimal Fractional Frequency Reuse (FFR) in multicellular OFDMA system. Calgary: *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, 21-24 September 2008: 1090-3038.
- [6] S. Yeh, et al. WiMAX femtocells: A perspective on network architecture, capacity, and coverage. *IEEE Communications*, 2008, 46(10): 58-65.
- [7] C.-Y. Oh, M. Y. Chung. A novel frequency planning for femtocells in OFDMA-based cellular networks using fractional frequency reuse. *ICCSA 2010, Part III, LNCS 6018*, 2010: 96-106.
- [8] G. Boudreau, J. Panicker, N. Guo, R. Chang, N. Wang and S. Vrzic. Interference coordination and cancellation for 4G networks. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(4): 74-81.
- [9] R. Chang, Z. Tao, J. Zhang and C.-C. Guo. A graph approach to dynamic fractional frequency reuse (FFR) in multi-cell OFDMA networks. Dresden: *IEEE International Conference on Communications*, 14-18 June 2009: 1-6.
- [10] Huawei, R1-050507. Soft Frequency Reuse Scheme for UTRAN LTE. Athens, 9-13 May, 2005.
- [11] L. Ho, H. Claussen. Effects of user-deployed, co-channel femtocells on the call drop probability in a residential scenario. Athens: *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 3-7 September 2007: 1-5.